



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**PALEOECOLOGÍA DEL LAGO DE
ZIRAHUÉN: REGISTRO PALINOLÓGICO
DE LOS ÚLTIMOS 3000 AÑOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

MÓNICA VÁZQUEZ ARELLANO



DIRECTORA DE TESIS:

DRA. SOCORRO LOZANO GARCÍA

MAYO 2009



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



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

HOJA DE JURADO

Datos de alumno

Vázquez
Arellano
Mónica
58 45 14 76
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
09415482-3

Datos del Tutor

Dra.
Lozano
García
María del Socorro

Datos del sinodal 1

Dra.
Ortega
Guerrero
Beatriz

Datos del sinodal 2

Dra.
Vilaclara
Fatjó
Gloria

Datos sinodal 3

M en C
Sosa
Nájera
Susana

Datos sinodal 4

M en C.
Márquez
Huitzil
Roberto

A MI MAMÁ

QUE ME ENSEÑÓ A RECONOCER
QUE EL CONOCIMIENTO ES
LA RIQUEZA MÁS VALIOSA
QUE PODEMOS POSEER

A MI PAPÁ

HOMBRE HONESTO, RESPONSABLE,
Y DE BUEN CORAZÓN
QUE ME MOSTRÓ EL VALOR DE ESAS CUALIDADES

A MIS HERMANOS JOSÉ ALBERTO Y EDUARDO

POR SU AMOR Y COMPAÑÍA

A LA MEMORIA DE MI QUERIDA AMIGA SILVIA

...COMPAÑERA DEL ALMA, COMPAÑERA

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este trabajo ha sido una aventura que me ha permitido aprender mucho. En primer lugar quiero agradecer a la Dra. Socorro Lozano, quien me brindó la oportunidad de participar en el proyecto de investigación al cual pertenece esta tesis; también le estoy sumamente agradecida por la minuciosa revisión que le hizo a este trabajo y por todo el tiempo dedicado a mi educación. Gran parte de mi formación para realizar este trabajo se lo debo a la M. en C. Susana Sosa, la cual me dedico parte de su valioso tiempo. Además quiero agradecer a la doctora Gloria Vilaclara el apoyo que recibí en la identificación de los ejemplares acuáticos que aparecieron en mis muestras. Al Dr. Víctor Martínez Almeida le agradezco que compartiera sus conocimientos sobre las Desmidiáceas de Zirahuén. Del mismo modo agradezco el material bibliográfico que me proporcionó el doctor Fernando Bernal Brooks, el cual fue indispensable para la elaboración de estas tesis. Durante mi estancia en Morelia recibí el apoyo de la Dra. Isabel Israde de la UMSNH y del biólogo Rodrigo Durán que muy amablemente me mostró algunas zonas importantes de la cuenca de Zirahuén. También quiero agradecer al M. en C. Gabriel Vázquez la información que me compartió. A la doctora Beatriz Ortega y al M. en C. Roberto Márquez por el cuidado en la revisión de este texto. La elaboración de la presente investigación no hubiera sido posible sin el apoyo económico que recibí por parte del Instituto de Geología y al proyecto UNAM-DGAPA IN2026062.

Estoy muy agradecida con mis padres por el esfuerzo que hicieron para que yo pudiera concluir una carrera profesional y porque pese a las dificultades económicas, nunca dejaron de apoyarme. También quiero agradecer a mis hermanos, quienes a lo largo de mi vida han sido una compañía muy valiosa y grata, particularmente Eduardo llena mi vida de alegría y a José gracias por tu compañía de tantos años.

A continuación sigue una enorme lista de agradecimientos, pues en verdad he estado rodeada de gente muy valiosa que me han acompañado en distintas etapas de mi vida; su participación ha sido tan significativa que no puedo dejar de nombrarlos y agradecerles.

A la memoria de Carlos Galán, hombre que disfrutaba de la vida en el campo y al que debo mi primer acercamiento a la biología. A los amigos del grupo 60 y de ATSMAC con los cuales compartí muchas aventuras en el bosque.

A mis amigos de la Facultad de Economía: Axel, Julio, Paty y Sandra con los cuales compartí una etapa muy valiosa de mi vida.

A mi querido maestro, el Dr. Julio Muñoz Rubio, a quien agradezco tantas y tantas horas de estudio y de discusión, pero sobre todo de amistad.

A Lev Jardón y a Diego, los cuales compartieron muy amablemente sus conocimientos y amistad durante varios años.

A mis compañeros del taller: Emiliano, Ángel, Brenda, Cristina e Iván, con los cuales sostuve interesantes debates.

A mis queridas amigas Meztli, Rosario y Sara con las cuales compartí prácticamente todo mi tiempo en la universidad. Gracias, pues además de ser grandes compañeras de estudio, solidarias y alegres, hicieron que mi estancia en la UNAM fuera mucho más grata. ¡Nos divertimos bastante!

A mis amigas Efro, Nidia, Josecito, Balam, con las cuales compartí tiempo de estudio y de amistad durante la carrera.

A todos los amigos de Cuautla con los cuales comparto el interés por proteger el manantial que surte agua a casi toda la ciudad y que se ve amenazado por la instalación de una gasolinera.

A Jorge Veraza, hombre maravilloso que siempre me brinda oportunidades para aprender algo que me ayudará a tener una mejor comprensión de la vida, del mundo y de la humanidad. Siempre generoso compartiendo cuanto entendimiento adquiere. Finalmente le agradezco el entusiasmo que muestra por mi desarrollo intelectual y personal.

A David Moreno, quien durante todo el tiempo de realización de este trabajo ha estado pendiente de mis avances y ha estado dispuesto a brindarme apoyo y a darme ánimos.

A Andrés Barreda porque gracias a él entendí la importancia de estudiar biología y el compromiso social que entraña.

A mi querido amigo de tantos años, Gonzalo Flores. ¡Mil gracias Gonzalito!, siempre tuviste un buen consejo a lo largo de la ardua tarea de elaboración y conclusión de este trabajo, tus comentarios fueron siempre prudentes y atinados.

A Rolis y Kary porque en medio de bromas, música, tareas cotidianas y distracciones, su compañía resultó ser un buen aliciente para que pese o todo lograra terminar la tesis.

A Juanita gran amiga de muchos años, que siempre tiene a la mano un buen consejo.

Faby, gracias por la compañía, la amistad y por tantas aventuras que compartimos; también te quiero agradecer el apoyo que me has brindado para la conclusión de la tesis.

A mis queridos amigos con los que me he desarrollado como ser humano y con los que he compartido la vida: Ruth, Juan, Wicha, Sol, Carmen, Titu, Lili, Meche, Tere, Pavel, María, Ricardo, Gaby y Leslie.

A los pequeñines que llenan de alegría mi vida: Marianita, Helenita, Jaci, Ale, Izti, Mundo, Santi y Ricardito.

También quiero agradecer a Brenda la amistad y lo bien que la pasamos juntas. A Daniel le agradezco su amistad y su apoyo, ya que en distintos momentos me ayudó a solucionar problemas con las gráficas y laminas. Y finalmente mil gracias a mis muy queridos y diversos amigos que en todo momento con su compañía y amistad me facilitaron la tarea de elaborar y concluir la tesis: Dianita, Dora, Jazmin, Joselyn, Jenni, Katy y Dulce.

Los problemas ambientales no crecen en forma lineal sino en forma geométrica. Un ecosistema puede ser atacado de mil maneras y por mil causas diferentes, pero, teniendo en cuenta que semejante ataque no se realiza de acuerdo a una estricta progresión que tú puedas controlar, un ecosistema puede parecer sano en un momento determinado y estar muerto al día siguiente. No se trata de dos más dos, cuatro más cuatro u ocho mas ocho, sino de dos veces dos, cuatro veces cuatro.

David Suzuki

ÍNDICE

Agradecimientos, 4

Introducción, 11

1. Objetivos, 13

1.1. Objetivos generales, 13

1.2. Objetivos particulares, 13

2. Antecedentes, 14

2.1. Importancia de la investigación paleoecológica, 14

2.2. Investigaciones paleoecológicas en el occidente de México, 15

2.2.1 Investigaciones en la Hoya de San Nicolás Parangueo, 16

2.2.2. Investigaciones en la piscina de Yuriria, 16

2.2.3. Investigaciones en Pátzcuaro, 17

2.2.4. Investigaciones en el lago de Zacapu, 18

2.2.5. Investigaciones en el lago de Zirahuén, 20

3. Descripción del área de estudio, 22

3.1. La cuenca de Zirahuén, 22

3.2. El lago de Zirahuén, 22

3.3. Actividad volcánica reciente, 23

3.4. Suelos, 24

3.5. Clima, 24

3.6. Vegetación, 25

3.6.1. Bosque de *Pinus*, 25

3.6.2. Bosque de *Abies*, 25

3.6.3. Bosque de *Quercus*, 27

3.6.4. Bosque mesófilo de montaña, 27

3.6.5. Pastizal, 28

3.7. Limnología, 29

3.7.1. Vegetación acuática, 31

3.7.2. Fitoplancton, 32

3.7.3. Zooplancton, 33

4. Arqueología, 35

4.1. Periodos arqueológicos de la región tarasca, 35

4.2. Historia de las modificaciones ecológicas en la región tarasca, 39

4.3. Estado actual de los recursos naturales en la cuenca de Zirahuén, 40

5. Metodología, 42

5.1. Método de campo, 42

5.2. Método de laboratorio, 42

5.3. Método de gabinete, 44

5.3.1. Cuento e identificación de palinomorfos, 44

- 5.3.2. Análisis estadístico de los datos, 45
- 5.3.3. Cronología, 46

6. Resultados, 47

- 6.1. Descripción de los sedimentos, 47
- 6.2. Cronología, 47
- 6.3. Análisis palinológico, 48
 - 6.3.1. Diagramas de polen, 49
 - 6.3.2. Zonación, 49
 - 6.3.3. Láminas de polen, 58

7. Discusión, 62

8. Conclusiones, 72

- 8.1. Consideraciones finales, 74

Referencias bibliográficas, 76

Índice de mapas

- 3.1. Mapa batimétrico del lago de Zirahuén, 23
- 3.3. Mapa de localización de la vegetación de la cuenca de Zirahuén. Aquí se muestran los cerros más importantes de la región, 29
- 4.1. Mapa de la extensión del imperio tarasco, 38

Índice de fotografías

- 3.2. Fotografía del bosque de *Abies religiosa* localizado en Cerro Burro dentro de la cuenca de Zirahuén, 26
- 3.4. Fotografía del lago de Zirahuén, donde se observa el crecimiento de la vegetación subacuática y al fondo a la derecha se observa el cerro San Miguel o Zirahuén, 31

Índice de figuras

Figura 6.1. Modelo de edad, 48

Figura 6.2. En este diagrama se muestran los *taxa* de la vegetación regional: árboles, hierbas y pteridofitas. A la derecha se muestran las zonas y subzonas. A la izquierda se presenta la cronología en años de calendario y la profundidad, 55

Figura .6.3. Diagrama palinológico local donde se observa la concentración de polen de plantas acuáticas, fitoplancton, zooplancton, esporas de hongos, 56

Figura 6.4. En este diagrama se muestra el porcentaje de polen, hierbas y esporas de helechos de la secuencia MOLE-ZIR03-2-1K. Se presenta el número de algas, esporas de hongos, y la concentración de partículas de carbón, concentración polínica (granos/cm³), acumulación polínica (granos/cm²/año) y susceptibilidad magnética. La profundidad, edad y periodos arqueológicos se encuentran en el extremo izquierdo del diagrama, 57

Lámina 1, 59

Lámina 2, 60

Lámina 3, 61

INTRODUCCIÓN

El lago de Zirahuén es uno de los pocos lagos de México que presenta ecosistemas relativamente saludables. Por la calidad de su agua está clasificado como lago oligotrófico (López, 1982; Bernal-Brooks *et al.*, 2002; Martínez-Almeida, 2005). En los últimos años se han realizado diversas investigaciones de tipo limnológico (Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000 a y b; Madrigal, 2004; Davies, 2005). Estas investigaciones son importantes porque permiten conocer la diversidad de organismos que habitan en la cuenca, las relaciones tróficas que existen entre los integrantes de estas comunidades biológicas, así como la calidad y características físico-químicas del lago. Sin embargo, sí se quiere tener mayor precisión para evaluar el impacto que las comunidades humanas han ejercido sobre este ecosistema es necesario realizar estudios de tipo paleoecológico.

Esta es la razón por la cual en el presente trabajo se intentó realizar una reconstrucción ambiental o paleoecológica de la cuenca y el lago de Zirahuén a partir del análisis de diversos palinomorfos preservados en los sedimentos lacustres. Se prefirió este tipo de paleoindicadores debido a su grado de preservación y continuidad estratigráfica, pues se pueden encontrar granos de polen y esporas en sedimentos con una antigüedad de miles a millones de años. Se definen como palinomorfos tanto los granos de polen y esporas, como cualquier otro organismo preservado en los sedimentos lacustres que hayan resistido la técnica de extracción que se utiliza para recuperar estos restos de la matriz del sedimento (Lozano, com. pers.).

La identificación de los diversos palinomorfos localizados en el lago de Zirahuén posibilita la reconstrucción de la vegetación de la cuenca y del lago, por lo que permite inferir de manera indirecta las condiciones ambientales en las que habitaron dichos organismos y/o, por lo menos, un acercamiento al tipo de ecosistema.

El estudio de los sedimentos permitió realizar una propuesta de cómo está representada la vegetación en la cuenca en los últimos 3000 años. Para el mismo periodo se logró hacer una interpretación de las modificaciones ocurridas en el lago, pues se hallaron restos de organismos acuáticos. Un factor fundamental en la reconstrucción paleoecológica fue enmarcar esta investigación en el desarrollo de las comunidades humanas que habitan la cuenca de Zirahuén. Ello con el fin de tratar de inferir el impacto que éstas tuvieron sobre el ecosistema. Además de los diversos

palinomorfos, se utilizó como herramienta de apoyo el análisis de la susceptibilidad magnética.

Cabe destacar la importancia biológica que tiene el desarrollo de las investigaciones de tipo paleoecológico para incrementar el conocimiento científico de diversas zonas de las que vale la pena conocer su historia ambiental. Respecto a las que están mejor conservadas, es preciso generar conocimiento científico que ayude a mantener el ecosistema. Y para los ecosistemas que ya están dañados, conocer su historia puede permitirnos realizar una reconstrucción de los procesos de alteración. Además, resulta fundamental diferenciar las causas de origen natural respecto de las antropogénicas, ya que en la actualidad es sistemática la destrucción de los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres. Aunque esta tesis no pretende resolver tales problemas, se puede señalar que la reconstrucción paleoecológica de la cuenca y el lago de Zirahuén puede generar conocimiento destinado a prevenir que el lago llegue a un estado de deterioro donde se pierda la diversidad de especies y la calidad del agua o para evitar que los ecosistemas terrestres desaparezcan.

Situación nada fácil si analizamos el panorama que enmarca la presente investigación. En cuanto a los ecosistemas terrestres, nuestro país presenta tasas altas de deforestación, de erosión, prácticas agrícolas inadecuadas, sobrepastoreo, pérdida de bosques. El caso de los ríos y lagos de México no es mejor, pues tiene altos índices de contaminación, además de altas tasas de asolvamiento, vertido de desechos tanto domésticos como industriales, desecación, sobreexplotación de organismos, introducción de especies exóticas. Lo anterior ha provocado una reducción en la diversidad de especies acuáticas y la imposibilidad de usar el agua para consumo humano. También han aumentado los problemas de salud y la pérdida parcial o total de los cuerpos de agua (Zambrano, 2003).

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Documentar, con base en el análisis palinológico de sedimentos lacustres, los cambios ambientales naturales o inducidos por las actividades humanas que han ocurrido en la cuenca y el lago de Zirahuén en los últimos 3000 años.

1.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- I. Identificar a distintos niveles taxonómicos los palinomorfos extraídos de la secuencia lacustre.
- II. Determinar las posibles condiciones ecológicas en las que se desarrollaron los organismos encontrados.
- III. Definir los *taxa* indicadores de diferentes condiciones ambientales (sensibles a cambios de temperatura, pH, etc.).
- IV. Documentar, con base en el registro palinológico, el impacto humano en la cuenca de Zirahuén.

2. ANTECEDENTES

2.1. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN PALEOECOLÓGICA

La paleoecología estudia la relación que los organismos fósiles tuvieron entre sí y con su medio ambiente en el pasado. Nos permite conocer la historia del cambio ambiental —desde escalas de meses a millones de años— y de los distintos cambios ecológicos que han ocurrido en el planeta. Es decir, la paleoecología provee de datos que ayudan a “comprender cómo funciona el sistema climático terrestre, cuáles son los mecanismos que disparan cambios y cuáles son los procesos de retroalimentación positiva y negativa” (Lozano, 2004). Esta área de investigación tiene como campo de estudio el análisis de los restos de organismos que se han preservado en los sedimentos y el propio sedimento, pues en éste también quedan registrados los cambios ambientales. Algunos de los indicadores de condiciones específicas del ambiente utilizados en las reconstrucciones ambientales y climáticas de épocas pasadas son los microfósiles, tanto de animales como de plantas, los anillos de los árboles y otros no biológicos como isótopos estables, geoquímica, propiedades magnéticas, etcétera.

Una fuente muy valiosa que nos provee de información paleoclimática y paleoecológica es el estudio de los sedimentos lacustres, pues en éstos se preserva una amplia gama de microfósiles denominados en su conjunto palinomorfos, que incluyen a los granos de polen y de esporas. El término palinomorfo se refiere a los restos de organismos que resisten el tratamiento químico que se utiliza para la extracción del polen y las esporas de los sedimentos lacustres, por ejemplo, restos de organismos de algas, de esporas de hongos y de copépodos. Los conjuntos palinológicos son un indicador de cambio climático ampliamente usado en las investigaciones sobre la historia de la vegetación de los últimos miles de años (Lozano, 2004). Existe dentro de la paleoecología un área que se dedica específicamente al estudio de los sedimentos lacustres; se trata de la paleolimnología, encargada de estudiar la estructura y función de los ecosistemas acuáticos a través del registro de los sedimentos lacustres (Tsugeki, 2003).

Los granos de polen poseen diversas características que facilitan su análisis, por lo que son una herramienta muy eficaz para realizar reconstrucciones paleoecológicas. A continuación se mencionan algunas.

- Estos microfósiles abundan en las secuencias estratigráficas de los sedimentos lacustres y son útiles para registrar los cambios que ocurrieron en la vegetación de manera relativamente continua, abarcando periodos de meses a millones de años.
- Los granos de polen se conservan en buen estado durante miles de años, lo que permite su identificación. Sin embargo, no ocurre lo mismo con los restos de plantas que sólo ocasionalmente se preservan y, si esto ocurre, generalmente están incompletos o en mal estado, por lo que con éstos es más complicado realizar reconstrucciones históricas de la vegetación; además, difícilmente se encuentran secuencias continuas que abarquen periodos amplios de tiempo. En cambio, la resistencia de los granos de polen a la destrucción es una de las mayores en el reino vegetal, dado que soportan la acción de ácidos y pueden resistir temperaturas de hasta de 300 °C (Saenz, 1978). Lo que permite su preservación es la exina que forma la pared del polen, ya que ésta se encuentra constituida por un biopolímero denominado esporopolenina —que se forma por la polimerización oxidativa de gcarotenos y ésteres de carotenos.
- Por sus características taxonómicas, cada especie tiene un fenotipo distinto, así que si están bien conservados se pueden identificar hasta nivel de especie.

2.2. INVESTIGACIONES PALEOECOLÓGICAS EN EL OCCIDENTE DE MÉXICO

Si bien se han realizado numerosas investigaciones paleoecológicas en México, este trabajo se ocupa sólo de aquellas que se han efectuado en la región centro-occidental del país. Asimismo, en esta sección se mencionan algunas investigaciones paleoecológicas realizadas en diversos lagos de Michoacán y Guanajuato.

2.2.1. INVESTIGACIONES EN LA HOYA DE SAN NICOLÁS PARANGUEO

La Hoya de San Nicolás (Fig. 1.1) es un lago que se localiza en Parangueo, Guanajuato. Brown (1984) en Metcalfe *et al.* (1989) analizan el contenido de granos de polen, de carbón y de carbonatos, además la susceptibilidad magnética, y presencia de cationes mayores, de un núcleo que abarca el Holoceno, donde distingue cuatro zonas en las que observa dos fases de disturbio antropogénico. La primera fase de perturbación corresponde al periodo Preclásico (3000 años aP [antes del Presente]-1700 años aP), asociado a la cultura de Chupícuaro. La segunda fase, que además presenta mayor disturbio, corresponde al periodo Posclásico/Hispánico (después del año 1100 aP). En este último periodo se introducen prácticas agrícolas europeas y se incrementa la población (Metcalfe *et al.*, 1989; Metcalfe *et al.*, 2007).

2.2.2. INVESTIGACIONES EN LA PISCINA DE YURIRIA

Es un lago que se localiza al sur de Guanajuato. Street-Perrott *et al.* (1981) en Metcalfe *et al.* (2007) analizan isótopos estables de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, así como el contenido de diatomeas y polen de un núcleo de 4 m y obtienen los siguientes resultados: entre 5200 años aP y 3600 años aP el lago presentó el nivel más bajo. En el año 3100 aP hubo disturbios ocasionados por actividades agrícolas, lo cual coincide con la primera zona de disturbio de la Hoya. La intensidad del disturbio disminuyó y luego aumentó aproximadamente entre 1700-1500 aP. La ausencia de diatomeas en este segmento sugiere que la productividad primaria disminuyó por incremento en los niveles de turbidez del lago. De 1500-900 aP; la cuenca presentó disturbio y el lago eutrofización debido a los valores altos de $\delta^{13}\text{C}$ y de P total, este periodo coincide también con la segunda zona de disturbio de la Hoya. El disturbio es definido en esta investigación como el aumento de herbáceas de cultivo como el maíz y amaranto. Aunque también el registro muestra signos de cambios climáticos de orden natural (Metcalfe, 1989; Metcalfe *et al.*, 2007).

2.2.3. INVESTIGACIONES EN PÁTZCUARO

La cuenca de Pátzcuaro ha sido ampliamente estudiada desde el punto de vista paleoecológico, abarcando la historia de la vegetación, aspectos limnológicos, arqueológicos, volcánicos y tectónicos. A continuación se presenta una síntesis de algunos trabajos realizados en la zona.

