



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

***DIATOMEAS COMO INDICADORES DE IMPACTO
ANTROPOGÉNICO Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL LAGO LA
"ALBERCA" EN TACÁMBARO MICHOACÁN.***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G O

P R E S E N T A:
MISAEEL VERGARA HUERTA

DIRECTOR DE TESIS: **Dra. Margarita Caballero Miranda**

ASESOR INTERNO: **Dra. Patricia Velasco de León**



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA 2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Teresa Huerta Ciro y Filiberto Vergara Fabián todo el apoyo, cariño y consejos brindados durante mi formación académica.

A mis Hermanos Filiberto Vergara Huerta, Edgar Eli Vergara Huerta y Erick Josafat Vergara Huerta por brindarme su cariño, amistan y consejos en estos años que hemos compartido juntos.

A mis familiares paternos y maternos en los que he visto un ejemplo de vida, humildad y respeto.

A la Dra. Margarita Caballero por su confianza, apoyo y amistad así como los consejos y enseñanzas para la elaboración de este trabajo de Tesis.

Al Instituto de Geofísica y Laboratorio de Paleolimnología por brindarme un espacio así como las facilidades, material y equipo para la realización de este proyecto.

A mis amigos de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza con los que compartí distintas aventuras durante nuestra formación académica.

Agradecimientos especiales a la Dra. Beatriz Ortega, Dra. Isabel Israde, M.C. José Antonio González Rangel, M.C. Alejandro Ramírez Rodríguez y Dr. Gabriel Vázquez Castro que recolectaron los núcleos con los que se realizó este trabajo.

A la Dra. Susana Sosa Nájera quien realizó la extracción de polen para los fechamientos.

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de los proyectos DGAPA PAPIIT IN101513 “Registros de variabilidad climática en el ecotono entre el bosque tropical y el bosque templado”. DGAPA PAPIIT IN114906 “Paleoclimas y paleoambientes del occidente de México”. DGAPA PAPIIT IN113408 “Variabilidad climática del Holoceno registrada en sedimentos de los lagos de Michoacán”.

Contenido

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. HIPÓTESIS DEL TRABAJO.....	3
4. OBJETIVOS.....	4
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
4.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	4
5. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
5.1 FISIOGRAFÍA Y LOCALIZACIÓN	5
5.2GEOLOGÍA.....	6
5.3 CLIMA	6
5.4 HIDROLOGÍA	7
5.5 VEGETACIÓN	7
5.6 ARQUEOLOGÍA-HISTORIA	7
6. MATERIAL Y MÉTODO	9
6.1 MÉTODO DE CAMPO	9
6.2 MUESTREO, DESCRIPCIÓN Y FECHAMIENTO DEL NÚCLEO.....	9
6.3 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA	10
6.4 CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO	11
6.5 ANALISIS DE DIATOMEAS.....	12
6.6 PALINOLOGÍA Y PARTÍCULAS DE CARBÓN	13
7. RESULTADOS	14
7.1 ESTRATIGRAFÍA, SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA Y CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO...	14

7.2 MARCO CRONOLÓGICO.....	16
7.3 DIATOMEAS	17
7.4 PALINOLOGÍA Y PARTÍCULAS DE CARBÓN	19
8. DISCUSIÓN.....	21
9. CONCLUSIONES	25
10. BIBLIOGRAFIA	26
11. APÉNDICE: DESCRIPCIÓN TAXONÓMICA DE LA PRINCIPALES ESPECIES DE DIATOMEAS EN EL REGISTRO DE LOS ULTIMOS 2000 AÑOS EN EL LAGO DE TACÁMBARO:.....	29

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Localización del Lago La Alberca de Tacámbaro, Michoacán (Modificado de INEGI).....	6
Figura 2. Fechamientos de radiocarbono, unidades estratigráficas, contenido de carbón orgánico, susceptibilidad magnética y abundancia total de diatomeas en los primeros 2.25 m del núcleo TAC06III, Alberca de Tacámbaro, Michoacán.....	15
Figura 3. Distribución estratigráfica de los principales taxones de diatomeas (>10%) identificados en los primeros 2.25 m del núcleo TAC06III, Alberca de Tacámbaro, Michoacán.	19
Figura 4. Distribución estratigráfica de las partículas de carbón y los principales taxones de polen y palinomorfos identificados en los primeros 2.25 m del núcleo TAC06III, Alberca de Tacámbaro, Michoacán.....	21