El lago de Pátzcuaro se localiza en las tierras altas de Michoacán, zona en la que se desarrolló la cultura purépecha. Durante el periodo 1940-1959 Deevy realiza un estudio palinológico de dos núcleos, pero sin fecharlos (Brown, 1991). Más tarde, junto con Hutchinson y Patrick (1956), analiza los resultados obtenidos de estos núcleos considerando la ficoflora fósil y la correlación de la composición química del lago y su cambio de nivel (Xelhuantzin, 1991). Los datos obtenidos son comparados con los resultados de investigadores que trabajan en la cuenca de México y concluyen que para Pátzcuaro el ambiente en el Holoceno tardío anterior al año 3450 aP fue seco; entre 3400 y 2450 aP fue húmedo con incremento en la vegetación acuática; de 2450 a 1050 aP fue principalmente seco; suponen que el nivel más bajo del lago fue 1700 años aP; del año 1050 al 431 aP el ambiente fue húmedo (Xelhuantzin, 1991).

El análisis de contenido de polen y diatomeas de una secuencia de 15.20 m tomada en 1973 (Watts y Bradbury, 1982) que abarca una edad de 44,000 años aP, indica dos episodios de intensa degradación ambiental: el primero en el Preclásico, probablemente provocado por el cultivo de maíz; y el segundo en el periodo Posclásico tardío-Hispánico, que fue más severo y que está relacionado con la deforestación, el sobrepastoreo y la utilización del arado en el periodo posterior a la conquista; el lago se vuelve eutrófico en este periodo (Metcalf *et al.*, 1989).

Bradbury, (2000) realizó una historia limnológica y polínica del lago de Pátzcuaro que comprende los últimos 48,000 años. Sus resultados indican que entre los 48,000 y 13,000 años el clima en Pátzcuaro fue frío; entre 38,000 y 25,000 años, el lago presentó el periodo más profundo y frío. Los últimos 10,000 años se caracterizan por condiciones más secas, el lago se volvió poco profundo y se establecieron condiciones más eutróficas. La evidencia de agricultura inicia a los 4000 años con la aparición de polen de maíz y Chenoponiidae (Bradbury, 2000).

Para estimar cuantitativamente las variaciones en la erosión del suelo en el centro de México, O'Hara (1993) analizó los sedimentos de un núcleo de Pátzcuaro. Los sedimentos abarcan los últimos 4000 años aP. Identifica tres periodos en los cuales menciona se aceleró la erosión del suelo, estas fases corresponden al periodo Preclásico, Clásico temprano periodo Posclásico. Esta investigadora concluye que los rasgos de erosión fueron tan altos antes como después de la conquista. Una implicación de este resultado es que la erosión del suelo causada por la introducción del arado no fue aparentemente más grave que aquella asociada con los métodos de agricultura tradicional; por lo tanto —afirma— es cuestionable la idea de que retomar los métodos tradicionales implique beneficios ambientales.

Las causas y consecuencias de la degradación de las tierras que rodean al lago de Pátzcuaro fueron estudiadas por Fisher (2005) a través de un proyecto multidisciplinario del paisaje que exploró las relaciones que existe entre las transformaciones sociales y ambientales en el desarrollo de la cultura tarasca. En el periodo Clásico temprano (100 d.C.-500 d.C.) hubo poca población y evidencia de agricultura. En el Posclásico temprano y medio (900-1350 d.C.) el lago presentaba un nivel bajo, además de que durante este periodo se estabilizó la erosión de suelo. El Posclásico tardío (1350-1520 d.C.) es la fase de más intensa ocupación, ocurrieron modificaciones en el paisaje, pero hubo bajo nivel de erosión debido a la intervención humana que estabilizó los ecosistemas modificados. De la Colonia al presente se registra erosión en la cuenca del Pátzcuaro. Este autor propone que la erosión actual que presenta la cuenca tuvo sus orígenes en el periodo hispánico temprano. El autor argumenta que es la creación de grandes poblados lo que ocasiona la degradación de la tierra y no la adopción de la agricultura.

2.2.4. INVESTIGACIONES EN EL LAGO DE ZACAPU

En el proyecto Michoacán I y II sobre arqueología e investigaciones paleoambientales en la cuenca lacustre de Zacapu se analiza, entre otros, la evolución de la vegetación del lago y de los distintos asentamientos humanos en la zona, realizando algunos análisis de diatomeas y de propiedades magnéticas en la región lacustre de Zacapu (Xelhuantzin, 1991; Metcalfe y Harrison, 1984 y Metcalfe *et al.*, 1989).

Xelhuantzi, (1991) señala que según las investigaciones realizadas por Metcalfe, y colaboradores, correspondientes a la década de los ochentas, revelaron que hubo dos transgresiones lacustres, una anterior a 28,000 años aP y la segunda posterior a *ca* 7330 años aP; a partir de Holoceno medio prevalecieron condiciones secas y bajos niveles del lago, en los sedimentos recientes se registraron los efectos del impacto humano en el medio ambiente.

Xelhuantzi (1991) analiza desde el punto de vista palinológico un núcleo de 4.71 m que abarca los últimos 8,100 años aP. Con base en los conjuntos polínicos reconstruye un lago distrófico *ca* 8200 a *ca* 7500 años aP con escasa erosión y ambiente templado- húmedo con bosques densos de pino. De *ca* 7500- *ca* 7400 años aP disminuyó el nivel del lago y el ambiente se mantuvo templado húmedo. Entre *ca* 7400- *ca* 6000 el lago se transformó en ciénega, posiblemente hubo condiciones más secas; y entre *ca*. 6,000 años aP- *ca*. 4,700 años aP, la ciénega alcanzó su nivel más bajo. Entre *ca* 4700 años aP- *ca* 2500 años aP ocurrió un ligero incremento en el nivel del agua y aumentó la precipitación pluvial. Desde *ca* 2500 años aP a la época actual hay evidencias indirectas de presencia humana, ocurrió el reestablecimiento de la antigua ciénega y eventos de intensa erosión.

Ortega *et al.* (2002) realizaron una interpretación de la historia ambiental de los últimos 52,000 años en la cuenca de Zacapu, con base en distintos indicadores paleoambientales de los sedimentos del lago. Los sedimentos mostraron una condición de relativa humedad antes de 35,000 años aP. Hace 28,000 años aP ocurrió una probable interrupción en donde se observa, por última vez, que la profundidad del lago es alta. Después de este tiempo se mantuvo la condición de sequía que persistió durante el Periodo Máximo Glacial y del Holoceno medio hasta 4800 años aP. Los resultados contrastan con previas observaciones sobre las fases de mayor profundidad del lago de Pátzcuaro que indican un incremento en la precipitación entre 34,000 años aP y 21,000 años aP.

Leng (2005) utiliza isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ y de $\delta^{18}\text{O}$ para evaluar la variabilidad del cambio climático en Zacapu. Concluye que los isótopos de carbón indican que hubo fluctuaciones relacionadas con la productividad primaria, posiblemente como resultado de la abundancia de plantas acuáticas que habitaban alrededor de los márgenes del lago. El uso de isótopos de Oxígeno obtenido de las diatomeas fue un indicador más preciso de cambio climático.

2.2.5. INVESTIGACIONES EN EL LAGO DE ZIRAHUÉN

Recientemente la cuenca y el lago de Zirahuén han sido objeto de varios estudios (López, 1982; Moguel, 1987; Antaramián, 1996; Pérez, 1996; Rosas, 1997; Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000 a y b; Bernal-Brooks, *et al.*, 2002; Alvarado, 2003; Davies, 2004; Madrigal, 2004; Tavera y Martínez-Almeida, 2005; Martínez-Almeida, 2005; Davies *et al.*, 2005). Davies *et al.* (2004) analizan los sedimentos de cuatro núcleos que abarcan los últimos 1000 años, en su estudio utilizaron tres indicadores de cambio ambiental: las diatomeas, la susceptibilidad magnética y la concentración de metales pesados. Con base en sus resultados, los autores apuntan que en el lago de Zirahuén hay evidencia de cambios rápidos y recientes en la composición de las diatomeas. Afirman que el lago es altamente sensible a la variación en el cambio de acidez y de entrada de nutrientes y que experimenta disturbios por intensificación de actividades antropogénicas. Entre los años 1100 d.C. a 1550 d.C., los datos indican que la erosión de los suelos estuvo asociada al poblamiento de la cuenca, sin embargo, no hay registro arqueológico que sustente esta hipótesis. Hacia el final del periodo Colonial, entre 1550 y 1750 d.C., el proceso de erosión se estabiliza debido a la dramática disminución de la población indígena, asociada a la conquista española. Esto contribuyó a la recuperación de la cubierta vegetal. En la primera mitad del siglo XVIII dominaron especies del género *Fragilaria* de hábitat circumneutro a ligeramente alcalino; pero en la segunda mitad del mismo siglo, la *Cyclotella stelligera* incrementó su abundancia y es común hasta 1970 d.C. Esta especie responde a los incrementos de fósforo y se ha encontrado en horizontes que muestran erosión (Davies, 2004). Estos cambios en la composición de diatomeas coinciden con los datos de susceptibilidad magnética. Los archivos históricos indican que en el siglo XVIII se incrementó la población y la actividad agrícola. Tales actividades, combinadas con la deforestación que provee carbón para la fundición del cobre, provocó la erosión del suelo e incrementó la entrada de nutrientes al lago (Davies, 2004). El análisis de diatomeas muestra que la depositación de tefras del Jorullo no tuvo un impacto significativo en la flora. En la segunda mitad del siglo XIX cambió drásticamente la composición de diatomeas y aumentó la erosión. Según el análisis de susceptibilidad magnética aumentaron las concentraciones de cobre y plomo, cambios que se asocian con el

establecimiento de la industria del cobre. Desde 1970 d.C. la composición de diatomeas cambió completamente, *Cyclotella ocellata* alcanzó una abundancia relativa del 80%, su presencia es interpretada como disminución de la flora del lago; en esta misma época, *Fragilaria crotonensis* aparece en los sedimentos aunque en proporciones relativamente bajas, sin embargo, esta especie es catalogada como indicadora de eutrofización. El estudio concluye que el lago es muy susceptible a las modificaciones antropogénicas. Por lo que los cambios en el uso de la tierra, la contaminación, y actividades como la agricultura comercial y el turismo alteran la composición original de la flora. Aunque el lago es clasificado como oligo-mesotrófico, observa que la tendencia es hacia la eutrofización, dado que el fósforo y el nitrógeno aumentaron de 36 a 45 % entre 1987 y 1996.

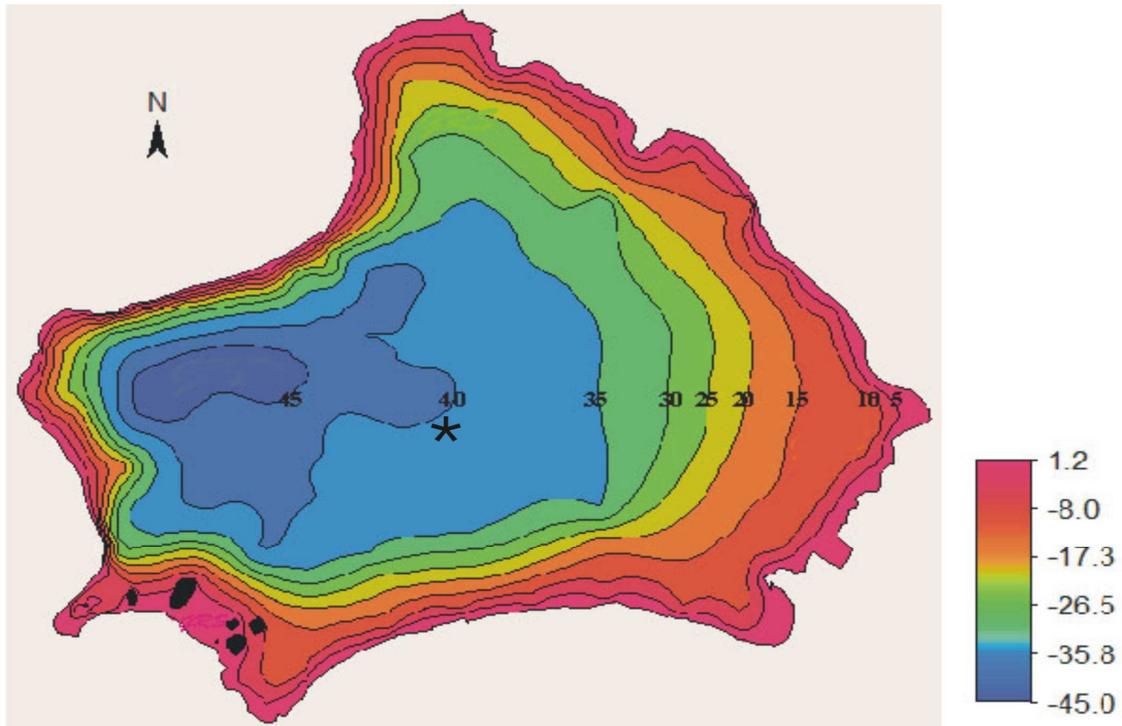
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. LA CUENCA DE ZIRAHUÉN

La cuenca de Zirahuén (Fig. 3.1) se localiza en la zona centro-norte del estado de Michoacán, entre las coordenadas $19^{\circ} 21' 14''$ - $19^{\circ} 29' 32''$ de latitud norte y $101^{\circ} 30' 33''$ - $101^{\circ} 46' 15''$ de longitud oeste (Madrigal, 2001). Forma parte de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y de la Subprovincia Neovolcánica Tarasca. Hacia el norte, la cuenca colinda con la sierra de Santa Clara, la cual separa la cuenca Zirahuén con la de Pátzcuaro; al noreste colinda con el lago de Cuitzeo, al este y sureste con los cerros Zimbicho, Janamo, la Tapada y la Cofradía (Madrigal, 2001). Esta provincia fisiográfica se forma durante el Cenozoico medio y superior, es de origen volcánico y está integrada por sierras de conos cineríticos y llanuras; las elevaciones más importantes de la cuenca son: al norte el cerro San Miguel o Zirahuén (2980 msnm), al noreste se ubica el cerro Burro a 3300 msnm y el cerro Cumburinos, el cual tiene una elevación de 2900 msnm.

3.2. EL LAGO DE ZIRAHUÉN

El lago se localiza en la porción oeste de la cuenca, entre los municipios de Salvador Escalante (Santa Clara del Cobre) y Pátzcuaro. Las coordenadas geográficas son $19^{\circ} 27' 17''$ - $19^{\circ} 25' 06''$ N y $101^{\circ} 45' 35''$ - $101^{\circ} 42' 58''$ O (Madrigal, 2001). El lago abarca aproximadamente el 4% de la superficie total de la cuenca, que corresponde a 9.7 km^2 . La altitud a la que se encuentra el lago es de 2,075 msnm, tiene una longitud máxima de 4.3 km este-oeste y de 3.9 km norte-sur (Alvarado, 2003). La profundidad máxima del lago es de 40 m y el volumen estimado es de $216 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Bernal-Brooks, 2002) (Fig.3.1). El lago originalmente fue exorreico, sin embargo, durante el Cuaternario ocurrió una intensa actividad volcánica con acumulación de lava en el poniente —que es la zona más baja del lago a 2080 msnm— obstruyendo el paso a un antiguo río tributario del Balsas, razón por la cual el lago es actualmente endorreico (Bernal-Brooks y Mac Crimmon, 2000a). Recibe agua del arroyo La Palma y del aporte de las lluvias.



3.1. Mapa batimétrico del lago de Zirahuén. Tomado de Bernal-Brooks y MacCrimmon (2000a)

3.3. ACTIVIDAD VOLCÁNICA RECIENTE

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) cruza transversalmente el país a la altura del paralelo 20°. Está formado por grandes elevaciones y por varias cuencas endorreicas. En la porción occidental del CVTM se localizan las siguientes elevaciones: La Mina, La Taza, Jorullo, Jabalí, Paricutín, El Huanillo, Tancítaro, Volcán de Colima, Nevado de Colima, el Ceboruco y Sanganguey. Las erupciones del volcán Jorullo y el Paricutín han quedado registradas a través de la presencia de cenizas en los sedimentos del lago de Zirahuén. La actividad volcánica del Jorullo (Fig. 3.3) inició el 29 de septiembre de 1759 d.C. y culminó aproximadamente en 1774 d.C. (Newton *et al.*, 2005). La segunda actividad volcánica registrada en los sedimentos del lago de Zirahuén es la del volcán Paricutín, ocurrida entre 1943 d.C. y 1952 d.C.; éste es el volcán más joven de México (Davies *et al.*, 2004).

3.4. SUELOS

Los suelos de la cuenca se formaron a partir de rocas ígneas extrusivas y cenizas volcánicas (Tavera, 2005). Aproximadamente el 75% de los suelos de la cuenca son del tipo andosol ócrico y húmico, estos suelos se localizan en las zonas altas; adicionalmente, hay presencia de suelos tipo leptosol con 16% (antes llamado litosol). Este es un suelo poco profundo y limitado por afloramiento de rocas; el resto de suelos aparecen en proporciones mínimas: el tipo luvisol se encuentra en proporciones menores (1.2%), el feozam (3.4%) y cambisol (0.2%) (Alvarado, 2003). El suelo presenta permeabilidad de tipo medio. Las áreas que presenta mayor erosión se localizan al norte y noreste del lago, el resto circundante presenta una erosión moderada (López, 1982). En un estudio realizado por Antaramián (1996) muestra que la cuenca presenta un riesgo de erosión moderada en el 60.3% de la superficie, mientras que el 29.6% presenta un riesgo ligero. Sólo un 6.4% del total de la cuenca está asociada a riesgo de erosión de alta a muy alta.

Las playas del lago son de arena fina que se continúan bajo el agua. En la zona costera también hay presencia de fangos que permiten el enraizamiento de los tulares.

3.5. CLIMA

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1973), el clima es clasificado como Cw (w₂) (w)_i, templado subhúmedo con lluvias en verano (Alvarado, 2003). La precipitación anual promedio es de +/- 1149 mm y presenta una distribución heterogénea con una estación seca y otra lluviosa. La precipitación se concentra en los meses de junio a octubre (89%), y en invierno la precipitación es menor al 3.9 % anual (Pérez 1996). La temperatura media anual es de 12 a 18 °C. La oscilación anual entre el mes más cálido y el más frío es de +/- 5 °C, sin embargo, los cambios son muy marcados entre el día y la noche con variaciones de 17 °C (Pérez-Cálix, 1996).

3.6. VEGETACIÓN

Los tipos de vegetación presentes en la cuenca del lago de Zirahuén son los siguientes: bosque de *Pinus*, bosque de *Abies*, bosque de *Quercus*, bosque mesófilo de montaña, pastizal, vegetación de galería, vegetación acuática y subacuática (Pérez-Cáliz, 1996).

3.6.1. BOSQUE DE *PINUS*

Los pinos se pueden encontrar, por lo general, en climas de templados a fríos y semi-húmedos; muestran preferencia por áreas cubiertas de rocas ígneas. Éstas, en condiciones semihúmedas, producen suelos ácidos con un pH entre 5 y 7 (Rzedowski, 1998).

Esta comunidad se localiza al oriente de la cuenca en los cerros El Fríjol, Aguacate, Cantón y Morillo y en la parte alta del cerro Zirahuén; los pinos se localizan a una altitud de 2,100 m a 3,000 m. La especie más ampliamente distribuida es *Pinus pseudostrobus*. Esta especie forma en los cerros Zirahuén y El Fríjol masas casi puras, a veces se acompañan de *Quercus laurina*, *Q. rugosa* y *Arbutus xalapensis*.¹ Representa el 18.0% del total de la vegetación de la cuenca (Pérez-Cáliz, 1996).

3.6.2. BOSQUE DE *ABIES*

Los Bosques de *Abies* se localizan en cañadas o laderas húmedas. La precipitación media anual es superior a los 1000 mm; la temperatura media anual es de 7 a 15 °C. Se desarrolla en suelos ligeramente ácidos (pH 5-7) con abundante materia orgánica y, en general, profundos y húmedos (Rzedowski, 1998).

Este tipo de vegetación se localiza en la porción oriental de la cuenca. La encontramos en los cerros La Tapada, Janamo, y Burro (Fig. 3.4), y en altitudes de entre 2800 y 3000 msnm. La especie que habita en esta zona es la *Abies religiosa*, la cual

¹ En este trabajo sólo se mencionan algunas de las especies que se encuentran en los distintos tipos de vegetación de la cuenca de Zirahuén. Para conocer con más detalle de la vegetación de la zona se puede consultar el trabajo de Pérez-Calix, 1996.

representa el 1.3% del total de la vegetación en la cuenca. Otras especies arbóreas registradas en el bosque son *Pinus montezumae*, *P. pseudostrobus*, *Quercus laurina* y *Q. rugosa*. Además desarrolla un estrato arbóreo inferior compuesto por *Alnus jorullensis*, *Arbutus xalapensis*, *Salix paradoxa*, *Clethra mexicana*, *Buddleia cordata* y *Garrya laurifolia*. En el estrato arbustivo se encuentran especies como *Ceanothus caeruleus*, *Cestrum anagyris*, *C. nitidum*, *Cirsium subcoriaceum*, *Solanum brachystachys*. En el estrato herbáceo hay presencia de *Acaena elongata*, *Adiantum andicola*, *Asplenium monanthes* y *Dahlia scapigera*. El estrato rasante está dominado por musgos, además se observan basidiomicetos, líquenes, algunas orquídeas y bromelias (Rzedowski, 1998).



Fig. 3.2. Fotografía del bosque de *Abies religiosa* localizado en Cerro Burro, dentro de la cuenca de Zirahuén.

3.6.3. BOSQUE DE *QUERCUS*

El bosque de *Quercus* es característico de las zonas montañosas de México, pero podemos encontrar encinares en climas cálidos y hasta en zonas de matorral. El clima para este tipo de vegetación es Cw con precipitación de 350 mm a 2000 mm y la temperatura media anual es de 10 °C a 26 °C. Crecen sobre rocas ígneas, sedimentarias

y metamórficas; el tipo de suelo que necesita es somero, ligeramente ácido con un pH de 5.5 a 6.5, con abundante hojarasca y materia orgánica (Rzedowski, 1998).

Junto con el bosque de *Pinus* los encinares son la vegetación dominante en el paisaje de Zirahuén. Se localiza en la zona occidental de la cuenca, en áreas de topografía accidentada a una altitud de 2080 a 2500 m representan el 19% de la superficie total de la cuenca de Zirahuén (Pérez-Cálix, 1996). Otras especies arbóreas presentes en el bosque de *Quercus* son *Quercus crassipes*, *Q. castanea*, *Q. dysophylla*, *Q. laurina*, *Q. obtusa*, *Q. rugosa*, *Alnus acuminata ssp. arguta*, *Pinus leiophylla*, *Prunus serotina ssp. capulli*, *Oreopanax xalapensis* y *Tilia mexicana*. El estrato arbóreo inferior presenta a *Cornus excelsa*, *Clethra mexicana*, *Arbutus xalapensis*. Los arbustos presentes en este tipo de vegetación son: *Acacia angustissima*, *Berberis moranensis*, *Calea integrifolia*: mientras que en el estrato herbáceo se encuentran *Adiantum andicola*, *Begonia balmisiana* y *Carex polystachya* (Pérez-Cálix, 1996).

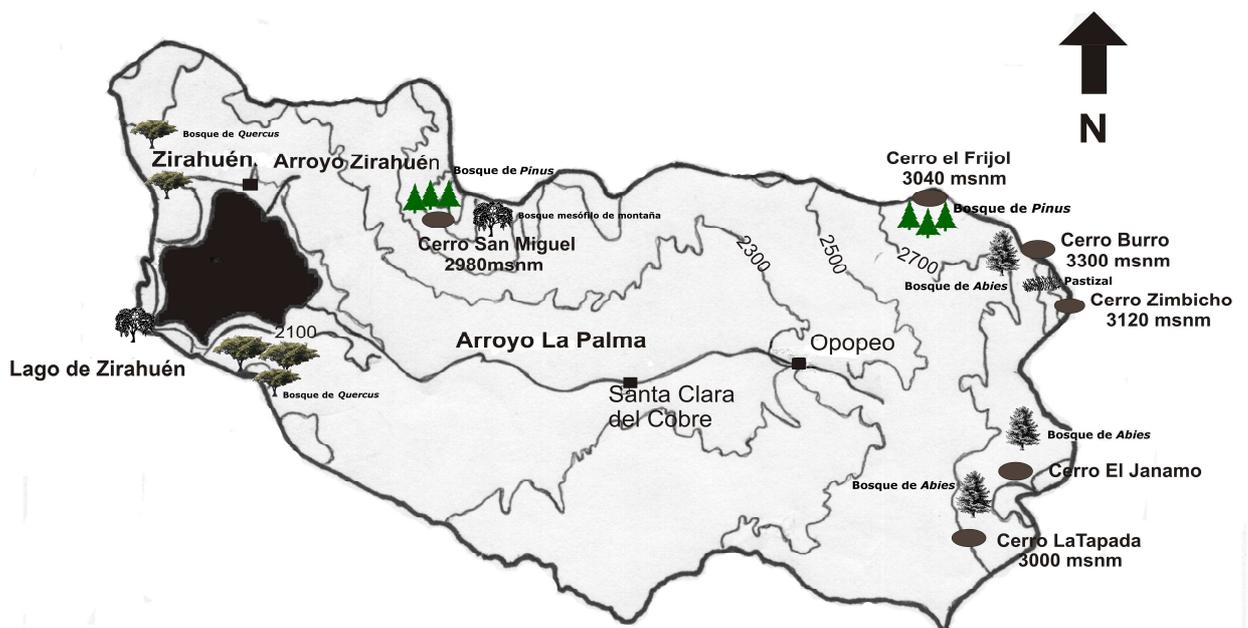
3.6.4. BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA

Este tipo de vegetación se presenta en cañadas con altitud máxima de 2700 msnm. Requiere de suelos con abundante materia orgánica y ácidos con pH de 4-5. Se localiza en climas húmedos con precipitación pluvial entre los 1500 y los 3000 mm, generalmente presenta elevada humedad atmosférica y neblina. La temperatura puede variar de 12 °C a 23 °C (Rzedowski, 1998).

En la cuenca de Zirahuén este tipo de vegetación ocupa un área muy reducida, la cual es de aproximadamente 0.5%. En la localidad denominada Rincón de Agua Verde se encuentra mejor representada, así como en algunas cañadas del cerro de Zirahuén. Las especies arbóreas características de ésta comunidad son *Alnus acuminata ssp. arguta*, *Carpinus caroliniana*, *Dendropanax arboreus*, *Pinus pseudostrobus*, *Quercus castanea*, *Q. obtusata*, *Q. rugosa*, *Salix bonplandiana*, *Clethra hartwegii*, *Cornus disciflora*, *Meliosma dentata* y *Tilia mexicana*. El estrato arbustivo está compuesto de *Senecio spp.*, *Solanum lanceolatum*, *Lippia umbellata*. En el estrato herbáceo se reportan especies como *Amicia zygozomeris*, *Begonia balmisiana*, *Calea integrifolia* y *Priva aspera* (Pérez-Cálix, 1996).

3.6.5. PASTIZAL

El pastizal es un tipo de vegetación muy reducido en la cuenca. Aquí se observan dos tipos de pastizales fisonómicamente diferentes. Uno de ellos es el zacatonal formado por macollos de *Muhlenbergia gigantea* de 1m de altura que se desarrollan en la parte alta de cerro Burro a 3,300 msnm. Otras gramíneas asociadas son *Agrostis toluensis*, *Bromus carinatus* y *Festuca amplissima*. (Pérez-Cálix 1996). El otro tipo de pastizal con gramíneas perennes de poca altura (40-60 cm) se desarrolla a las orillas de la lagunita de San Gregorio a 2700 msnm, algunas especies comunes son: *Aegopongo cenchroides*, *Agrostis schaffneri*, *Bromus dolichocarpus*, *Vulpia myuros*, *Setaria geniculata*; y herbáceas como *Cyperus* spp., *Lotus repens*, *Aster subulatus* y *Cerastium nutans*.



3.3. Mapa de localización de la vegetación de la cuenca de Zirahuén. Aquí se muestran los cerros más importantes de la región.

3.7. LIMNOLOGÍA

Con base en investigaciones limnológicas, el lago de Zirahuén se clasifica como oligotrófico (López, 1982; Bernal-Brooks y Mac Crimmon, 2002; Martínez-Almeida, 2005). Presenta baja salinidad siendo los iones dominantes sodio² y bicarbonatos; la alcalinidad está determinada por los bicarbonatos, presenta dureza de tipo medio debido a su concentración de calcio y magnesio. Las concentraciones de fósforo total varían entre 0.00-0.03 mg l⁻¹ y de clorofila *a* entre 0.23 - 3.98 µg l⁻¹, el oxígeno disuelto reportado en la columna de agua es de 5.1 +/- 2.9 mg l⁻¹. El pH es circumneutral (7.2 +/- 0.3) y la conductividad es baja (132 +/- 6 µS cm⁻¹) (Martínez-Almeida, 2005). La temperatura promedio es de 18.4°C +/- 1.9°C (Bernal-Brooks, 1998). La penetración de luz tiene una profundidad promedio de 12.5 +/- 3.0 m; la alta transparencia podría estar vinculada a varios factores, como son la baja biomasa de fitoplancton y los bajos niveles de detritos orgánicos e inorgánicos (Bernal-Brooks, 2000a).

El lago de Zirahuén se clasifica como cuerpo de agua cálido monomictico,³ su única etapa de circulación es corta y ocurre durante la temporada de sequía (diciembre-enero) que coincide con el invierno hemisférico. Presenta un patrón de estratificación que inicia en febrero y termina en noviembre, y se divide en tres etapas, una estratificación temprana de febrero-marzo, una plena de abril a septiembre y una tardía de octubre a noviembre (Martínez-Almeida, 2005).

La presencia de algas desmidiáceas es un fenómeno poco común para los lagos mexicanos. Esto se explica por las características físico-químicas antes mencionadas para el lago de Zirahuén. Martínez-Almeida (2005) propone adicionalmente que la atelomixis⁴ parcial es una fuerza que podría dirigir la selección de estas algas, las cuales son dependientes de la re-suspensión en la columna de agua a escala diaria.

² Pese a los relativamente altos valores de Na, el lago de Zirahuén es un lago de baja mineralización. La alta concentración de sodio puede atribuirse en primer lugar a la erosión de minerales de origen volcánico, a su solubilidad y, en menor proporción, a la contaminación doméstica (López, 1982).

³ Este tipo de lagos se caracteriza porque la temperatura no desciende por debajo de 4°C, la circulación ocurre durante el invierno y la estratificación ocurre en los meses cálidos (Wetzel, 2001 tomado de Martínez-Almeida, 2005).

⁴ La atelomixis es un proceso de erosión de la capa superior de la termoclina que permite una mayor difusión de nutrientes hacia la capa fótica (Vilaclara, com. pers.).



3.4. Fotografía del lago de Zirahuén. Se observa el crecimiento de vegetación subacuática y al fondo a la derecha se observa el Cerro San Miguel o Zirahuén.

3.7.1. VEGETACIÓN ACUÁTICA

La vegetación acuática de Zirahuén ha sido estudiada por Madrigal (2004). En esta investigación identifica 35 familias, 55 géneros y 93 especies de las cuales 27 son clasificadas como tolerantes, 42 como subacuáticas y 24 como acuáticas estrictas.

La vegetación se encuentra distribuida a lo largo de la línea de costa, presentándose a partir de las zonas de inundación temporal y en algunos casos hasta los 12 m de profundidad. De acuerdo con su forma de vida fueron agrupadas por Madrigal (2004) en: hidrófitas enraizadas emergentes, hidrófitas enraizadas sumergidas, hidrófitas enraizadas de hojas flotantes e hidrófilas libremente sumergidas. Las hidrófitas enraizadas emergentes presentan una distribución restringida a la zona sur y oriente del lago. También las encontramos como manchones a lo largo de la franja litoral: los elementos principales de estas comunidades son *Typha latifolia*, *T. domingensis* y *Schoenoplectus californicus*, conocidos como tulares. Las hidrófitas enraizadas sumergidas se encuentran bien representadas a lo largo de la zona litoral y las especies

que se encuentran en el lago de Zirahuén son *Potamogeton illinoensis*, *Najas guadalupensis* y *Ludwigia palustris*. En el caso de las hidrófilas enraizadas de hojas flotantes se encuentran bien representadas en las áreas más protegidas de la zona sur y sureste del lago. Las especies encontradas fueron *Nymphaea odorata* y *Nymphoides fallax*. Las hidrófilas libremente sumergidas solamente están representadas por la especie *Utricularia aff. Macrorhiza*, se localiza en la zona sur del lago, lugar poco profundo y protegido que se encuentra cercano al embarcadero de Agua Verde.

3.7.2. FITOPLANCTON

Según el estudio realizado por Alvarado (2003), en el lago de Zirahuén existen 227 especies de algas, 17 variedades y cuatro formas distribuidas en ocho divisiones. Las clorofíceas (algas verdes) dominan en la columna de agua, mientras que las diatomeas —*Cyclotella ocellata* y *Fragilaria crotonensis*— son las más abundantes en la interfase agua-sedimento, seguidas por las desmidiáceas y, en muy baja cantidad, las cianobacterias. Su distribución depende de la época del año.

El resultado del análisis realizado por Alvarado (2003) indica que ocurren cambios en la composición y distribución de la flora acuática a lo largo del día, lo que sugiere que el lago de Zirahuén no es un cuerpo homogéneo. Las clorofíceas están representadas en Zirahuén por cuatro géneros del orden Zygnematales, que son *Closterium*, *Cosmarium*, *Staurastrum* y *Staurodesmus*. Las diatomeas más abundantes son: *Fragilaria crotonensis*, *Cyclotella ocellata*, *Nitzschia amphibia* y *Navicula cryptocephala*. Entre las cianobacterias (algas verde-azules) reportan a *Snowella septentrionalis*, *Chroococcus dispersus*, *C. minimus*. De la división Cryptophyta identifica las siguientes especies, *Cryptomonas ovata* y *C. tenuis*. De la división Euglenophyta identifica *Trachelomonas hispida* y *Euglena sanguinea*, indicadoras de cambios físico-químicos en el lago,⁵ pues incrementan su número en zonas donde hay aporte de materia orgánica y nutrientes (nitratos y fosfatos). Los nutrientes provienen del arroyo La Palma, así como de descargas de aguas negras de los poblados aledaños.

⁵ Estas especies han sido reportadas en otros lagos del mundo que presentan evidencias de contaminación (Alvarado, 2003).

En un estudio posterior, Martínez-Almeida (2005) reporta un total de 59 *taxa* pertenecientes a 7 clases y 37 géneros. El grupo Chlorophyta es el mejor representado, con 59.9 %, en particular dos clases: Chlorophyceae y Conjugaphyceae con 31.6% y 28.3%, respectivamente. Del grupo Bacillariophyceae (diatomeas) se identifican 11 *taxa* infragenéricos (18.3%). Los otros grupos muestran baja riqueza específica. La mayoría de especies con densidades significativas presentan un patrón bimodal con picos de abundancia en febrero y octubre. Dentro del grupo Conjugaphyceae, se identificaron 16 taxones de desmidiáceas, pertenecientes a 5 géneros: *Closterium* (3), *Cosmarium* (2), *Spondylosium* (1), *Staurastrum* (8) y *Stauroidesmus* (2). Las especies de algas desmidiáceas que Martínez-Almeida (2005) identifica son los siguientes: *Closterium aciculare*, *Closterium moniliferum*, *Closterium tortum*, *Cosmarium bioculatum*, *C. punctulatum*, *Spondylosium planum*, *Staurastrum anatinum*, *S. furcigerum*, *S. leptocladum*, *S. leptocladum* var. *elegans*, *S. limneticum* var. *cornutum*, *S. longiradiatum*, *S. muticum*, *S. smithii*, *Stauroidesmus cuspidatus*, *S. sublatus*. Las especies de *Staurastrum* que destacan por su contribución individual son: *Staurastrum anatinum*, *S. leptocladum* y *S. smithii*. Las Bacillariophyceae son las más abundantes, en específico la diatomea *Cyclotella ocellata* fue la más representada y marcó la dinámica del grupo taxonómico. Del grupo de las clorofíceas se identificaron 19 especies, la más representativa fue *Elakatothrix* sp. Finalmente, dentro de las cianobacterias, la especie más abundante fue *Snowella septentrionalis* (Martínez-Almeida, 2005).

3.7.3. ZOOPLANCTON

Para Zirahuén se conocen 16 especies de zooplancton, siendo los rotíferos los más abundantes con 9 especies, cuya especie representativa es *Ascomorpha ovalis*. El grupo de los cladóceros es el que le sigue en abundancia con cinco especies: *Bosmina longirostris*, *Ceriodaphnia lacustris*, *Daphnia ambigua*, *D. laevis*, *Diaphanosoma brachyurum*. Los organismos dentro de este último grupo son planctónicos y fitófagos, su abundancia puede reflejar las condiciones tróficas del cuerpo de agua y son sensibles a procesos de acidificación y eutrofización. La subclase copepoda presenta sólo dos especies: *Diaptomus albuquerquensis* y *Mesocyclops edax* (Rosas, 1997).

La comunidad del bentos, representada principalmente por oligoquetos de la familia Tubificidae, están localizados principalmente en la costa oriental del lago; también hay presencia de algunas larvas de insectos de la familia Chironomidae y moluscos del género *Musculium* (Madrigal, 2001).

4. ARQUEOLOGÍA

Los seres humanos han modificado a la naturaleza como ninguna otra especie. Tales modificaciones han producido dos tipos de resultados en el ambiente. Uno positivo que ocurre al favorecer un aumento en la diversidad al utilizar las plantas y producir nuevas variedades; también cuando adapta especies a distintas zonas o cuando dispersa semillas, etc. Lo anterior significa un mayor conocimiento de la naturaleza, por lo que al conocer mejor su medio, el hombre puede adaptarse y mejorar sus condiciones de vida. Sin embargo, a lo largo de la historia humana ha habido también resultados negativos, los cuales traen consigo la destrucción de hábitats, la alteración de ecosistemas completos y la contaminación, entre otros males. El aprovechamiento de los recursos naturales no ha sido homogéneo a través del tiempo, sino que ha ido variando según el desarrollo tecnológico de los pueblos. Por lo que resulta de vital importancia investigar la influencia que el hombre ha tenido en determinado ecosistema y comprender las formas en las que éste se relaciona con su entorno.

4.1. PERIODOS ARQUEOLÓGICOS DE LA REGIÓN TARASCA

En este apartado se realiza una breve reseña del surgimiento y establecimiento de la cultura tarasca; más adelante se mencionan los cambios ecológicos ocurridos en la zona, y también se describe la situación actual de la cuenca de Zirahuén. Las evidencias arqueológicas en Michoacán indican que el desarrollo cultural inició alrededor del año 1500 a.C., lo cual corresponde al Formativo temprano (1500-500 a.C.) y está representado por el sitio arqueológico El Opeño, localizado al noroeste de Michoacán. De este lugar sólo se conocen sus tumbas y los objetos colocados en ellas (Williams, 2007). El periodo Formativo⁶ tardío (*ca.* 500 a.C.-1 d.C.) está representado por la cultura de Chupícuaro, localizada en Guanajuato, en la cuenca Sur-Oriental del río Lerma. En este sitio se han encontrado restos de aldeas agrícolas en las cuales se cultivaba maíz y que, al parecer, tenían una fuerte tradición en la producción de cerámica. Además, la caza era una actividad importante. Presentaban escasa

⁶ En las figuras y en la discusión del presente trabajo utilizaremos el término Preclásico para hablar del Formativo temprano y tardío.

complejidad sociopolítica y predominaban asentamientos de pequeños caseríos o *loci* de una familia. Las casas eran de bajareque con suelos de arcilla y había drenajes de piedra. Se han encontrado algunas armas y evidencia de “cráneos trofeo” lo que hace suponer que era una zona de conflicto (Williams, 2007).

El periodo Clásico (*ca.* 1-1000 d.C.) está representado por los sitios conocidos como Las Lomas, en la ciénega de Zacapu. Esta zona fue ocupada durante los ochos primeros siglos de nuestra era, después fueron abandonados. La abundancia de vestigios funerarios hace pensar que esta zona tenía una ocupación especializada para estas actividades y para otras de tipo ritual. Presentaban una práctica funeraria desconocida para occidente (cremación). Los sistemas de construcción dan prueba de la movilización de una mano de obra importante y competente. Algunas zonas de importancia fueron Loma Alta, Loma Santa María que mantuvo interacción con la cuenca de México (Williams 2007). El Epiclásico (*ca.* 900 d.C.) está caracterizado por el surgimiento de nuevos centros políticos, migración y cambios dramáticos en el tamaño de la población, las rutas de comercio sufren modificaciones (Williams, 2007).

En las investigaciones realizadas por Pollard (1995) en (Williams, 1996) se muestra que durante el Posclásico (*ca.* 1000-1521 d.C.) ocurrió una transformación importante entre las poblaciones de las tierras altas del centro Michoacán. Por primera vez, comunidades previamente autónomas se unificaron políticamente, y la cuenca del lago de Pátzcuaro se transformó en el núcleo geográfico de un estado expansionista (Williams, 1996). Entre los años 1000 y 1200 d.C. se encontró evidencia de la coexistencia de diez comunidades autónomas en la cuenca de Pátzcuaro, cada una estaba organizada internamente de manera estratificada y era gobernada por una elite local. Estas sociedades variaban en el tamaño de la población, del territorio, así como en su acceso a las tierras irrigables y en el nivel económico y político. En este periodo ocurrió un cambio climático que ocasionó la subida de nivel del lago por lo que se redujeron las tierras de cultivo. Esto motivo a guerreros de Pátzcuaro y Tzintzuntzan a dirigir a sus habitantes a la conquista de poblados vecinos.

En el Posclásico medio (1150-1350 d.C.), aproximadamente en el año 1250 d.C., el rey Taríacuri estableció su capital en Pátzcuaro. Esto le permitió controlar los recursos del lago; nombró a dos de sus sobrinos, Hiripan y Tangáxoan, señores de Ihuatzio y Tzintzuntzan respectivamente. Entre 1250-1350 d.C. este linaje encabezado por Taríacuri dominó la interacción política y por esas fechas tuvo aliados en Urichu,

Erongarícuaro y Pechátaro, por lo que empezó a dirigir campañas militares. Como Pátzcuaro y Tzintzuntzan dependían de la tierra irrigable, las conquistas se extendieron al suroeste y luego siguieron hacia la cuenca de Cuitzeo. En esta época la expansión militar tarasca consistió en saqueos.

Para el Posclásico tardío (1350-1525d.C.), bajo el liderazgo de Hiripan y luego de Tangáxoan, se dieron los primeros pasos hacia la institucionalización de las conquistas militares y la construcción de un imperio tributario. En las décadas siguientes el patrón de expansión, forjado en la conquista e incorporación de territorios, fue aplicado a otras zonas. El primer blanco de expansión fue la sierra tarasca seguida por la cuenca del Balsas. La expansión tarasca se extendió hacia los cuatro puntos cardinales y, al parecer, alcanzó su máxima extensión en 1470 d.C. En la década siguiente los Tarascos comenzaron a encarar la presión militar de los aztecas (Perlstein, 2004).

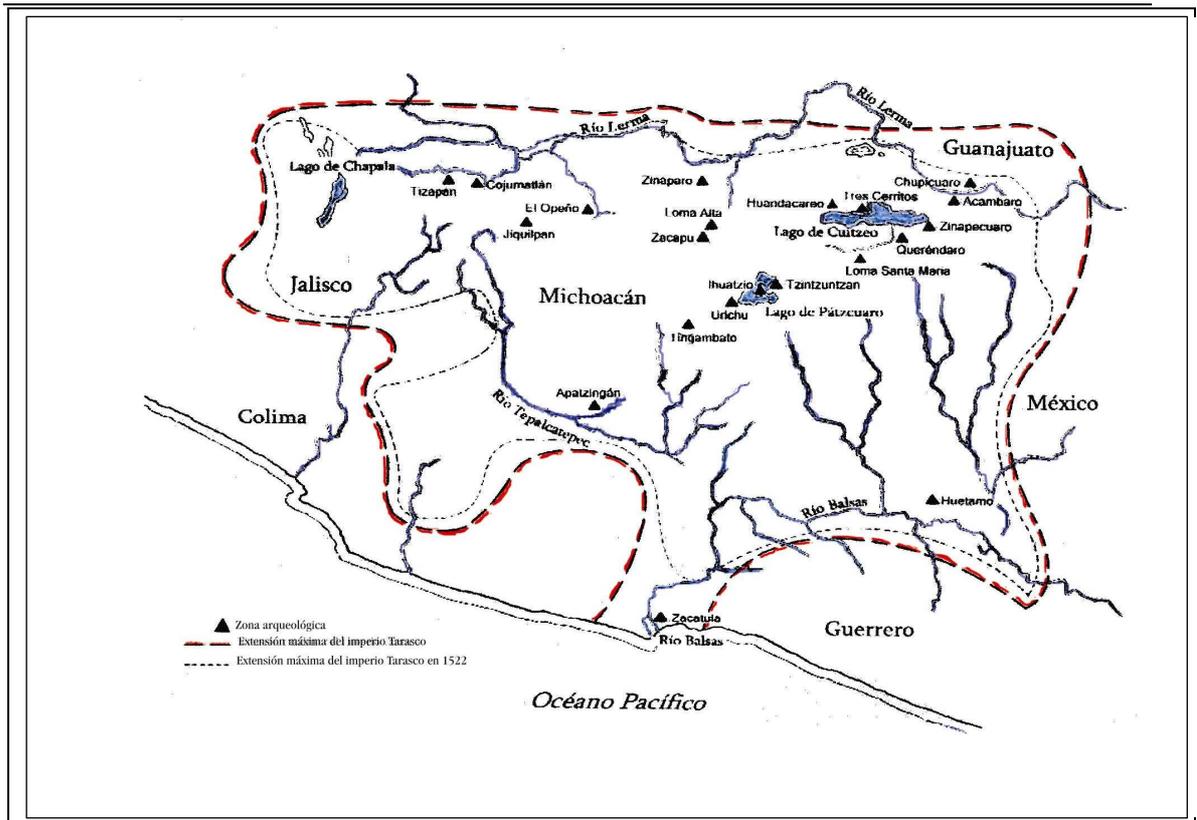
La cultura tarasca o purépecha⁷ se convirtió, a principios de siglo XVI —periodo Posclásico Tardío—, en una potencia dentro del mundo mesoamericano. El imperio tarasco era el segundo más grande de Mesoamérica (Perlstein, 2004). Su poder se extendía sobre la mayor parte del actual estado de Michoacán y algunas áreas adyacentes y fue capaz de desafiar la hegemonía mexicana y detener su expansión hacia el occidente. Poseía un centro ceremonial de cierta magnitud cuyos edificios principales mostraban la forma arquitectónica distintiva de los tarascos, conocida como yácata (CONACULTA-INAH, 2000). Sin embargo, la arquitectura tarasca nunca alcanzó la magnificencia y sofisticación lograda por otros grupos. No se desarrolló ningún centro urbano medianamente grande en Michoacán y no se encuentra en la cultura tarasca, una tradición urbana documentable (Beltrán, 1986).

Para el año 1522 d.C., el rey tarasco gobernaba un reino que cubría una superficie de más de 75,000 km² (Fig. 4.2). Una estimación realizada por Borah y Cook con documentos del siglo XVI calcula que la ciudad de Pátzcuaro llegó a albergar 1,300,000 habitantes (Perlstein, 2004). Sin embargo, los cálculos realizados por Beltrán indican que la población máxima que habitó la cuenca de Pátzcuaro fue 750,000

⁷ Se desconoce el origen del gentilicio “tarasco”. Una de las interpretaciones que se propone es que esta palabra es una deformación hecha por los españoles a la palabra *Tarascue* que significa “yerno o nuera”. Posteriormente, el término más común para designar a los indígenas de Michoacán fue purépecha, que significa hombre común, trabajador, parte del pueblo. Existe polémica acerca de cuál de estos dos términos es el correcto, el más utilizado en la literatura científica es tarasco (Beltrán, 1993).

habitantes. Este autor afirma que “las fuentes que examina describen una población sumamente dispersa y de carácter eminentemente rural adscrita al nivel local de dominio de varios linajes corporados, a su vez sujetos a un Estado central” (Beltrán, 1986).

La conquista española ocurrida en 1522 d.C. marcaría el fin de su hegemonía, aunque los descendientes de los tarascos aún habitan en la región y conservan prácticas y costumbres con raíces prehispánicas.



4.1. Mapa de la extensión del imperio tarasco. (Tomado de Perlstein, 2004).

4.2. HISTORIA DE LAS MODIFICACIONES ECOLÓGICAS EN LA REGIÓN TARASCA

En la época prehispánica los indígenas hacían uso múltiple de los ecosistemas; de los lagos y ciénegas obtenían proteínas de origen animal, del bosque se extraían materiales de construcción, energéticos, frutos silvestres y carne fresca (Vargas *et al.*, 2000), además cultivaban la tierra.⁸

La conquista produjo un cambio importante en la manera de utilizar los recursos naturales. Los españoles modificaron el patrón de producción, obtuvieron el usufructo de los terrenos más adecuados para la agricultura extensiva, desecaron una gran cantidad de ciénegas e introdujeron la ganadería extensiva. Además, destruyeron canales, terrazas y otras obras hidráulicas en las que se basaba la agricultura indígena, provocando la pérdida de la infraestructura agrícola indígena, también modificaron los asentamientos humanos (Vargas *et al.*, 2000). Otro acontecimiento clave en este periodo es el colapso de la población indígena a causa de la introducción de enfermedades de origen Europeo que no se conocían en México y, según Acuña *et al.* (2002), debido a un mal de origen local conocido con el nombre de cocoliztli (peste). Tras la drástica reducción de la población indígena, también disminuyó el cultivo. En esta época, la pesca dejó de practicarse en muchas ciénegas que fueron desecadas para utilizarse con fines agrícolas y de pastoreo. También aumentó la explotación forestal por expansión de la minería (Vargas *et al.*, 2000). Unos años después de ocurrida la independencia se instituyó la colonización de terrenos que no tuvieran propiedad, se cedieron grandes extensiones a los empresarios criollos y europeos. La población comenzó a recuperarse por lo que hubo una fuerza de trabajo abundante y barata. Ello permitió la expansión de la agricultura y de la economía en general (Vargas *et al.*, 2000).

Otro problema que comenzó a manifestarse en el siglo XIX fue la sobreexplotación intensiva de los bosques de Michoacán por las concesiones que se hicieron de los montes a compañías nacionales o extranjeras asociadas a la construcción del ferrocarril. Lo anterior ocurrió debido a la aplicación de la ley de desamortización de manos muertas que fue aplicada en el Estado (Cerón, 2002). Hacia finales del siglo

⁸ De hecho, la evidencia más antigua que hay sobre el origen de la agricultura en México, particularmente para el maíz y la calabaza, está registrada a comienzos del Holoceno, entre 10,000 aP y 5000 años aP en la cuenca hidrográfica del Balsas al occidente del país (Piperno, 2007) y en San Andrés, en Tabasco, se tiene registro del inicio del cultivo de maíz desde hace 7000 años aP (Pohl, 2007).

XIX, en el periodo conocido como Porfiriismo, se dio una incipiente industrialización en algunos centros bien localizados. Los cambios generados por la industria en el medio ambiente fueron muy pequeños comparados con los provocados por la expansión agrícola (Vargas *et al.*, 2000).

En México, el siglo XX comienza con la Revolución Mexicana, una lucha encabezada por los campesinos para recuperar las tierras, antes comunales, que se encontraban en manos de caciques. Tras concluir el conflicto, comenzó una etapa de reparto de tierras. En esta época aumentaron las tierras cultivadas en 160% y las irrigadas en 500%. Entre 1934 y 1939 el presidente Lázaro Cárdenas decretó una veda⁹ y estableció como inexistentes las concesiones anteriores hechas a las compañías explotadoras de bosques. Ello con el objetivo de fomentar la recuperación, conservación y reforestación de los bosques afectados por la explotación indiscriminada (Vargas *et al.*, 2000).

4.3. ESTADO ACTUAL DE LOS RECURSOS NATURALES EN LA CUENCA DE ZIRAHUÉN

La principal actividad productiva en la zona es la agricultura de subsistencia, la cual ocupa una superficie del 41% del total de la cuenca, principalmente. Se cultiva maíz, papa, trigo, fríjol, cebada, pera, membrillo, capulín, nuez, lima y manzana. Aunque poco a poco se fomenta el cultivo comercial, basado en el monocultivo y, con ello, el uso de agroquímicos —provocando graves e irreparables problemas de deterioro ecológico (Olea, 1997). El 6.8% corresponde al uso pecuario, el tipo de ganadería es extensiva de tipo familiar, principalmente se cría ganado bovino; también se realiza de manera semiextensiva o con pastoreo en terrenos de descanso, apostaderos y zonas de desmonte. El bosque ocupa el 51% de la superficie total de la cuenca (Rosas, 1997). En este lugar se realiza un aprovechamiento forestal, existen dos tipos de aprovechamiento, uno comercial, donde se emplean aserraderos y maquinaria, y el otro de tipo doméstico, dirigido a la actividad artesanal. En especial, el aprovechamiento forestal comercial ha deteriorado gravemente los ecosistemas de la zona. Las especies aprovechables son pino, encino y oyamel. Ello debido a que altera las condiciones originales de la cuenca,

⁹

Ocurre una segunda veda de 1951-1973 que prohíbe la tala, pero se puede coleccionar resina.

incrementando la erosión, la pérdida de suelo fértil y el arrastre de minerales que, además de sedimentar la cuenca, también cambian la composición físico-química del lago, lo que origina problemas de erosión, entre otros aspectos. La pérdida de bosque no sólo ocurre por la tala legal; actualmente, con el auge de la comercialización del aguacate se están deforestando ilegalmente zonas boscosas para convertirlas en huertas de frutales.

En la cuenca de Zirahuén existen dos poblados que son los más importantes en virtud de su tamaño, uno es Santa Clara de Cobre y el otro Opopeo. Ambos se encuentran a las márgenes del arroyo La Palma que desemboca sus aguas en el lago de Zirahuén. A orillas del lago se localiza la población de Zirahuén, una comunidad mucho más pequeña que las antes mencionadas (Davies, 2005). Un problema que tienen las comunidades que habitan la cuenca de Zirahuén es la falta de drenaje, esto ocasiona que los desechos sean vertidos directamente al arroyo o al lago (Bernal-Brooks, 2000a). El aumento de la población provoca el incremento de los desechos, lo que puede ocasionar la contaminación del lago. Ésta y otras causas contribuyen al deterioro del mismo.

El uso de agroquímicos en la agricultura es otro factor que deteriora la calidad del agua del lago, pues la entrada de nutrientes como fósforo o nitrógeno altera la composición de la flora y fauna acuática. A todos estos factores que ponen en riesgo la calidad del agua del lago, hay que sumar un problema reciente: el crecimiento del turismo. En 2006 los habitantes de Zirahuén denunciaron el megaproyecto turístico promovido por Guillermo Arreola, el cual incluye un campo de golf, más de 2 mil cabañas, embarcaderos de lanchas de motor y motocicletas acuáticas (Muñoz, 2004). Si este proyecto se lleva adelante, se corre el riesgo de alterar el equilibrio ecológico del lago.

5. METODOLOGÍA

5.1. MÉTODO DE CAMPO

A través del convenio de colaboración entre la Universidad de Minnesota, la Universidad de Edimburgo y los Institutos de Geología y Geofísica de la UNAM, en el verano de 2003 se perforó un núcleo bajo el tirante de agua de 36.5 m en la zona central del lago (19° 26' 17.6" N, 101° 44' 23.50"), misma que corresponde a la zona más profunda del lago de Zirahuén. A este núcleo se le nombro MOLE-ZIR03-2A-1K. Para ello se utilizó un nucleador de gravedad tipo Kullenberg con pistón perteneciente al Limnological Research Center (LRC) de la Universidad de Minnesota. El nucleador consta de un tubo de acero de 8 cm de diámetro y de 10 m de largo en cuyo interior se coloca un tubo de PVC. Los sedimentos lacustres están contenidos en el tubo de PVC que se extrae después de que se ha realizado la perforación. El tubo se corta en secciones de 1.5 m con el fin de trasladadas al laboratorio para su posterior estudio. Para su conservación es necesario mantener el núcleo en refrigeración. La documentación del núcleo se llevó a cabo en el LRC de la Universidad de Minnesota. Ésta incluyó la medición de susceptibilidad magnética, fotografía del núcleo y la descripción litológica

5.2. MÉTODO DE LABORATORIO

Las secciones del núcleo MOLE-ZIR03-2A-1K del lago de Zirahuén se transportaron al LRC para su descripción inicial. Durante dicha descripción se utilizó un Multisensor de núcleos Geotek, el cual mide varios parámetros (densidad, susceptibilidad magnética y resistividad eléctrica), sin que sea necesario abrir y perturbar los sedimentos del núcleo. Posteriormente, los núcleos se abrieron en dos mitades iguales de las cuales una quedó como testigo y, se tomaron fotografías con un escáner digital de la otra, procediendo a la descripción litológica de los núcleos con base en Schnurrenberg (2003).

Para este estudio se analizó un total de 46 muestras de los primeros 145 cm del núcleo MOLE-ZIR03-2A-1K del lago de Zirahuén. En este caso se tomaron muestras cada 5 cm para realizar el análisis de palinomorfos.

A continuación se describen cada uno de los pasos que se siguieron para procesar, fechar y describir los sedimentos tomados del núcleo anterior. Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Palinología del Instituto de Geología.

La extracción de palinomorfos se realizó utilizando la siguiente técnica:

1) Primero se colocó 1 cm³ de sedimento en un tubo de ensaye, agregando una pastilla marcadora de *Lycopodium clavatum* para hacer el cálculo de concentración polínica.

2) Se agregó HCL al 10% para eliminar carbonatos y se colocó en baño maría durante 10 minutos.

3) Posteriormente se agregó agua destilada para neutralizar los sedimentos, se agitó y centrifugó 4 minutos a 1200 rpm y después se decantó el sobrenadante.

4) Una vez neutralizada la muestra se agregó KOH al 10% y se colocó a baño maría durante 10 minutos, enseguida se centrifugó y se decantó una vez.

5) Nuevamente se vertió HCL al 10 %, se agitó y se dejó reposar hasta que éste se asentó. Enseguida se agitó, centrifugó y decantó hasta dejarlo neutro.

6) Una vez que se neutralizó la muestra, se tamizó con malla del no.80 en un crisol. El contenido del crisol se vertió en un tubo de ensaye, el cual se centrifugó y luego se decantó.

7) Concentrada la muestra, se agregó HF al 48% y se dejó reposar durante 24 horas para eliminar los silicatos presentes en la muestra. Pasado este tiempo, se centrifugó la muestra y se decantó. Enseguida se le agregó a la muestra HCL-1N. Se puso a baño maría durante 10 min.

8) Ya neutralizada la muestra se decantó y se le agregaron 2 gotas de safranina durante 1 min. Lo siguiente fue ponerle agua, agitarla, volver a centrifugarla y finalmente decantarla.

9) El montaje del residuo consistió en colocar en un porta-objetos con una micropipeta el residuo y la gelatina glicerinada. Se elaboraron 4 preparaciones por cada una de las 46 muestras de sedimento.

10) El sobrante de la muestra se colocó en un frasco, se etiquetó y se le agregó un conservador.

5.3. MÉTODO DE GABINETE

5.3.1. CONTEO E IDENTIFICACIÓN DE PALINOMORFOS

Para el análisis palinológico de las muestras de los primeros 145 cm del núcleo MOLE-ZIR03-2A-1K, se utilizó un microscopio Olympus DP11 BH-2 con cámara digital integrada, con ocular de 10X y los objetivos de 10X, 20X, 40X y 100X. Las observaciones fueron hechas en campo claro y en contraste de fases. En primer lugar, se comenzaron a identificar los granos de polen y luego se contaron hasta llegar a un número de 400 por cada una de las 46 muestras (Berghlund, 1986). Se describieron y registraron las características morfológicas para permitir su identificación y distinguir los distintos niveles taxonómicos. También se contaron las esporas marcadoras de las 46 muestras. Simultáneamente se llevó a cabo el conteo de los restantes palinomorfos como partículas de carbón, algas, testáceos, copépodos y esporas de hongos; el conteo se detuvo cuando se llegó a los 400 granos de polen y esporas que no fueran marcadoras, independientemente de las cantidades contadas para el resto de palinomorfos. Para la identificación a nivel de especie se utilizaron las siguientes claves de identificación: Kapp, 1969; Ortega, 1984; Hooghiemstra, 1984; Palacios, 1991; Mc Adrews, 1973; Rubin, 1991, y Tryon, 1991.

Para la identificación se tomaron microfotografías con una cámara digital integrada al microscopio. La luz que se utilizó fue de campo claro y se emplearon los aumentos de 100X para fotografiar los cladóceros, los granos de *Abies* y las algas; los aumentos de 200X, 400X, y 1000X fueron utilizados para el resto de palinomorfos. Se realizó un registro fotográfico de los *taxa* encontrados en el núcleo de Zirahuén.

5.3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Para realizar el análisis estadístico de los datos se utilizó el programa Tilia 2.1 (Grimm, 1992). Este programa permitió, en primer lugar, hacer sumas de los elementos

regionales (árboles, hierbas y pteridofitas) y locales (vegetación acuática, algas, hongos, testáceos, cladóceros, etc.), además permite analizar los porcentajes, tasa de acumulación polínica y análisis de concentración de sedimentos. Los porcentajes permiten comparar los cambios ocurridos a lo largo del tiempo para un determinado palinomorfo, pero también sirve para identificar las variaciones de los distintos palinomorfos contenidos al interior de ese estrato. Los porcentajes fueron útiles, ya que permitieron observar la composición de la vegetación. Para complementar los datos que se obtuvieron de los porcentajes se utilizó la tasa de acumulación polínica, la cual indicó la cantidad de granos de polen por unidad de área de sedimentación en un determinado tiempo. Otro fue el cálculo de concentración polínica. Éste se hace en referencia al conteo de esporas marcadoras que se registraron en cada muestra y estima la cantidad de palinomorfos por unidad de volumen expresada como granos de polen por cm^3 . Este cálculo ofrece datos paleoecológicos sobre los cambios de redepositación y sedimentación en la cuenca.

Un paso más en el análisis consistió en la determinación de zonas para la interpretación de las variaciones de la vegetación a lo largo de tiempo. Este procedimiento consistió en utilizar el subprograma CONISS incluido en Tilia 2.1 que sirvió para reconocer los cambios en la vegetación pese a que no representan grupos ecológicos pero se ubicaron en un mismo periodo (Grimm, 1992). La interpretación de estos datos se facilita si se utilizan diagramas, por lo que con el programa Tilia pudimos observar gráficas que nos facilitaron la presentación y la interpretación de los resultados obtenidos (Birks, 1980).

5.3.3. CRONOLOGÍA

Con el propósito de establecer un marco temporal para la secuencia de sedimentos lacustres analizada, se seleccionaron tres muestras a distintas profundidades para llevar a cabo el fechamiento de radiocarbono. La M. en C. Susana Sosa obtuvo concentrados de polen de acuerdo con la técnica propuesta por Brown (1992) para las tres muestras.

El extracto fue enviado al laboratorio Beta Analytic Radiocarbon Dating para su fechamiento por medio de ^{14}C AMS (*Accelerator Mass Spectrometer*).

Además, para el análisis de resultados se tomaron los datos dos cenizas volcánicas identificadas en la secuencia por las doctoras Isabel Israde y Sarah Davies; la primera ceniza se localiza a la profundidad de 12 cm y que corresponde a la erupción del volcán Parícutín, en el año 1943, la segunda ceniza se localiza a los 45 cm y proviene de la erupción del volcán El Jorullo ocurrida en 1759.

6. RESULTADOS

6.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SEDIMENTOS

En la secuencia estudiada pudo distinguirse, en los primeros 30 cm, un limo de color pardo verde con un alto contenido de arenas y muy bajo contenido de diatomeas. De 30 a 145 cm los sedimentos son limos-arcillosos y de color pardo rojizo, con esporádicos horizontes de diatomeas en su parte media y alto contenido de éstas hacia su base (últimos 4 cm). A las profundidades de 12 y 43cm se presentan fragmentos volcániclasticos (tefras) que corresponden a la ceniza del Parícutín y El Jorullo, respectivamente.

6.2. CRONOLOGÍA

Con base en los resultados del análisis de extractos de polen obtenidos por la maestra Susana Sosa para fechar la sección del núcleo MOLE-ZIR03-1K y con la utilización de cenizas identificadas por las doctoras Isabel Israde y Sara Davies se realizó el siguiente modelo.

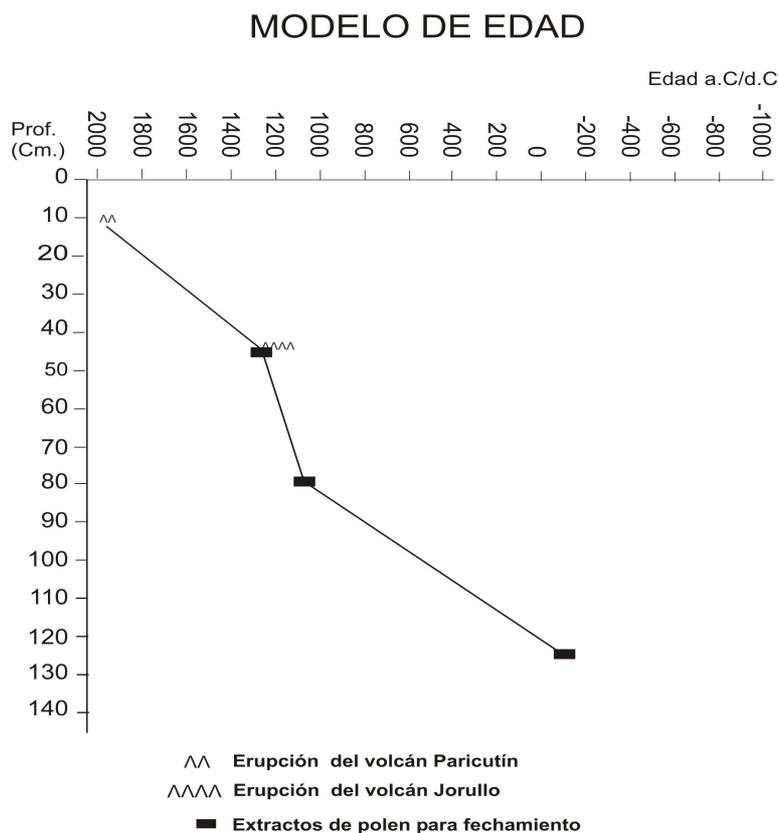


Fig.6.1. Modelo de edad. Con el fechamiento de extractos de polen y las cenizas volcánicas obtenidas se obtuvo la edad del tramo del núcleo MOLE-ZIR03-1K, extrapolando los resultados obtenidos para estas muestras.

6.3. ANÁLISIS PALINOLÓGICO

Se identificó 23 tipos polínicos a diferentes niveles taxonómicos. Los tipos polínicos pertenecientes a las comunidades terrestres fueron agrupados según su forma de vida: árboles y hierbas. Los árboles están representados por 10 *taxa*: *Pinus* sp., *Abies* sp., *Quercus* sp., *Alnus* sp., Cupressaceae, *Salix* sp., *Prunus* sp., *Bursera* sp., *Acer* sp. y Myrtaceae (Fig. 6.2). Las herbáceas están representadas por 11 *taxa*: Leguminosae, Asteraceae, Asteraceae con cava, Rosaceae, Poaceae, Chenopodiaceae-Amaranthaceae (Cheno-Am.), Labiatae, Cruciferae, Rutaceae, Onagraceae, *Zanthoxylum* (Fig. 6.2). Se

identificó a *Polypodium* y el resto de esporas de pteridofitas fueron agrupadas en una sola categoría debido a que las había en cantidades mínimas. Además se contabilizó 12 tipos de palinomorfos que no fueron identificados. En segundo lugar, se identificaron grupos que habitaron el lago, las plantas acuáticas fueron representadas por 3 *taxa* : *Thalictrum sp.*, *Cyperaceae* e *Isöetes aff. echinospora*. El fitoplancton presentó los siguientes *taxa* : *Botryococcus*, *Staurastrum leptocladum* y *Coelastrum sp.* y se agrupó en una sola categoría diversas algas que ocasionalmente aparecieron (Fig. 6.3). Además, se cuantificó la presencia de partículas de carbón y la presencia de fungoesporas, sin identificarlas a un mayor nivel taxonómico. Del grupo de cladóceros se identificaron restos de caparzones pertenecientes a la especie *Bosmina longirostris*.

6.3.1. DIAGRAMAS DE POLEN

Los resultados del análisis palinológico se presentan en diagramas regional y local (Fig. 6.2 y 6.3) En un tercer diagrama se resumen los datos palinológicos incluyendo el porcentaje de árboles, hierbas, acuáticas, el número de algas, esporas de hongos (Fig. 6.4); la concentración de partículas de carbón y de polen total así como el cálculo de acumulación polínica (no. de granos /cm² /año) y los valores de susceptibilidad magnética (Fig. 6.4)

6.3.2. ZONACIÓN

Los diagramas de polen son usualmente divididos en zonas para facilitar su descripción, análisis e interpretación (Haslett, 2002). Con base en el análisis de agrupación estatigráficamente delimitado (CONISS) se definieron dos zonas polínicas de la sección del núcleo, que son: subzona ZIR03-I-A y ZIR03-II-A.

La primera zona es la ZIR03-I y corresponde a la profundidad de 145 cm a 87 cm (1040 a.C.- 890 d.C.). Esta zona está dividida en dos subzonas que a continuación se describen:

SUBZONA ZIR03-I-A (De los 145 cm-110 cm, corresponden a una edad de -1040 a.C. a 290 d.C.).

Esta subzona presenta dentro de los elementos de la vegetación regional como *taxa* más abundante a *Pinus* sp. (Fig. 6.2). Su presencia a lo largo de esta sección es estable; aparece en casi todos los estratos en un 65%, con una tendencia a disminuir que culmina a los 110 cm, mostrando un valor de 45 % —que corresponde al año 290 d.C.— éste representa la transición a la siguiente subzona. Otro *taxa* abundante fue *Quercus* sp., el cual presenta variaciones en sus porcentajes entre el 10% y 25%, el porcentaje más alto corresponde al mismo estrato en el que *Pinus* sp. disminuye. Polen de otros árboles presentes en esta subzona son: *Abies* sp.¹ que se mantiene a lo largo de toda la subzona aunque con valores relativamente bajos, *Alnus* sp. se mantiene a lo largo de toda la subzona con un valor de 5 % aproximadamente; *Salix* sp. tiene registro hasta el año 805 a.C y está presente a lo largo de la subzona. En cuanto a las herbáceas, observamos que el grupo más representativo es Poaceae con valores entre el 5% y 10%, le sigue Chen-Am, con una presencia de aproximadamente 5% que se mantiene a la largo de la subzona. Leguminosae aparece al inicio del núcleo entre los 145-135 cm que corresponden a los años 1040 a.C. a 570 a.C. con un 5%. Otros *taxa* que aparecen en esta proporción o menor son: Asteraceae, Asteraceae con cava, Cruciferae y Labiatae, y los tipos polínicos 11 y 12 de los *taxa* no identificados son estos dos los que presentan valores más altos que van del 5 al 1 %. El conjunto de esporas de helechos presentan porcentajes entre el 5-1%. *Polypodium* apareció con valores de aproximadamente 1 a 2%. La concentración de granos de polen fue de 6800 siendo este el valor más bajo a 27,000 granos / cm³/ en cuanto a la tasa de acumulación observamos que fue de 27,800 a 109,000 granos /cm² /año (Fig 6.4). En esta zona la concentración de las partículas de carbón fluctúan y presentan valores bajos, de 1 a 5 partículas /cm²/ año (Fig.6.4). Durante el análisis se detectaron los siguientes elementos de vegetación acuática: Cyperaceae se presenta en toda la subzona y alcanza los valores más altos hacia los 140 cm de profundidad (805 a.C.), *Isöetes aff. echinospora* aparece en el año 30 d.C. (a 120 cm de profundidad) alcanza el valor más alto en este mismo año. El

¹ Debido a que este género, así como *Salix* sp. presentan valores muy bajos, en la gráfica aparecen magnificados los valores para poder realizar una apreciación de cómo variaron a la largo del tiempo. En los resultados se da una explicación cualitativa de su aumento o disminución debido a que no se puede expresar en términos numéricos, pero sí se puede comparar su cambio a través del tiempo.

fitoplancton aparece poco representado, *Botryococcus* sp. es constante a lo largo de toda la subzona, tiene una presencia del 5%; además, en una sola categoría se registran algunas algas que aparecen de manera esporádica. En esta subzona encontramos vestigio de exuvias de zooplancton de la especie *Bosmina longirostris*; su concentración varía de 10 a 15 cabezas /cm³. También hay presencia de fungoesporas, las cuales se ubican en una sola categoría, los valores que presentan son mucho más altos que otros grupos, ya que van de 100 esporas /cm³ en el año 30 d.C., a 200 esporas /cm³ en distintos momentos.

SUBZONA ZIR03-I-B (Abarca de 105 cm - 87 cm y corresponde a las edades de 440 d.C. a 890 d. C.)

En esta subzona el porcentaje de polen de *Pinus* sp. se incrementa con respecto al porcentaje de la subzona anterior (Fig. 6.2). Los valores varían de 60% al inicio de la subzona hasta alcanzar el valor más alto de la secuencia (80%) a los 92 cm, que corresponde a una edad de 760 d.C. *Quercus* sp. presenta porcentaje menor con respecto a la subzona anterior, los valores varían entre 5% y 20%. La presencia de *Abies* sp. se mantiene aunque en muy baja proporción; *Alnus* sp. presenta una disminución en sus valores alrededor del año 815 d.C.; *Salix* sp. fluctúa a lo largo de la zona con valores menores a la zona anterior desaparece en el año 680 d.C., comparativamente, disminuye en relación con la zona anterior. Las herbáceas presentes son las mismas que en la subzona anterior; la familia Poaceae se mantuvo entre los valores de 5 y 10%, la presencia de la familia Asteraceae sin cava siguió presente, pero disminuye hasta desaparecer; en el caso del tipo Asteraceae con cava tuvo una ligera recuperación hacia el final de esta subzona. Labiatae disminuye y Cheno-Am se mantiene hasta el año 760 d.C. (92cm) para casi desaparecer hacia el final de esta subzona. Un dato interesante a observar es que *Polypodium* no está presente en esta subzona. La concentración polínica (Fig 6.4) en esta subzona se eleva considerablemente con respecto a la subzona anterior; encontramos valores que van de 8200 granos /cm³ a 71,1000 granos de polen /cm³ que corresponden a los más elevados de la secuencia. La acumulación polínica tuvo valores del 33,600 a 290 000 granos /cm²/año. En esta zona la concentración de las partículas de carbón fluctúa y

presenta valores bajos de 5 a 15 partículas /cm²/año, pero para el periodo de 550 d.C. a 685 d.C. no hay registro de partículas de carbón (Fig. 6.4).

La presencia de Cyperaceae e *Isöetes aff. echinospora* (Fig. 6.3) se mantiene aunque la primera presenta una ligera disminución hacia el final de la subzona. *Botryococcus* sp. aumenta aproximadamente en el año 945 d.C. (a los 85 cm de profundidad) y luego disminuye. Al final de esta subzona comienzan a aparecer algunos ejemplares de *Staurastrum leptocladum*. La presencia de *Bosmina longirostris* tiene fluctuaciones a lo largo de toda la subzona; presentó valores entre el 10 y 15 cabezas /cm³. La cantidad de fungoesporas varía de 250 a 100 esporas /cm³ hacia los estratos más recientes.

La segunda zona es **ZIR03-II** e inicia a los 87 cm y finaliza a los 5 cm (890 d.C. a 1985 d.C.) (Fig. 6.2). Se divide en dos subzonas, a continuación se describen las características sobresalientes:

SUBZONA ZIR03-II-A. (De 85 cm a 57 cm; 940 d. C a 1580 d.C.)

En este periodo se observa en los diagramas polínicos (Fig 6.3) variaciones importantes en los valores de los *taxa*. En el caso de *Pinus* sp. sus valores disminuyen del 65% a partir del año 1380 d.C. a 30% en el año 1425 d.C.; *Abies* sp. fluctúa, pero los valores son más bajos que en la zona anterior. Al inicio de la subzona *Alnus* sp. presenta valores cercanos al 20% pero se reduce igual que *Pinus* sp. hacia el final. En cambio, *Quercus* sp. presenta un valor alto (25%) aunque disminuye ligeramente hacia el final de esta subzona llegando a un 15%. *Salix* sp. presenta valores más semejantes a la subzona anterior aunque luego desaparece en el periodo de 1270 d.C. a 1380 d.C. Dentro del conjunto de hierbas, las Poaceae se caracterizan por tener los valores más altos de toda la secuencia. El valor más alto corresponde a 67 cm (ca.1400 d.C.) con 20%. El grupo de Asteraceae y Leguminosae presentan valores cercanos al 10%; en el caso de las Asteraceae con cava, Rosaceae y Chenopodiaceae presentan valores cercanos al 5%, aunque ésta última aumenta hacia el final de la subzona. Labiales se mantiene con valores similares a las otras zonas. *Polypodium* se presenta a lo largo de toda la subzona aunque con valores muy bajos (Fig. 6.2). La concentración presenta los valores más altos al inicio de la subzona, muestra una concentración máxima de 66, 700 de granos de polen /cm³ y el valor más bajo que se

localizó hacia el final de esta subzona fue de 7600 granos de polen /cm³. La acumulación polínica presentó los valores más altos a la mitad de la zona con 620,000 granos /cm²/año y al final con 110,000 granos /cm²/año. Los restos de carbón disminuyen drásticamente en comparación con la zona anterior y se mantienen estables a lo largo de toda la subzona con concentraciones de 1 a 5 partículas /cm²/año.

Para el conjunto de elementos acuáticos Cyperaceae mantiene valores bajos (Fig. 6.3.), pero a partir de 1350 d.C. alcanza un valor aproximado de 5% y se mantiene con este valor durante toda esta subzona. *Isöetes aff. echinospora* presenta el valor más alto (9%) de todo el núcleo en el año 1380 d.C. (70 cm). La desmidiácea *Staurastrum leptocladum* aparece por primera vez al inicio de la subzona y presenta el valor más alto de toda la subzona, con 60 organismos/cm³ esto el año 1270 d.C.; sin embargo, desaparece a partir de 1350 d.C. *Botryococcus* sp. aumenta con respecto a las subzonas anteriores y presenta el valor más alto en el año 1075 d.C. (80 cm) con 10%. En cuanto al cladócero *Bosmina longirostris*, observamos que durante todo el periodo hay variaciones, al inicio de la subzona -en el año 945 d.C.- no hay registro de este organismo, en el siguiente estrato alcanza el valor de 15 cabezas /cm³, y en 1455 d.C. alcanza el valor más alto cercano a 20 cabezas/cm³. En esta subzona hay presencia de testáceos. La concentración de fungoesporas presenta los valores más altos cercanos a las 2000 esporas /cm³.

SUBZONA ZIR03-II- B

Representa la sección más reciente del núcleo abarca de 55 cm a 5 cm y corresponde a los años 1610 d.C.-1985 d.C. (Fig. 6.3.).

En esta zona observamos una rápida recuperación de *Pinus* sp., comienza con un valor del 65% hacia 1610 d.C. y alcanza un valor del 85% entre 1730 d.C. y 1815 d.C.; posteriormente decrece a 70% y se mantiene con este valor hasta 1980 d.C. aproximadamente. *Abies* sp. presenta los valores más bajos de todo el núcleo y además no aparece en todos los estratos. En el caso de *Alnus* sp. se mantiene a lo largo de toda la subzona con un valor de 5%. Los valores de *Quercus* sp. oscilan en porcentajes entre 10 y 18%. *Salix* sp. disminuye en comparación con las otras subzonas. Hacia la mitad de la subzona hay evidencia de *Acer* sp., y en el último estrato aparecen granos de polen de

Bursera. En el caso de las herbáceas observamos que en Poaceae el valor más alto lo encontramos al inicio de esta zona con 10%; sin embargo, en el resto de estratos los porcentajes varían de 2 al 7%. Las leguminosas muestran presencia a partir del año 1830 d.C. (32 cm de profundidad) con valores bajos menores al 5%. Los dos grupos de Asteraceae aumentaron alrededor de 1830 d.C., mientras que las Chen-Am se mantienen con valores similares a lo largo de toda la subzona. Las labiadas presentan valores bajos menores del 5%. Los valores de las pteridofitas son bajos entre 5 y 1% y *Polypodium* aparece con valores aproximadamente del 1%, además no aparecen en todos los estratos. La concentración polínica varía de 5366 a 59,327 granos de polen /cm³ y la acumulación tiene un rango de 78,259 a 865,197 granos /cm²/año. El carbón aparece esporádicamente en 1685 d.C. y en 1900 d.C. alcanza el valor de 10%. Los elementos de la vegetación acuática como Cyperaceae no presentan variaciones (Fig. 6.4.). En *Isöetes aff. echinospora* la subzona inicia con valores de aproximadamente 5% en 1580 d.C. y mantiene valores hasta 1830 d.C. Después de esta fecha disminuye y presenta valores de 1% y en algunos estratos desaparece. En cambio, dentro del conjunto de fitoplancton se registran los cambios más importantes: *Staurastrum leptocladum* reaparece en el año 1730 d.C. (a los 47 cm), detectándose una tendencia hacia el aumento en su concentración pues alcanza valores ligeramente superiores a 100 organismos /cm³ alrededor del año 1815 d.C. y aunque presenta fluctuaciones llega a 250 organismos /cm³ en 1970 d.C. y se mantiene hasta la época actual. Hacia 1960 d.C. (10 cm.) se registró *Coelastrum* sp. con un valor de 2500 organismos / cm³, disminuyendo en 1970 d.C. *Botryococcus* sp. presenta las concentraciones más bajas —de 5% al 1%— de todo el núcleo y finalmente desaparecen del registro en el último estrato. *Bosmina longirostris* se mantiene a lo largo de toda la zona presentando valores entre 5 cabezas /cm³ y 10 cabezas /cm³, sin embargo estos representan los valores más bajos de todo el núcleo. Las fungoesporas presentan valores de concentración cercano a 300 esporas /cm³.

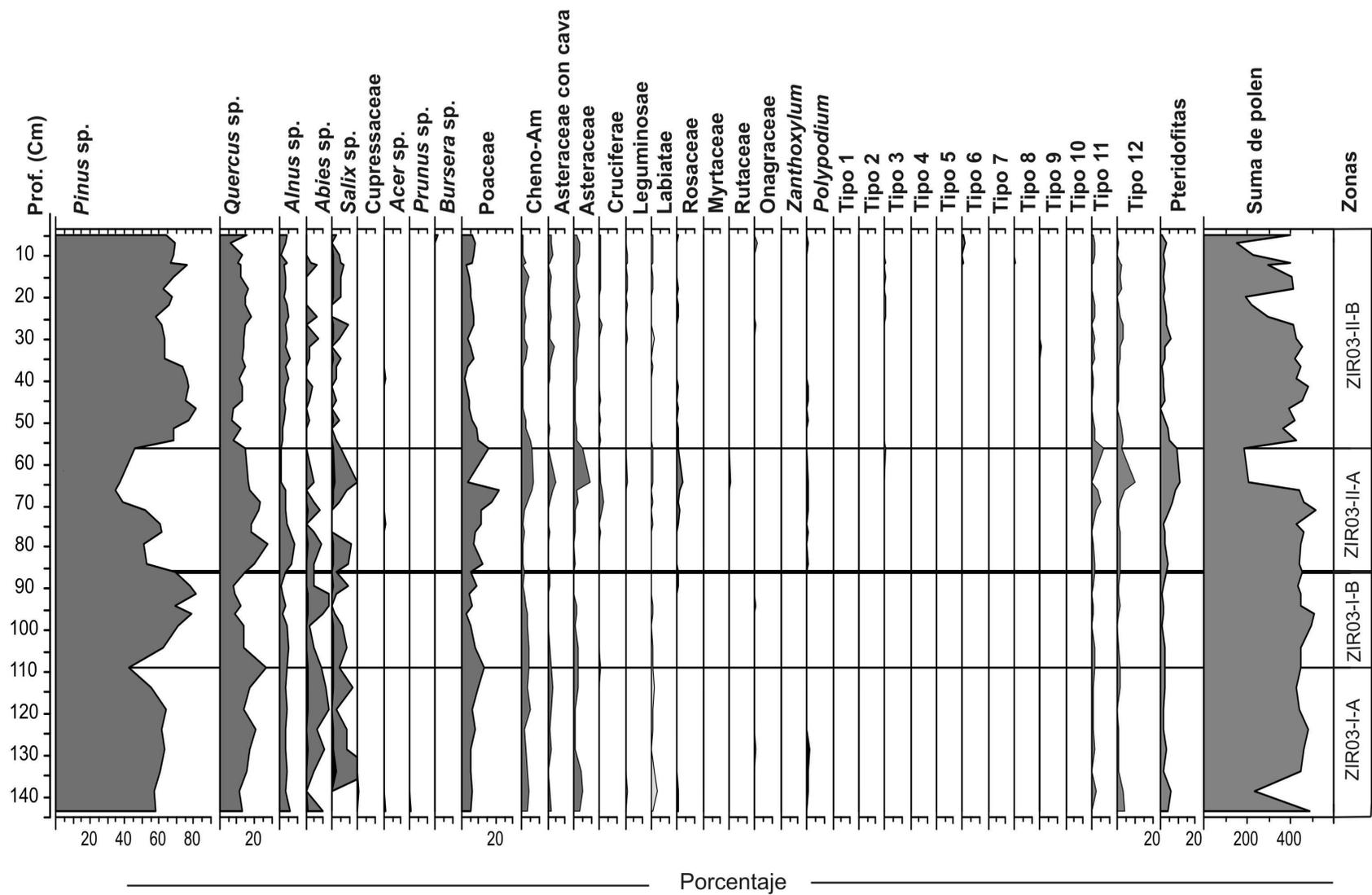


Figura 6.2. En este diagrama se muestran los porcentajes de los *taxa* de la vegetación regional: árboles, hierbas y pteridofitas. A la derecha se muestran las zonas y subzonas, a la izquierda la profundidad.

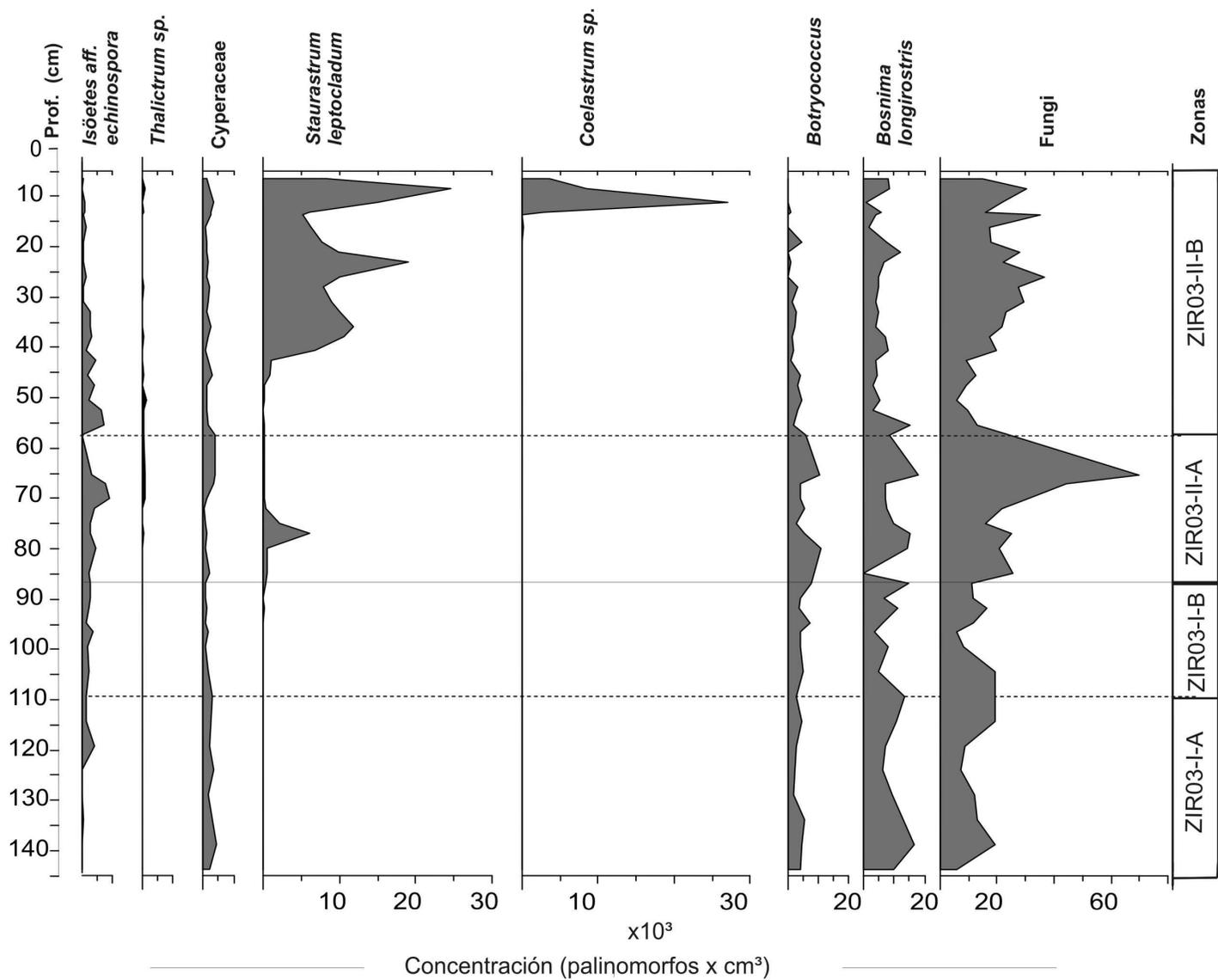


Figura 6.3. Diagrama palinológico local donde se observa la concentración de polen de plantas acuáticas, fitoplancton, zooplancton, esporas de hongos.

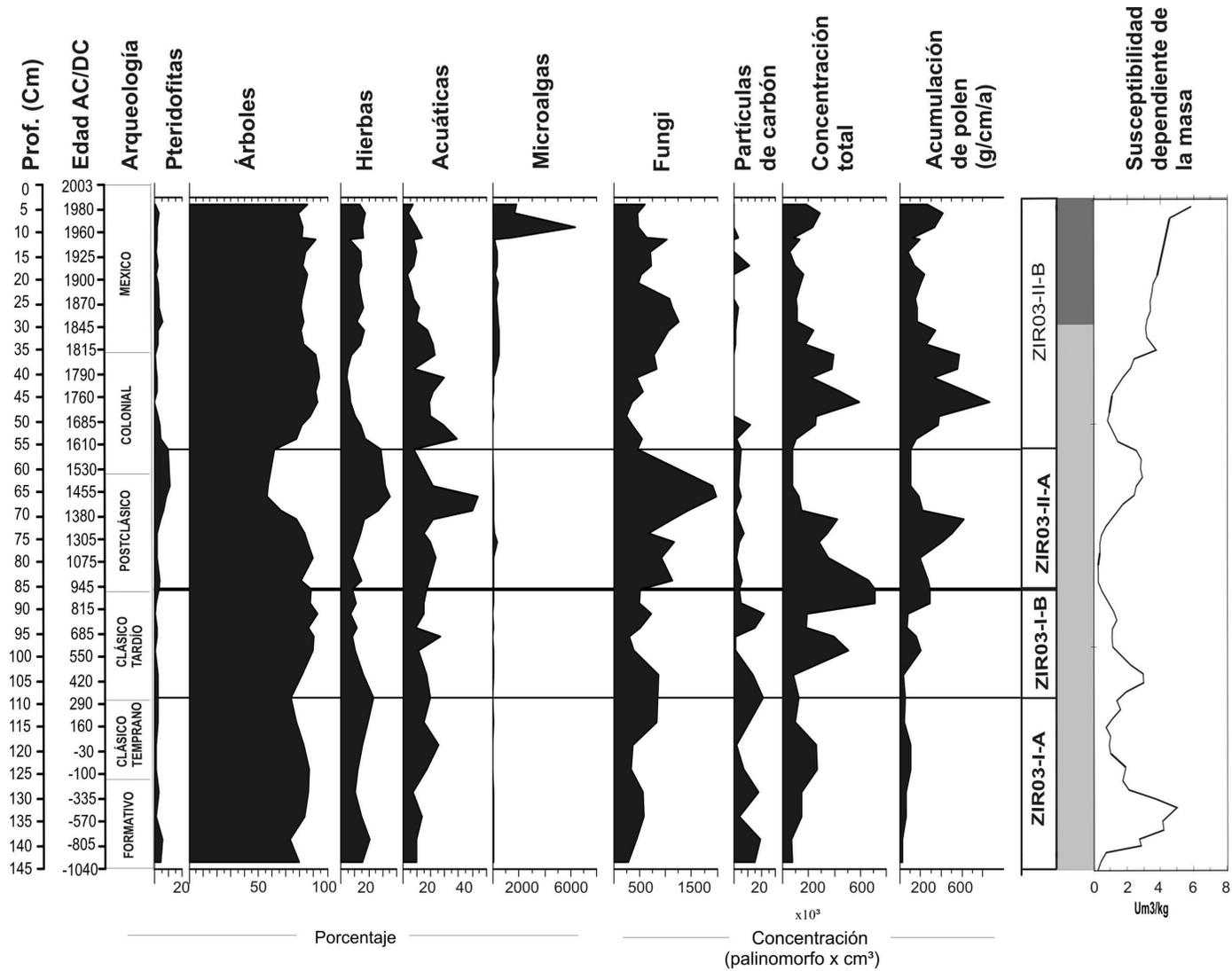
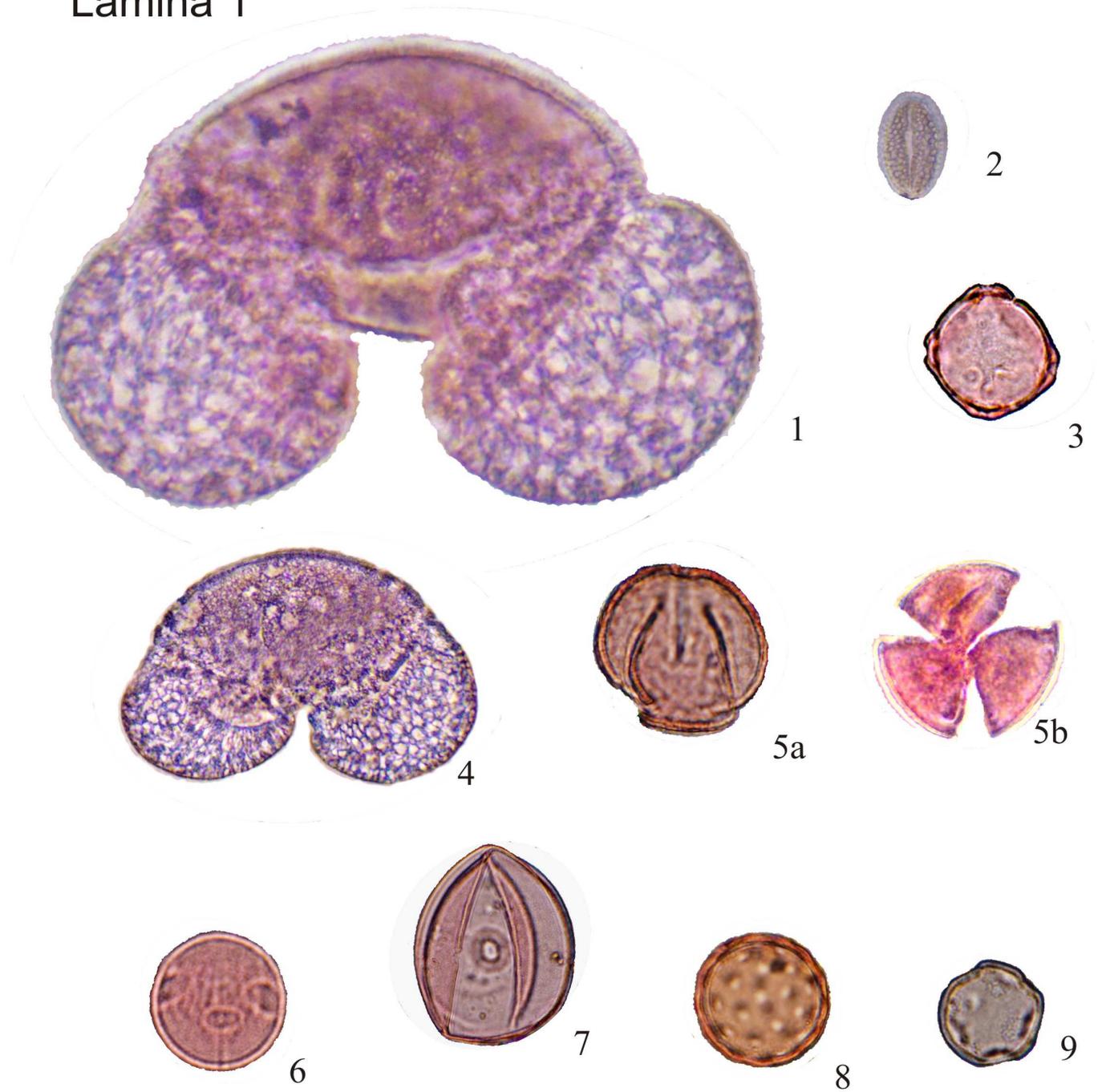


Figura 6.4. En este diagrama se muestra el porcentaje de polen de árboles, hierbas y esporas de helechos de la secuencia MOLE-ZIR03-2A-1K. Se presenta el número de algas, esporas de hongos y la concentración de partículas de carbono, concentración polínica (granos/cm³), acumulación polínica (granos/cm²/año) y susceptibilidad magnética. La profundidad, edad y periodos arqueológicos se encuentran en el extremo izquierdo del diagrama.

6.3.3 LÁMINAS DE POLEN

Como parte de los resultados se muestran tres láminas que contienen algunos ejemplares de los granos de polen encontrados en el núcleo. La lámina 1 contiene granos de polen de la vegetación regional, sobre todo aparecen los granos más importantes de árboles y luego de hierbas; en la lámina 2 se presentan granos de polen de herbáceas sobre todo de la familia de las *Astereceae* y en la lámina 3 observamos ejemplares de palinomorfos acuáticos.

Lámina 1



1) *Abies* sp. polen vesiculado en vista lateral (125 μ); 2) *Salix* sp. (18 μ); 3) *Alnus* sp. (24 μ); 4) *Pinus* sp. (60 μ); 5a) *Quercus* sp. vista ecuatorial, (30 μ) y 5b) *Quercus* sp. Vista polar. 6) Boraginacea (25 μ .); 7); Poaceae (30 μ .); 8) *Cheno-Am* (25 μ); 9) *Talictrum* sp. (19 μ). Todas las fotos fueron tomadas con objetivo 100x.

Lamina 2



1



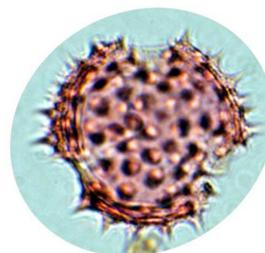
2a



2b



3

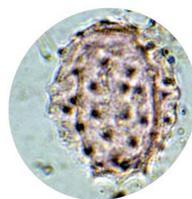


4

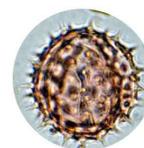
5



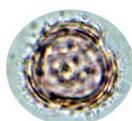
6



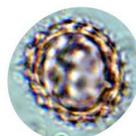
7



8



9a



9b

1) *Cruciferae* (20 μ); 2a y 2b) *Ambrosia* sp.(16 μ); 3) *Onagraceae* (47 μ); 4) *Asteraceae* sp.tipo I, (25 μ);
5) *Asteraceae* sp. tipo II, (33 μ); 6) *Asteraceae* tipo III, (35 μ); 7) *Asteraceae* sp. tipo IV, (28 μ);
8) *Asteraceae* sp. tipo V, (20 μ). 9a y 9b) *Asteraceae* tipo VI, (18 μ).

Lámina 3



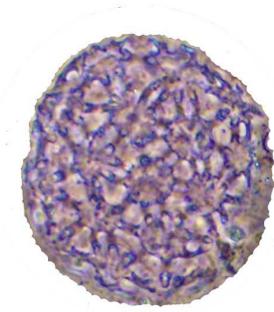
1



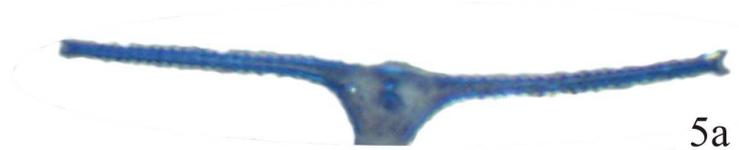
2



3



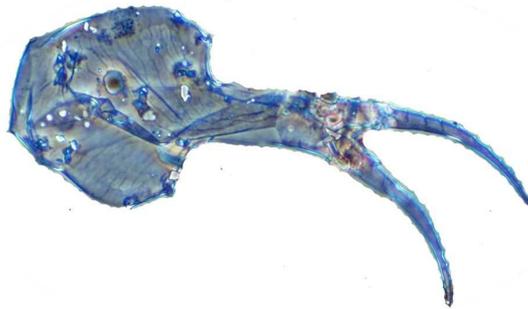
4



5a



5b



6

1) Cyperaceae (30 μ); 2) Espora de *Isöetes* aff. *equinospora* (27 μ); 3) *Botryococcus* sp. (25 μ); 4) *Coelastrum* sp. (40 μ); 5a y 5b) *Staurastrum leptocladum* (100 μ); 6) *Bosmina longirostris* (65 μ).

7. DISCUSIÓN

Éste es el primer estudio palinológico realizado en la cuenca de Zirahuén, por lo que no existe material de referencia que permita confrontar los resultados; sin embargo, dada la cercanía de la cuenca de Pátzcuaro se utilizarán para realizar una comparación los datos de investigaciones paleoecológicas que se han llevado a cabo previamente en esta cuenca. La escasez de investigación en Zirahuén no se limita a estudios de tipo biológico; hay también poco conocimiento de tipo arqueológico, antropológico e histórico. Pese a esto, por sí mismos los resultados del presente trabajo reflejan las condiciones ambientales y las modificaciones realizadas por los pobladores que habitaron desde hace 3000 años en la cuenca de Zirahuén.

Para facilitar la discusión, la exposición se hará utilizando los periodos arqueológicos, que prácticamente coinciden con las zonas polínicas obtenidas con el programa CONISS (Fig. 6. 2).

En la cuenca de Zirahuén, durante en el periodo Preclásico, la composición vegetal presentaba elementos como *Abies* sp., *Salix* sp., *Alnus* sp., y *Pinus* sp., todos ellos característicos de zonas templadas húmedas y que nos indican que posiblemente la cuenca debió tener un clima húmedo semejante al actual (Fig. 6.2). En estos resultados no se encontró evidencia de polen de maíz, pero sí de Chen-Am y de Poaceae, los cuales se han interpretado como indicadores de actividades agrícolas en la cuenca. Aunque no hay suficientes datos históricos ni estratigráficos que confirmen la existencia de población en la cuenca de Zirahuén durante este periodo, sí hay evidencia de pobladores en la cuenca de Pátzcuaro (existen datos que indican que hay presencia humana desde 4000 a.C.). Esto se dedujo a partir de la presencia de polen de *Zea* y *Chenopodiaceae*, plantas indicadoras del inicio de la agricultura. Es importante señalar que para este periodo la población se encuentra dispersa en pequeños grupos con gobiernos autónomos en la cuenca de Pátzcuaro, es decir, aún no existe algo que podamos denominar una identidad tarasca. Una situación parecida debió ocurrir en la cuenca de Zirahuén. Otro dato que refuerza la idea de la existencia de población durante este periodo en la cuenca de Zirahuén son los resultados obtenidos en la Hoya de San Nicolás de Paranguero. Brown (1984) indica que allí, durante el periodo Preclásico hay evidencia de disturbio antropogénico. Lo mismo sucede en el lago de Yuriria (Metcalf, 1989).

Los datos de susceptibilidad magnética para este periodo presentan valores altos, particularmente en el año 335 a.C. donde alcanza el valor más alto de la secuencia ($5\mu\text{m}/\text{kg}$), es decir, se incrementó la entrada de sedimentos al lago. El mayor flujo de sedimentos es interpretada como un posible aumento de las lluvias. Este dato parece corroborar los resultados obtenidos de los datos polínicos que muestran una condición húmeda para este periodo; así mismo, la acumulación polínica es la menor de los 145 cm de núcleo analizado.

En el registro de fósiles acuáticos no aparecieron todos los *taxa* identificados por Madrigal (2004); solamente se encontraron en los sedimentos algunos restos de organismos que pueden dar una idea del tipo de organismos que habitaron la cuenca. En el Preclásico hubo presencia de Cyperaceae, el valor que presentó (aproximadamente 5%) fue relativamente alto. Este es un género que habita en sitios húmedos, por ejemplo en la orilla del lago. Además, hubo presencia más o menos estable de *Botryococcus* sp. a lo largo del periodo. La presencia de *Bosmina longirostris* puede indicar que no hubo procesos de eutrofización para este periodo. Esto significa que la presencia humana en dicho periodo no ha tenido repercusiones importantes sobre la estabilidad del ecosistema. El lago de Pátzcuaro en esta época es húmedo y presenta un incremento la vegetación acuática. Este dato respalda los resultados que indican humedad para el periodo.

Para conocer con más detalle lo ocurrido en el Preclásico es necesario realizar más estudios arqueológicos, palinológicos y paleolimnológicos con nuevos núcleos y a nivel más específico. Ello con el fin de verificar la presencia de polen de maíz encontrado por Davies *et al.* (2004), que no aparece en las muestras analizadas durante la elaboración del presente trabajo.

Para el periodo Clásico temprano se observó que la composición de los conjuntos polínicos presentes en el periodo anterior se mantuvo, aunque presentó ligeras variaciones. Particularmente, *Pinus* sp. se mantuvo con valores altos hasta el año 30 d.C., aunque hacia el final de este periodo disminuyó; además, disminuyeron también dos *taxa* indicadores de humedad: *Abies* sp. y *Salix* sp. En contraste, los valores de arrastre identificados en la gráfica de susceptibilidad magnética indicaron que hubo poca entrada de sedimentos, de donde se infirió una disminución en la humedad de la zona, punto que se corrobora con la reducción de la vegetación. En cuanto a las herbáceas (Fig. 6.2) se notó que tanto Poaceae como Chenopodiaceae aumentaron

ligeramente con respecto al periodo anterior, lo que se interpretó como evidencia indirecta de presencia humana en la cuenca de Zirahuén.

La disminución de *taxa* indicadores de humedad, así como de plantas acuáticas, indica que el clima se volvió más seco en comparación con el periodo anterior; por ejemplo, disminuyó ligeramente Cyperaceae (Fig. 6.4). Además, la evidencia de *Isöetes aff. echinospora* está señalando un cambio en las condiciones físico-químicas del lago o variación en la entrada de nutrientes; tanto *Botryococcus* sp. como *Bosmina longirostris* presentaron valores relativamente bajos con respecto al periodo anterior pero conforme se observó que aumentaban los valores de la gráfica de susceptibilidad magnética, se incrementaba también la concentración de estos organismos. Lo anterior puede significar que la mayor entrada de sedimentos cambió la composición del agua, lo que, a su vez, permitió el desarrollo de diversas especies de fitoplancton con las cuales se alimentaba *Bosmina longirostris*.

En el periodo Clásico tardío se mantiene la misma vegetación arbórea, *Pinus* sp. se incrementa al igual que *Abies* sp.; sin embargo, este aumento no parece deberse a un incremento de la humedad ambiental, pues la gráfica de susceptibilidad magnética sugiere, sobre todo hacia el final del Clásico tardío, una disminución de humedad. Esto queda corroborado por la disminución de otros árboles indicadores de humedad como *Salix* sp., también disminuye *Alnus* sp. La disminución de la humedad continua afectando la presencia de Cyperaceae y la tendencia de *Bosmina longirostris* es inestable, pues desaparece en el año 945 d.C., aunque posteriormente la tendencia es a incrementarse.

Los datos de susceptibilidad magnética indica que para el periodo que va de 800 d.C. a 1,000 d.C. ocurrió la mayor sequía de los últimos 3000 años en Zirahuén (Fig. 6.4). Sin embargo, no son tan drásticos los cambios observados en la composición vegetal. Para este periodo presentan valores altos *Pinus* sp., y *Quercus* sp., mientras *Alnus* sp. disminuye y, por momentos, desaparece *Salix* sp., en tanto que *Abies* sp. fluctúa presentando valores muy bajos.

Al final del periodo Clásico tardío ocurrió un cambio climático rápido donde los trópicos fueron secos y los polos fríos. Hay registro de sequías ocurridas en algunas cuencas, como son San Pedro, Zacapu, Pátzcuaro, Hoya de San Nicolás, La Piscina de Yuriria y para la zona del alto Lerma (Metcalfé y Davies, 2007), así como la sequía reportada para la zona Maya. Finalmente, la hipótesis a verificar es que dado que en varias regiones del país se registra una etapa de sequía a finales del Clásico,

posiblemente esto ocurrió también en la cuenca de Zirahuén, sólo que ésta no quedó registrada adecuadamente en los conjuntos polínicos de los sedimentos del lago de Zirahuén, quizá por una sobrerrepresentación de granos de polen de los *taxa* arbóreos. En cambio en los sedimentos se observa que los valores de susceptibilidad magnética para este periodo son bajos, lo que sugiere que ocurrió un menor arrastre de partículas al lago posiblemente debido a la disminución de lluvias.

Donde posiblemente se pueda detectar el resultado de las variaciones climáticas es en el lago, debido a que muchas especies planctónicas son excelentes indicadores de la salud del ecosistema o de alteraciones ambientales, pues presentan mayor sensibilidad a las variaciones en las condiciones ambientales, de temperatura, salinidad, nutrientes, pH y presencia de sustancias químicas (Mendes, 2004; Conde, 2004). Probablemente el aumento *Botryococcus* sp. y el surgimiento de *Staurastrum leptocladum* puedan estar asociados a cambios en la composición de nutrientes como fósforo y nitrógeno que entran al lago (Fig. 6.4). La disminución de humedad pudo propiciar el aumento de la concentración iónica en el lago. De hecho, para la cuenca de Zacapu el incremento de las poblaciones de *Botryococcus* sp. se interpreta como indicador de eutrofización del lago (Xelhuantzi, 1991); en cambio, aunque abunda en el lago de Zirahuén y es precisamente en el periodo Clásico cuando mayor presencia tiene, parece no jugar el mismo papel ecológico que en el ex-lago de Zacapu, pues *Botryococcus* sp. disminuye en la época moderna, que es cuando ocurre la mayor entrada de nutrientes al lago de Zirahuén y hasta desaparece en años recientes. El surgimiento de *Staurastrum leptocladum* puede ser explicado si consideramos al lago de Zirahuén como ultraoligotrófico (Reynolds, 1998) en el periodo Preclásico y en el Clásico. En esa época las poblaciones de Desmidiáceas eran mínimas, al grado que no ha sido posible encontrar registro de su existencia, pero el incremento de la población en el Posclásico y, por lo tanto, de actividades humanas, posibilitó la mayor entrada de nutrientes como nitrógeno y fósforo, ocasionando el incremento de fitoplancton y con éste, el cambio en la composición florística del lago.

A principios del Posclásico, la tendencia en los conjuntos polínicos fue la disminución de *Pinus* sp. Al inicio del periodo, *Alnus* sp. *Abies* sp. y *Salix* sp. aumentó, sin embargo a lo largo de todo el periodo Posclásico la tendencia fue disminuir. Esto indica que el periodo de sequía observado a finales del Clásico se mantuvo hasta

aproximadamente la mitad del Posclásico. La intervención humana en este periodo fue más perceptible, pues se observó un incremento de Poaceae, aunque disminuyó casi hasta desaparecer Cheno-Am. La gráfica de susceptibilidad magnética permaneció con valores muy bajos debido a que hubo poco arrastre de partículas, lo que se puede interpretar como un indicador de sequía en la cuenca. En la zona resultaron evidentes los efectos que las actividades humanas tuvieron sobre el ecosistema. En primer lugar *Staurastrum leptocladum* apareció en este periodo y presentó valores elevados en el año 1270 d.C., posiblemente aumentó la entrada de nutrientes como fósforo y nitrógeno al lago debido a un incremento de población más que cambios de orden natural, como son el aumento o disminución de las lluvias. *Bosmina longirostris*, después del descenso en el Posclásico temprano, se recuperó y presentó valores altos al mismo tiempo que *Staurastrum leptocladum*, mientras que *Botryococcus* sp. se redujo. El registro de las partículas de carbón disminuyó durante el Posclásico en comparación con el Preclásico; sin embargo, para este periodo cabría esperar que éstas fueran más abundantes por la intensificación de la agricultura. Posiblemente no hubo una eficiente sedimentación de las partículas de carbón (Fig. 6.4). Para este periodo, Davies *et al.* (2004) encontró polen de maíz, lo que indica que en esa zona hubo gente que cultivaba. Esta investigadora refiere fuentes historiográficas que sugieren que el lago de Zirahuén era utilizado como centro ceremonial o servía como lugar de descanso para la nobleza tarasca. Por otro lado, la investigación realizada para la presente tesis confirma los resultados registrados por Davies *et al.* (2004) en el lago, pues para este periodo se indica que hubo una elevación en la entrada de nutrientes, fenómeno registrado por Davies *et al.* (2004) a través del análisis de diatomeas que presentaron alta productividad y turbidez, posiblemente con altas concentraciones de sales disueltas. Sin embargo, aún es necesario realizar más investigaciones en la zona para evaluar con mayor precisión la intensidad de sequía registrada para Zirahuén y compararla con la sequía registrada para otras zonas.

En el periodo comprendido entre 1400 y 1521 d.C. ocurrieron cambios abruptos de la cuenca de Zirahuén. En primer lugar disminuyó la presencia de árboles (Fig. 6.2), posiblemente debido a que el principal material utilizado por los tarascos para edificar sus viviendas era la madera. Ésta también era convertida en muebles, pilastras para las casas, canoas, armas, tambores ceremoniales, figuritas o leña para uso doméstico y ceremonial. Por lo anterior, el aumento de población en la cuenca de Pátzcuaro debió impactar también a la cuenca de Zirahuén. Seguramente los habitantes de este lugar

debieron realizar las mismas prácticas. El clima pareció mejorar, pues la gráfica de susceptibilidad magnética indica mayor arrastre de minerales, lo que puede interpretarse como un incremento de la humedad. A inicios del Posclásico, *Staurastrum leptocladum* está presente en el registro para posteriormente desaparecer, posiblemente el aumento de humedad cambió la concentración de nutrientes y minerales, lo que dificultó el desarrollo de esta alga. Suponemos que en esta época la población aumentó, tal como sucedió en la cuenca Pátzcuaro; sin embargo, la disminución de *Staurastrum leptocladum* parece indicar que el ecosistema acuático no fue impactado severamente, no así el terrestre, pues aquí se observa una disminución de la cubierta arbórea, posiblemente debido a la tala de árboles. Davies *et al.* (2004) registran un periodo de erosión; también afirman que se recuperó el nivel del lago.

El inicio del periodo Colonial (Fig. 6.4) corresponde aproximadamente a 1521 d.C.-1580 d.C. Para este periodo el ensamblaje vegetal indica que posiblemente fue un periodo de humedad en la cuenca de Zirahuén; la vegetación arbórea tanto como las herbáceas mantuvieron continuidad con el Posclásico Tardío, periodo en el cual la gráfica de susceptibilidad magnética indica una etapa de humedad. Pese a que en este periodo disminuyó drásticamente la población nativa, esto no se ve reflejado en modificaciones en la composición vegetal.

Existe un debate en torno al origen de la erosión en la cuenca de Pátzcuaro. O'Hara *et al.* (1993) plantean que en la época precolombina —desde el Preclásico hasta el Posclásico— el impacto humano sobre la tierra era fuerte debido a prácticas como el uso intensivo de la madera y la agricultura. En cambio, Fisher (2005) plantea que fue el abandono de las tierras arables debido a la disminución de la población durante la época de la Conquista la que ocasionó un aumento en la susceptibilidad magnética, el cual interpreta como un aumento en la erosión. Los resultados del análisis polínico del núcleo de Zirahuén indican que para los primeros ~90 años (1521-1610 d.C.), la vegetación mantuvo continuidad durante el Posclásico e inicios del Hispánico, es decir, hasta ese momento no se reflejó en la vegetación el impacto que tuvo para las poblaciones nativas la llegada de los españoles. La susceptibilidad magnética presenta valores elevados, indicando un alto grado de arrastre de partículas al lago por el abandono de las tierras dado que en este periodo la actividad en la cuenca debió ser mínima, así que la susceptibilidad magnética está indicando erosión de los suelos. El lago registra la tendencia a disminuir de *Botryococcus sp.* y *Bosmina longirostris*, posiblemente el arrastre de partículas no tenía suficientes nutrientes que permitieran el

crecimiento de estos organismos. Lo mismo debió de ocurrirle a *Staurastrum leptocladum*, pues la población de esta especie disminuyó.

Alrededor de 1610 d.C. se detectaron cambios importantes, la susceptibilidad magnética disminuyó y comenzó un periodo de sequía que habría de durar hasta más o menos 1780 d.C. Lo anterior se observa claramente en la disminución de la vegetación riparia y en Cyperaceae. Ocurrió un proceso de sucesión, *Pinus* sp. se recuperó rápidamente, debido posiblemente a la disminución de la población humana, pues en el siglo anterior desaparecería cerca del 90% de ésta, y aunque comenzó a recuperarse poco a poco siguió siendo muy reducida. La disminución de Poaceae la interpretamos como una disminución de la diversidad de plantas cultivadas debido a la disminución de la población. De igual manera disminuyeron otras herbáceas como Chenopodiaceae, Asteraceae y Labiales. A partir de siglo XVIII comenzaría el auge de la industria del cobre. El impacto que esta industria tuvo sobre el ecosistema —los bosques de pino proveían de carbón a esta industria— no se vio reflejado en la disminución de árboles, particularmente de *Pinus* sp., pues su número se mantuvo con valores altos. En cambio, en el lago es claro el impacto que tuvo la industria de cobre —que llegó a ser una de las más importantes en México—, pues aunque varía la abundancia de *Bosmina longirostris* se observa a partir de siglo XVIII una clara tendencia decreciente. Lo mismo le sucedió a *Botryococcus* sp. que también pareció ser afectada por el incremento en la entrada de cobre y plomo al lago. Hay estudios que indican que *Bosmina longirostris* no crece en ambientes que contengan cobre (Mendes, 2004), como ocurre en la cuenca de Zirahuén, por lo que su disminución puede estar relacionada con el aumento de la explotación de este metal en este periodo, dado que la industria vertía sus desechos al arroyo La Palma, y éste descarga sus aguas al lago de Zirahuén.

Otra etapa inicia después del año 1815 d.C., en este periodo ocurrieron cambios importantes tanto ecológicos como económico-sociales. La cubierta arbórea disminuyó aunque poco, particularmente *Pinus* sp. disminuyó, posiblemente por el desmonte del bosque para la utilización de las tierras como zonas de cultivo, asociado al incremento de la población y al final del siglo XIX por la introducción del ferrocarril en México que requirió de mucha madera para construir los durmientes y para la producción de carbón. A partir de este periodo comenzó a incrementarse la humedad, según lo sugiere la gráfica de susceptibilidad magnética. En el lago se observaron cambios interesantes; por ejemplo, *Bosmina longirostris* y *Botryococcus* sp. siguieron presentando valores bajos.

A partir de 1780 d.C. hubo indicios de que volvieron a cambiar las condiciones nutricionales del lago, posiblemente el incremento de la actividad minera en la Zona de Santa Clara del Cobre permitió un incremento de la población humana en las orillas de lago lo que ocasionó mayor entrada de nutrientes por intensificación de actividades, esto produjo condiciones para el incremento de *Staurastrum leptocladum* (Fig. 6.4).

Hay evidencias de que en Pátzcuaro durante el Posclásico y el periodo Colonial —1050 y 1550 d.C.— el lago fuea eutrófico y en la cuenca hubo deforestación por agricultura y sobre-pastoreo (Watts y Bradbury, 1982). Además, Street-Perrot *et al.* (1989) demostró que ocurrieron dos episodios de intensa degradación ambiental por la intensificación del cultivo de maíz y por la introducción de prácticas agrícolas europeas. Comparando lo que ocurre en la cuenca de Pátzcuaro y la de Zirahuén observamos que como el centro de la cultura tarasca estuvo ubicado en el lago de Pátzcuaro, éste presenta mayores alteraciones debido al incremento de actividades como la agricultura y la pesca, pero también por la urbanización. Pese a esto, los daños más severos sufridos el lago ocurrieron en el siglo XX. En cambio, la cuenca de Zirahuén, aunque ya presentaba indicios de disturbio humano, aquí la población no es tan grande y por lo tanto la explotación de los recursos es menor y esto se ve reflejado en la composición vegetal.

Desde 1900 ocurrieron cambios económico-sociales y ecológicos muy importantes. Por ejemplo, los datos históricos indican que en este periodo ocurrió en Pátzcuaro el mayor incremento de la población en la región, así como un incremento en el uso de tierras con fines agrícolas, explotación de los bosques y uso intensivo del lago. Situación similar debió suceder en la cuenca de Zirahuén, aunque la afectación debió ser menor, pues las modificaciones registradas para la cuenca de Zirahuén no presentan la intensidad de degradación como la ocurrida en la cuenca de Pátzcuaro. De hecho, no se ve claramente reflejado en el conjunto vegetal la degradación, pues la vegetación arbórea se mantiene con respecto al periodo que se ha nombrado México (Fig. 6.2), aunque con respecto a la colonia presenta una clara disminución, y de hecho *Pinus* sp. mostró una ligera mejoría en el año 1950, mientras que *Abies* sp. desaparece del registro, las hierbas también se mantienen y se observa una reducción de las plantas acuáticas. Para el lago quedaron registrados datos que podrían indicar un cambio en la composición florística —debido a la utilización masiva de agroquímicos y vertido de desechos domésticos que mantiene una entrada continua de nitrógeno y fósforo, los cuales resultan indispensables para el crecimiento de las algas, particularmente Bernal-

Brooks y MacCrimmon (2000b), observan que el crecimiento de las Desmidiáceas en el lago de Zirahuén está determinado por la colimitación de nitrógeno-fósforo. Estas algas están presentes sobretodo a partir del año 1800 d.C., por lo que se observa que el lago ha variado en su condición trófica en los últimos 3000 años de un estado ultraoligotrófico a uno oligotrófico, pero con tendencia a la eutrofia por la intensificación de actividades humanas en la cuenca y en el propio lago.

Otro elemento clave que reafirma esta transición es la aparición de *Coelastrum* sp., especie indicadora de ambientes perturbados que está presente en ambientes eutróficos, y que se registran alrededor del año 1960 d.C., esta especie confirma el cambio en las condiciones químicas y físicas del lago (Fig. 6.3). Por otro lado, *Bosmina longirostris* nunca recupera los valores mas altos que tuvo. Después de la contaminación por cobre ocurrida en el siglo XVIII, esta especie no volverá a recuperar sus valores. La disminución de esta especie debe tomarse como una señal de alerta, pues su función filtradora —se alimenta de algas por lo que reduce la cantidad de clorofila en los lagos— se ve mermada al disminuir la cantidad de estos organismos. La disminución de esta especie por un lado y el aumento de nutrientes que provoca el incremento de fitoplancton son condiciones que modifican el estado trófico del lago, por lo que reitero: la tendencia del lago es hacia un estado de eutrofización (Fig. 6.3).

Finalmente, Davies *et al.* (2004) reportan que a partir de la década de los setenta del siglo pasado hay registro de la presencia de la diatomea *Fragilaria crotonensis*, que se cataloga como especie indicadora de inicio de eutrofización. Además, la presencia de la diatomea *Cyclotella ocellata* desde 1970 d.C. alcanza abundancia relativa del 80%, lo que se interpretó como disminución en la riqueza florística de lago, es decir, que hay menos diversidad de especies en el lago.

8. CONCLUSIONES:

El análisis de los sedimentos del lago permitió realizar un acercamiento a los cambios ambientales, tanto naturales como inducidos por el hombre, ocurridos en la cuenca de Zirahuén durante los últimos 3000 años. Lo anterior se logró gracias al reconocimiento de los *taxa* importantes y de sus características básicas. Los palinomorfos que fueron útiles para reconocer las variaciones en los ecosistemas terrestres fueron *Pinus sp.*, *Abies sp.*, *Quercus sp.*, *Alnus sp.*, *Salix sp.*, Chen-Am, Poaceae y Asteraceae. Para reconocer los cambios ocurridos en el lago se identificaron algunas palinomorfos acuáticos, las especies claves fueron las algas *Staurastrum leptocladum*, *Coelastrum reticulatum* y el cladóceros *Bosmina longirostris*.

Se observa que del periodo Preclásico hasta poco antes del final del Clásico, la cuenca de Zirahuén presentó condiciones de humedad semejantes a las actuales y el lago se mantuvo con bajos niveles de nutrientes, posiblemente mantenía una condición ultraoligotrófica. Entre los años 800 y 1000 d.C. se registra el valor más bajo de susceptibilidad magnética, lo que es interpretado como sequía, la más drástica de todo el registro de los últimos 3000 años para la cuenca de Zirahuén. Sin embargo las modificaciones ocurridas en la vegetación no son tan radicales como las observaciones en la gráfica de susceptibilidad magnética, aunque hay una clara disminución en todos los *taxa* arbóreos. En cuanto al lago, en pleno periodo de sequía hubo presencia del alga *Staurastrum leptocladum*; su incremento se debió posiblemente a la concentración de nutrientes y minerales —principalmente fósforo y nitrógeno— por la disminución de agua en el lago como consecuencia de la posible disminución de humedad.

Hay indicios de restablecimiento de la humedad en la cuenca a partir de 1400 y se da la mayor expansión del imperio tarasco. Ocurre un aumento de población y de cultivos (Poaceae y Chen-Am), así como una brusca disminución de la cubierta arbórea. En el lago, contrario a lo que se esperaría en el periodo de mayor concentración de población de la etapa prehispánica, no se registra la especie *Staurastrum leptocladum*. Esto sugiere que el lago no fue impactado como la cuenca y que seguramente disminuyó la concentración de nutrientes que entraban al lago por incremento de humedad.

Pero los cambios más decisivos para el entorno natural y la población nativa ocurrieron partir de la Conquista, de 1521 a 1580. El ensamblaje vegetal indica un periodo de humedad, el cual mantuvo continuidad con respecto al Posclásico. En cuanto a la vegetación arbórea, ésta se recuperó, posiblemente debido a la disminución en el uso de la tierra. En el lago, tanto *Bosmina longirostris*, *Botryococcus* como *Staurastrum leptocladum* tienen tendencia a disminuir. Después de este periodo, continuó la recuperación de la cubierta arbórea, aunque ocurrió disminución de la vegetación riparia y de Cyperaceae, esto coincide con los datos representados en la gráfica de susceptibilidad magnética que indica un periodo de sequía. La disminución de *Bosmina longirostris* se atribuye a la entrada de cobre, y el aumento de *Staurastrum leptocladum* podría explicarse debido a un posible incremento en la entrada de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno. En el siglo XIX disminuyó la vegetación arbórea en comparación con la época colonial, aunque no fueron cambios drásticos, aumentaron las hierbas y se mantuvo el *Staurastrum leptocladum*, indicando condiciones claramente oligotróficas.

Los datos históricos señalan que la etapa de cambio más intenso ocurrió en los últimos 50 años. En este periodo, en la cuenca ocurren una serie de modificaciones ecológicas intensas, tales como la deforestación y la reconversión de tierras agrícolas a huertas de frutales, especialmente de aguacate. El lago es usado como lugar turístico aunque no intensivamente, así como de vertedero de desechos domésticos e industriales. Sin embargo, esto no parece ser registrado en la vegetación arbórea. En cambio, en el lago un año clave fue 1960, pues fue entonces cuando se elevaron los valores de *Staurastrum leptocladum*, y en 1973 se presentaron los valores más altos de los últimos 3000 años. Otro elemento clave es *Bosmina longirostris*, que después de la contaminación ocasionada por la producción de cobre disminuyó, situación a considerar dado su papel como filtrador. Por otro lado, aunque el lago aún se encuentra en estado oligotrófico es importante señalar que el aumento de *Coelastrum* sp. indica que el ambiente está perturbado.

Finalmente, hay que decir que en los últimos 3000 años, las comunidades humanas han impactado en distinto grado la cuenca. Según los datos obtenidos del análisis de polen el daño más grave ocurrido en la cuenca sucedió en el Posclásico. Esto parece indicar que en dicho periodo las poblaciones humanas aprovechaban más los recursos terrestres que los acuáticos; en cambio, en el lago comienzan a registrarse transformaciones partir del año 1790 d.C. Es decir, que las actividades humanas

tuvieron un fuerte impacto hasta este periodo. Sin embargo, insistimos en que el mayor impacto que ha sufrido el lago data de los últimos 50 años. Aunque el lago y la cuenca no están en una etapa de severa crisis ecológica, lo mismo que la cuenca, el registro palinológico —en particular de la zona acuática— muestra una tendencia hacia la eutrofización del lago, que de no revertirse puede ocasionar una crisis importante. No hay que olvidar que “los sistemas de agua dulce son a la vez desproporcionadamente ricos y desproporcionadamente frágiles” (Barlow *et al.*, 2002).

8.1. CONSIDERACIONES FINALES

Hoy en día, México enfrenta serios problemas relacionados con sus recursos hídricos. La falta de accesibilidad, la escasez y la contaminación que afecta al vital líquido constituyen factores que impiden a la población contar con agua suficiente y de calidad para cubrir sus necesidades básicas. De ahí la necesidad de conservar masas de agua como el lago de Zirahuén. Este lago cumple muchas funciones: es fuente de agua para las poblaciones circundantes, permite la obtención de recursos naturales como son animales y plantas comestibles, contribuye a mantener el equilibrio ecológico en la zona, es un lugar de recreo e incluso brinda inspiración artística.

La deforestación es también un problema grave en nuestro país. Por ello vale la pena cuidar los ecosistemas presentes en la cuenca de Zirahuén y promover un uso racional de los recursos existentes en la zona.

Desde el punto de vista biológico y antropológico, la cuenca de Zirahuén ha sido poco estudiada en comparación con otras cuencas, como la de Pátzcuaro. Por ello vale la pena adentrarse en el conocimiento de esta zona, pues el generar conocimiento científico puede servir para prevenir el mal uso de los recursos naturales. Desde esta perspectiva, consideramos que los estudios palinológicos resultarían de gran utilidad para promover el interés en la zona y conocer más a fondo sus características. La presente investigación pretende, en este sentido, contribuir a dicho fin.

Dado que los recursos naturales se han convertido en medio para obtener enormes fortunas, es indispensable, para garantizar la permanencia tanto del bosque como del lago, en condiciones de estabilidad ecológica, que sean los pobladores de la cuenca los que tomen en sus manos la responsabilidad de proteger este patrimonio y que diseñen estrategias que les permita aprovecharlo de manera adecuada. También deberán

ser ellos los más interesados en que se dicten leyes destinadas a proteger el ambiente y a exigir que se cumplan.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antaramián, H. E. y Ortega R. J. (1996). Riesgo de erosión en la Cuenca de Zirahuén y cambios de área y volumen en el lago. *Ciencia Nicolaita*. Revista de la coordinación de Investigación científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 11:83-95.
- Acuña, S. R., Stahle, W. D., Cleaveland, M. y Therrell, D. M. (2002). Megadrought and Megadeath in 16th century Mexico. *Emerging Infectious Diseases*. 8 (4): 360-362.
- Alcocer, J., Escobar, E., y Marín, L. E., (2000). Epicontinental aquatic systems of Mexico in the context of hydrology climate, geography and geology. En: *Aquatic ecosystems of Mexico: Status and Scope*. Editado por Munawar, M., Lawrence S. G., Munawar, I. F. y Malley, D. Ecovision World Monograph Series. Países Bajos. pp. 1-13. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- 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, S. (1976). Local and regional vegetational development in eastern Denmark in the holocene. *D.G.U. Arborg*. pp. 5-27. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Arriaga, C. L., Aguilar, S. y Alcocer D. J., (2000). Aguas continentales y diversidad biológica de México. CONABIO. México. pp. 327. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

- Ávila, G. P. (1995). La mitología P'urhépecha y la estrategia sociocultural de uso y manejo ecológico del agua. El caso de la meseta P'urhépecha. En: *Estudios Michoacanos VI*. Editado por Muro V. G. El Colegio de Michoacán, México. pp. 41-81. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Barlow, M., y Clarke, T. (2004). Oro Azul. Las multinacionales y el robo organizado de agua en el mundo. Paidós. Barcelona. pp.417.
- Berglund, Björn E. (1986). Pollen analysis and pollen diagrams En: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. Editado por Berglund, Björn E., Wilye John. Reino Unido. pp. 425-438. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Beltrán U. U. (1985). La población de los Tarascos en el siglo XVI. En: El poblamiento de México. Una visión histórico demográfica. Tomo I. México Prehispánico. pp. 282-303.
- Beltrán, U. U. (1986). Estado y sociedad Tarasco. En: La sociedad Indígena en el Centro y Occidente de México. Editado por Carrasco, P. *et al.* El Colegio de Michoacán. México. pp. 45-60.
- Bernal-Brooks, F. (1995). El lago de Zirahuén. En: Lagos y presas de México. De la Lanza E. y García, C. J. Centro de Ecología y desarrollo. México. pp. 109-115. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Bernal-Brooks, F. (1998). The lakes of Michoacan (Mexico): a brief and alternative point of view. *Fresh Water forum*: 10: 21-38. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Bernal-Brooks F. y MacCrimmon H. R. (2000a). Lake Zirahuén (Mexico): An Assessment of morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment

- inputs. En: Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope. Editado por Munawar, M., Lawrence, S. G., Munawar I. F. y Malley, D. F. *Ecovision World Monograph Series*. Reino Unido. pp. 61-76.
- Bernal-Brooks, F. W. y MacCrimmon, H. R. (2000b). Lake Zirahuen (Mexico): A pristine natural reservoir visually insensitive to expected cultural eutrophication. En: Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope. Editado por Munawar, M., Lawrence, S.G., Munawar, I. F. y Malley, D. F. *Ecovision World Monograph Series*. Reino Unido. pp. 77-88.
- Bernal-Brooks, F., Dávalos L. L. y Lind, O. T. (2002). Assessing trophic state of an endorheic tropical lake: the algal growth potential and limiting nutrients. *Arch. Hydrobiol.* 153(2): 323-338.
- Bernal-Brooks, F. (2002). La limnología del lago de Pátzcuaro: Una visión alternativa a conceptos fundamentales. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias. UNAM. pp. 180. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Birks, H. J. (1980). Techniques in pollen analysis. *Quaternary Palaeology*. Edward Arnold. pp. 165-175.
- Birks, H. J. (1980). The reconstruction of past environments. *Quaternary Palaeology*. Edward Arnold. pp. 262-283. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Birks, H. J. (1986). Numerical zonation, comparison and correlation of Quaternary pollen-stratigraphical data. En: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*, Editado por Berglund, Björn E. John Wiley & Sons, Reino Unido. pp. 743-769. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

- 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]
- Bradbury, J. P. (2000). Limnologic history of Lago de Patzcuaro, Michoacan, Mexico for the 48 000 years: impacts of climate and man. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 163: 69-95.
- Brown, B. (1991). Paleoecología y arqueología en la frontera Mesoamericana: un análisis. *Cuaderno de trabajo 13*. INAH. México. pp. 65-106.
- Brown, T. A., Farwell, G. W., Grootes, P. M., y Schmidt, F. H., (1992). Radiocarbon AMS dating pollen extracted peat samples. *Radiocarbon* 34 (3), 550-556.
- Castañeda, B. R. (1998). Estudio palinológico de una secuencia vulcanoclástica asociada a un hallazgo de *Mammuthus Sp.* en el municipio de Metepec, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México. pp. 78. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Ceccon, E. (2003). Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. *Ciencias*. Facultad de Ciencias/GDAPA. 72: 46-53. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Centro Estatal de Desarrollo Municipal (2000). Salvador Escalante. En: Enciclopedia de los municipios de México, Michoacán, Gobierno del estado de Michoacán. En línea <http://www.michoacan.gob.mx/municipios/80sociodemografia.htm> [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Cerón, G. A. (2002). La valoración económica de los bosques de la región Purépecha como una estrategia para su conservación. Tesis de Maestría. UMSNH. México. pp.120.

- Cervantes, B. J., Meza M. S., y Alfaro S. G. (1995). Importancia palinológica en la definición de unidad estratigráfica de suelos de la cuenca de México. En: Investigaciones en paleobotánica y palinología. Editado por Montúfar, L. A. *Serie arqueología*. Colección Científica. INAH. México. pp. 91-100. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Coesel, P. F. (1996). Biogeography of desmids. *Hydrobiologia*. 336: 41-53. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Cohen, A. (2003). Paleocological Archives in Lake Deposits 2: Records from Important Grups. En: *Palaeolimnology. The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press. Estados Unidos. pp.287-350. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- CONACULTA-INAH. (2000). Atlas del México Prehispánico. Especial Arqueología Mexicana. Raíces/CONACULTA-INAH. México. pp. 80.
- Conde, P. J., Ramos, R. E., y Morales, B. R. (2004). El zooplancton como integrante en la estructura trófica de los sistemas acuáticos lénticos. *Ecosistemas*. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente. año XIII. No. 2. pp. 1-9.
- Challenger, A. (1998). Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México, Pasado, presente y futuro. CONABIO. México. pp. 847.
- Davies, S. J., Metcalfe, S. E., MacKenzie, A. B., Newton, A. J., Endfield, G. H. y Farmer, J. G. (2004). Environmental changes in the Zirahuén Basin, Michoacán, Mexico, during the last 1000 years. *Journal of Paleolimnology* **31**: 77-98.

Davies, S., Metcalfe, S., Bernal-Brooks, F., Chacón-Torres, A., Farmer, J., MacKenzie, y Newton, A. (2005). Lake Sediments Record Sensivity of two Hydrologically Closed Upland Lakes in Mexico to Human Impact. *Ambio*, **34** (6):470-475.

De la Vega, S. Y. (2003). Situación de los peces dulce acuícolas de en México. *Ciencias*. Facultad de Ciencias/DGAPA 72: 20-30. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Dodson, S., y Frey, G. D. (2001). Cladocera and other branchiopoda. En: Ecology and classification of North American Freshwater invertebrates. Editado por Thorp, H.J., y Covich P.A. 2ed. Academic Press. Estados Unidos. pp. 850-913. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Durand, J. (1989). Tierra de volcanes. Movimientos sociales en Michoacán (1976-1986). En: Estudios Michoacanos III. Editado por Zendejas, R. S. El Colegio de Michoacán. México. pp. 15-36. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Equihua, M. (02/02/2007) Denuncia director de desarrollo rural devastación forestal por siembra de aguacate al sur de Uruapan. Urgente tomar medidas preventivas y correctivas: medio ambiente municipal; APEAM se deslinda. *La Jornada Michoacán*. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Equihua, M. (24/04/2006) Frenar a los piromaniacos del oro verde. La princesa-sirena de Zirahuén sigue llorando. *La Jornada de Michoacán*. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para la elaboración comprender conceptos]

Fisher, C. T. (2005). Demographic and Landscape Change in the Lake Pátzcuaro Basin: Abandoning the Garden. *American Anthropologist*. 107 (1): 87-95.

- Flores, V. D. (2004). Occidente de México. Museo Nacional de Antropología. CONACULTA-
INAH/Lunwers. México. pp. 36. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para
comprender conceptos]
- Freedman, B. (1995). Eutrophication of freshwater. En: Environmental ecology. The Ecological
Effects of Pollution, Disturbance, and Other Stresses. Editado por Academic Press.
Estados Unidos. pp. 189-212. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para
comprender conceptos]
- Frey, D. G. (1986). Cladocera analysis. En: *Handbook of Holocene Palaeoecology and
Palaeohydrology*. Editado por Berglund, Björn E. John Wiley & Sons Ltd. pp 667-692.
[no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- García, E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de kopen: Para
adaptarlo a las condiciones de la republica Mexicana. UNAM. Mexico. pp246
- Gerrath, J. F. (2003). Conjugating green algae and demids En: Freshwater Algae of North
America. Ecology and Classification. Editado por Wehr, J. D. y Sheath, R. G.
Academic Press. Reino Unido. pp. 353-379. [no utilizado en texto, pero fue muy
importante para comprender conceptos]
- Gómez, G. A. (2000). Producción de aguacate Hass para exportación. Itaca. México. pp. 122.
[no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- 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.
- Gutiérrez, M. E., y Suárez, M. E. (2003). Estado actual de conocimiento de los cladóceros de
México. En: *Planctología mexicana*. 1ed. Editado por Barreiro, G. M., Meave, C. M.,
Signoret-Poillon, M. y Figueroa-Torres, M. Sociedad Mexicana de Plactología, A. C.

México. pp. 171-184. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Harmsworth, R. V. y Whiteside, M. (1968). Relation of cladoceran remains in lake sediments to primary productivity of lakes. *Ecology*. 49 (3):998-1000. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Hooghiemstra, H. (1984). Vegetational and climatic history of the high plain of Bogotá, Colombia. A continuous record of the last 3.5 million years. En: El Cuaternario de Colombia. Editado por Vander, Hammen, T. V10. CRAMER; Vaduz. Alemania. pp. 368.

Hutchison, G., Patrick, R. y Deevy, E. (1956) Sediments of lake Pátzcuaro, Michoacán, México. *Geological Society of America Bulletin*. 67:1491-1504.

Islebe, G., y Torres, C. N. (2005). Investigar el pasado para comprender el futuro. *Ciencia y Desarrollo*. 30 (184): 21-26. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Jarzen, D. M., y Nichols, D. J. (1996). Pollen. En: *Palinology: Principles and applications*. Editado por Jansonius, J., y McGregor, D.C. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation. pp. 261-291. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Kapp, O. R. (1969). *How to Know pollen and spores?* W. M. C. Brown Company Publishers. EUA. pp.249

Kerfoot, W. C. (1974). Net accumulation rates and the history of cladoceran communities. *Ecology* 55: 51-61. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

- Lee, R. E. (1999). *Phycology*. Cambridge University Press. Estados Unidos. pp. 198-199. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Leng, J. M., Metcalfe, S.E. y Davies, S. J. (2005). Investigating Late Holocene climate variability in central México using carbon isotope ratios organic materials materials and oxygen isotopes ratios from diatom silica within lacustrine sediments. *Journal of Paleolimnology*. 34: 413-431.
- Locke, A., y Sprules, W. G. (2000). Effects of acidic pH and phytoplankton on survival and condition of *Bosmina longirostris* and *Daphnia pulex*. *Hydrobiologia*. 437: 187-196. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- López, S. G. (1982). Dinámica Hidrológica del lago de Zirahuén, Tesis de Licenciatura. UAM-Iztapalapa. pp. 63.
- Lozano, G. S. (2004). Evidencia de cambio climático: cambios en el paisaje. En: Cambio climático: una visión desde México. Editado por Martínez, J., Brernauntz F. A., y Osnaja, P. SEMARNAT-INE. México. pp. 65-76.
- Lozano G. S. (1995). El polen de *Alnus* como posible indicador de condiciones paleoecológicas. En: Investigaciones en paleobotánica y palinología. Editado por Montúfar, L. A. *Serie arqueología*. Colección Científica. INAH. México. pp. 63-75. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Lozano, G. S., Xelhuantzi, L. S., y Martínez H. E. (1995). Metodología, alcances y limitaciones del análisis palinológico del Cuaternario del centro de México. En: Investigaciones en paleobotánica y palinología. Editado por Montúfar L. A. *Serie Arqueología*, Colección Científica. INAH. México. pp. 77-90. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

- Madrigal, G. X. (2001). Vegetación acuática del lago de Zirahuén, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. México. pp. 110.
- Madrigal, G. X., Novelo R. A., y Chacón, T. A. (2004). Flora y vegetación acuática del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Acta botánica Mexicana* 68: 1-38.
- Margalef, R. (1983). Ecología del fitoplancton. En: Limnología. Editado por Omega. Barcelona. pp. 247-329. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Margalef, R. (1983). Lagos. En: Limnología. Editado por Omega. Barcelona. pp. 667-770. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Martínez-Almeida, V., y Tavera, R. (2005). A hydrobiological study to interpret the presence of desmids in lake Zirahuén, México. *Limnologica* 53: 61-69.
- Martínez-Almeida, V. (2005). Las *Desmidiáceas* (*Conjugatophyceae*) en el lago de Zirahuén: un análisis hidrobiológico de su presencia y abundancia. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias. UNAM. pp. 109.
- Mc Andrews, J. H., Berti, A. A. y Noms, G. (1973). Key to the Quaternary pollen and spores of the great lakes region. The Royal Ontario Museum. Canadá. University of Toronto Press.
- Mendes, G. L. (2004). Efeitos do cobre e cromo na comunidades zooplanctônica: um estudo experimental em mesocosmos. Tesis de maestría en Ciencias de ingeniería ambiental. Escuela de Ingeniería de San Carlos de la Universidad de San Paulo. pp. 288.

- Merino, P. L. (2003). Los bosques de México reflexiones entorno a la conservación. *Ciencias*. Facultad de Ciencias/DGAPA. 72: 59-67. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Mestre, J. E. (2000). Aquatic ecosystems of Mexico: The political and social context, En: *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope*. pp. XV-XVIII Editado por Munawar, M., Lawrence, S. G., Munawar, I. F. y Malley, D. *Ecovision World Monograph Series*. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Metcalf S. E., Harrison, F. A. (1984). Cambio ambiental del Cuaternario tardío en depósitos lacustres en la cuenca de Zacapú, Michoacán. Reconstrucción preliminar. *Bol. Inst. Geogr. UNAM*. No. 14: 127-150.
- Metcalf S. E., Street-Perrott, F. A., Brown, R.B., Hales, P.E., Perrot, R.A., y Steininger, F. M. (1989). Late Holocene Human Impact on Lake Basins in Central Mexico. *Geoarchaeology: An International Journal*. 4 (2) 119-141.
- Metcalf S., y Davies, S. (2007). Deciphering recent climate change in central Mexican lake records. *Climate Change*. **83**: 169-186.
- Moguel, C. M. (1987). Trabajos de salvamento arqueológico en las cuencas de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén: un intento de interpretación de interpretación cultural. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Antropología e Historia. México. pp 136.
- Muñoz, R. G. (15/10/2004). Erupción de rebeldía en el lago azul. *Ojarasca* No. 90. *La Jornada*, México.
- Newton, A., Metcalfe, S., Davies, S., Cook, G., Barker, O., y Telford J. (2005). Late Quaternary volcanic record from lakes of Michoacán, central Mexico. *Quaternary Science Reviews* 24: 91-104. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

- Notimex, (01/12/2006). Autoriza E.U. importaciones de aguacate mexicano a todo el país. En línea www.agricultura.com.mx [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- O'Hara, S., Street-Perrott, F. A., y Burt T. P. (1993). Accelerated soil erosion around a Mexican Highland lake caused by prehispanic agriculture. *Letter to Nature*. 362. pp. 48-51.
- O'Hara, L. S., y Metcalfe, S.E. (1997). The climate of Mexico since the Aztec period. *Quaternary International*. 43/44: 25-31. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Olea, F. A. (1997). La introducción de Maíz híbrido en la agricultura mexicana: Una historia de equívocos científicos, intereses comerciales y conflictos sociales. En: Ciencia en los márgenes. Ensayos de historia de las ciencias en México. Editado por Rutsch, M., y Serrano, C. IIA. UNAM. México. pp. 189-230.
- Ortega, B., Caballero, C., Lozano, S., Israde, I., y Vilaclara, G. (2002). 52 000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacan, Mexico: the magnetic record. *Earth and Planetary Science Letters*. 202: 663-675.
- Ortega, M. (1984). Catalogo de algas continentales recientes de México. UNAM. México. pp. 565
- Palacios, Ch., R., Ludlow, W. B., y Villanueva, R. (1991). Flora Palinológica de la Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an, Quintana Roo, México. CIORIO. Quintana Roo. pp.321
- Pérez-Cálix, E. (1996). Flora y vegetación de la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México. Flora del bajío y de regiones adyacentes. Fascículo complementario XIII.

Instituto de Ecología A.C. Centro Regional del Bajío. CONABIO. Pátzcuaro. Michoacán. México. pp.75.

Pérez, M. (03/02/2007). Apertura total del mercado de E. U. al aguacate mexicano; habrá competencia APEAM: Chile y Perú se proyectan como potencias en la producción del fruto. *La Jornada Michoacán*. México. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Perlstein, P. H. (2004). El imperio Tarasco en el mundo mesoamericano. *Relaciones*. 99. Vol. XXV. Colegio de Michoacán. México. pp.115-145. En línea www.redalyc.com

Piperno, D.R., Moreno, J.E., Iriarte, J., Holst, I., Lachniet, M., Jones, J.G., Ranere, A.J., y Castanzo, R. (2007). Late Pleistocene and Holocene environmental history of the Iguala Valley, Central Balsas watershed of México. *PNAS*. 104 (29): 11874-11881. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Pohl, E.D., Piperno, D. R., Pope, O.K. y Jones G.J. (2007). Microfósil evidence for pre-Columbian maize dispersals in the neotropics from San Andrés, Tabasco, México. *PNAS* 14 (16): 1147-1151. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Reynolds, C. S. (1998). What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia*. 369/370: 11-26.

Rojas, R. T. (2004). Las cuencas Lacustres del Altiplano Central. *Arqueología Mexicana* 12 (68): 20-27. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

Rosas, M. C. (1997). La cuenca del lago Zirahuén los avances del deterioro. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. pp. 187.

- Roubin D. W. y Moreno J. E. (1991). Pollen and spores of Barro Colorado Island. Missouri Botanical Garden. EUA. pp. 268.
- Rybnícková, E., y Rybníček, K. (1971). The determination and elimination of local elements in pollen spectra from different sediments. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 11:165-176. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Rzedowski, J. (1998). Vegetación de México. Limusa. México. pp. 432.
- Saenz, C. (1978). Polen y espora. Introducción a la palinología y vocabulario palinológico. H. Blume ediciones. España. pp. 219.
- Schnurrenberger, D., Rusell, J. Y Kelts, K. R. (2003). Classification of lacustre sediments based on sedimentary componets. *Journal of Paleolimnology*. 29: 141–254
- Sluyter, A., y Domínguez, G. (2005). Early maize (*Zea mays* L.) cultivation in México: Dating sedimentary pollen records and its implications. *PNAS*. 103 (4). pp. 1147-1151. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Sosa, N. S. (2001). Registro palinológico del Pleistoceno Tardío-Holoceno en el extremo meridional de la Cuenca de México: paleoambientes e inferencias paleoclimáticas. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. México. pp. 115. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Stokes, P. (1984). Clearwater Lake: Study of an Acidified Lake Ecosystems. En: effects of Pollutans at the ecosystem Level. Editado por Shechan, D.R., Miller, G. C., y Butler Bourdeau, Ph. John Wiley & Sons Ltd. pp. 229-253. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]

- Street-Perrott, A. F., Perrott, A. R. y Harkness, D.D. (1989). Anthropogenic Soil erosion around Lake Patzcuaro, Michoacán, Mexico, during the Preclassic and Late Postclassic Hispanic Periods. *American Antiquity*. 54(4): 759- 766
- Tavera, R., y Martínez,-Almeida, V. (2005). Atelomixis as a possible driving force in the phytoplankton composition of Zirahuén, a warm-monomictic tropical lake. *Hidrobiología*. 533: 199-208.
- Tryon, F. A., y Lugardon B. (1991). Spores of the Pteridophyta: Surface, Wall Structure, and Diversity Based on Electron Microscope Studies. Springer-Verlag. Wisconsin. pp.648
- Tsugeki, N., Oda, H., y Urabe, J. (2003). Fluctuation of the zooplankton community in Lake Biwa during the 20th century: a paleolimnological analysis. *Limnology* 4:101-107
- Vargas U. G., García, G. J. y Contreras, B. C. (2000). Apuntes e indicadores para la historia ambiental del estado de Michoacán. Centro de investigación económica y social. UMSNH. México. pp. 23-51, 281-286.
- Veraza, U. J. (2007). Economía política del agua. Itaca. México. pp. 95.
- Watts, W. A. y Bradbury, J.P. (1982). Paleoecological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the Basin of Mexico. *Quat. Rest.* 17: 56-70
- Whiteside, M. C., y Swindoll, M. R. (1988). Guidelines and limitations to cladoceran palaeoecological interpretations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 62: 405-412. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Williams, E. (1996). Desarrollo cultural en las cuencas del occidente de México: 1500 A.C.- 1521 d.C. En: Las cuencas del occidente de México. Época prehispánica. Editado por Williams, E. El Colegio de Michoacán-CEMCA. México. pp 15-59.

Williams E. (2007). El Antiguo Occidente de México: Un área Cultural Mesoamericana. pp.1-93. En línea http://famsi.org/cgiin/print_friendly_all.plpath=spanish/research/williams/&=index.html&...08/01/2007

Xelhuantzi, L. S. (1991). Estudio palinológico y reconstrucción paleoambiental del ex-lago de Zacapu, Michoacán. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. pp.157.

Zambrano, L. (2003). La restauración de ríos y lagos. *Ciencias*. Facultad de Ciencias/DGAPA. 72: 37-43.