RESUMEN

Se realizó un estudio de diatomeas sub-fósiles y datos geoquímicos (susceptibilidad magnética y contenido de carbón orgánico) obtenidos de un núcleo extraído del Lago la Alberca en Tacámbaro, Michoacán, con el objetivo de detectar y caracterizar los cambios ambientales y antropogénicos de los últimos 2,000 años. Este lago de origen volcánico se encuentra en una zona de transición ecológica donde estos cambios son más fácilmente detectables. Las diatomeas sub-fósiles obtenidas del sedimento, fueron procesadas y montadas en preparaciones permanentes sobre las que se realizaron conteos valvares para determinar abundancia total y abundancia relativa de las especies identificadas. Se realizó un análisis de cúmulos por medio del programa TILIA que permitió identificar dos zonas de diatomeas principales (Zona II, 900aC a 900 d.C. y Zona I 900 a 1570 d.C.). Estas zonas también fueron identificadas en estudios previos de polen y partículas de carbón. Para el periodo 900 a.C. a 900 d.C. el análisis conjunto de estos elementos permitió establecer que las condiciones de este periodo fueron dominadas por factores climáticos, pero se identifica un evento de impacto humano durante el Preclásico, hacia los 500 a.C. El final de este periodo (200 a 900 d.C.) que corresponde con el Clásico, se identifica como una etapa de muy baja productividad en el lago, con niveles lacustres bajos y un aumento en *Quercus*, todo lo cual indica una etapa de condiciones menos húmedas. Para el periodo de 900 a 1570 d.C. resulta difícil separar los factores climáticos de los antropogénicos ya que ambos inciden en el lago. Se detectan dos etapas de impacto humano, un primer evento alrededor del año 1075 d.C. durante el Posclásico temprano y posteriormente un evento muy intenso perturbación que correlaciona con la llegada de los españoles (1540 a 1570). El registro polínico en estos dos eventos se caracterizan por una disminución de vegetación arbórea y un incremento de vegetación herbácea, el segundo evento de impacto humano es particularmente intenso y se caracteriza por un incremento muy marcado en la susceptibilidad magnética que sugiere una alta tasa de erosión.

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas naturales son complejos, multivariados y están simultáneamente expuestos a una gran variedad de factores estresantes cuyos efectos acumulativos son pobremente entendidos (De la Lanza, *et al.* 2000). Los ecosistemas tienen una gran diversidad de organismos que se pueden ver afectados por los impactos de actividades antropogénicas o de variabilidad climática, impactos que inducen cambios en la estructura de sus comunidades, afectando sus ciclos de vida, crecimiento y reproducción (Bartram y Ballace, 1996). Algunos organismos por ser más o menos tolerantes a ciertas condiciones ambientales, pueden proporcionar información sobre la naturaleza de los cambios físicos y químicos del medio en el que habitan (Laws, 1981).

Dentro de los organismos que pueden ser buenos indicadores de condiciones ambientales se encuentran las diatomeas. Estas algas pertenecen al reino protista y corresponden a la clase *Bacillariophyceae*. Son algas unicelulares con pigmentos fotosintéticos de color pardodorado que se caracterizan por la ausencia de flagelos. Su pared celular es silicificada y forma una frústula, la cual está compuesta por dos valvas (epivalva e hipovalva). Las diatomeas son organismos autótrofos por lo que se encuentran en la base de las cadenas de alimentación de muchos ecosistemas acuáticos. Son los productores primarios dominantes en algunos ecosistemas y juegan un papel muy importante en el ciclo del carbón, sílice y de otros nutrientes.

Las especies vivas son extremadamente sensibles a cambios físicos y químicos, por lo que proporcionan una herramienta para el estudio de la calidad del agua y para la reconstrucción de ambientes del pasado; esto se debe a que sus valvas se preservan en gran cantidad en los sedimentos lacustres. Por lo que el uso de diatomeas como indicadores de cambios en la calidad del agua (paleolimnología) es un método ampliamente aceptado. Las diatomeas han sido utilizadas exitosamente para reconstruir variables tales como salinidad, conductividad eléctrica, nutrientes y pH. Las condiciones paleolimnológicas como alcalinidad, salinidad, etc.; a su vez son un reflejo de las condiciones ambientales locales, como puede ser el clima (precipitación vs. evaporación), tasa de erosión, etc. (Street-Perrott y Harrison, 1985; Cohen, 2003), de manera que cambios en calidad de agua frecuentemente se pueden correlacionar con variaciones climáticas o impacto antropogénico.

2. JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos 2,000 años antes del presente (AP) la variabilidad climática y el impacto humano han sido factores importantes en el desarrollo de los ecosistemas en toda Mesoamérica. En varios sitios del centro y del occidente de México se presentaron condiciones húmedas y lagos relativamente altos hace unos 3,000 años AP y condiciones más secas entre 3,000 y 2,000 años AP, durante el periodo Preclásico (2500 a.C. a 200 d.C.) con un probable aumento de humedad hacia finales de este lapso (O'Hará *et al* 1994, Bradbury, 2000). Esto fue seguido de un periodo de creciente sequía que alcanzó su clímax entre los años 1,400 a 1,000 AP, es decir al final del periodo Clásico (550 a.C. al 900 d.C.) e inicios del Postclásico (900 d.C. a 1522 d.C.) de las culturas precolombinas, desde el centro-occidente de México hasta la península de Yucatán, es probable que estas condiciones de sequía hayan influido en el colapso de las civilizaciones del periodo Clásico hacia el año 900 d.C. (Hodel et al. 1995, Gill, et al. 2007)

En cuanto al impacto humano particularmente para Michoacán hay propuestas opuestas ya que se tienen dos corrientes de pensamiento, una que considera que la perturbación del paisaje y la erosión acelerada ocurrieron desde tiempos prehispánicos y otra que considera que estos fenómenos iniciaron con las prácticas agrícolas y pastoriles introducidas por los españoles a raíz de la conquista, mientras que las poblaciones prehispánicas no generaban un alto impacto en el ambiente (Vázquez, 2003).

En este trabajo se pretende documentar las variaciones limnológicas registradas en la Alberca de Tacámbaro durante los últimos 2,000 años e interpretarlas en función de los mecanismos causantes ya sea de variabilidad climática y/o de impacto humano en la región.

3. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

1.- Los cambios ambientales (ya sea de origen climático o antropogénico) que afectaron la región de Michoacán durante los últimos 2,000 años modificaron el sistema lacustre de la Alberca de Tacámbaro generando cambios en su nivel y características limnológicas que se reflejaron en recambios en las comunidades de algas, en especial las diatomeas.

2.-Por su ubicación altitudinal en el ecotono entre los climas templados y tropicales estos cambios serán mas claramente detectables en el sistema de la Alberca de Tacámbaro (es un sistema con menor resiliencia) que en otros sistemas lacustres de la región ubicados a mayor altitud (sistemas con mayor resiliencia).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Detectar y caracterizar los cambios registrados en el sistema lacustre de la Alberca de Tacámbaro durante los últimos 2,000 años, utilizando principalmente a las diatomeas como indicadores paleolimnológicos e integrar estos datos con estudios de indicadores biológicos (polen) y geoquímicos (susceptibilidad magnética y carbón orgánicos) así como con el modelo cronológico para inferir si estos cambios se deben a la variabilidad climática o impacto humano.

4.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Procesar las muestras obtenidas de los 2.25 m superiores del núcleo TAC06-III del lago La Alberca de Tacámbaro, Michoacán (25 muestras).
- Montar preparaciones permanentes con las muestras ya procesadas para continuar con su estudio al microscopio óptico.
- Identificar taxonómicamente las especies de diatomeas presentes en las preparaciones y realizar conteos de 300 valvas en cada preparación para determinar concentración absoluta y relativa.
- Tomar micrografías de las especies más abundantes en cada muestra.
- Mediante el uso de programas especializados realizar las graficas de abundancia relativa (%) de las especies y un análisis de cúmulos para identificar grupos de muestras con la misma composición de especies.
- Integrar el modelo cronológico a los datos de diatomeas para conocer la temporalidad de las variaciones identificadas.

- Comparar los datos de diatomeas con datos de polen, susceptibilidad magnética y de carbón orgánico previamente realizadas para determinar las condiciones y cambios del lago la Alberca de Tacámbaro.

5. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

5.1 FISIOGRAFÍA Y LOCALIZACIÓN

El territorio michoacano es uno de los más accidentados de México, presenta prominentes elevaciones y notables depresiones, estas características resultan de la convergencia de cinco grandes provincias geológicas que son: la Planicie Costera, la Sierra Madre del Sur, la Depresión del Balsas, la Faja Volcánica Transmexicana y la Altiplanicie Mexicana (Bocco et al. 1996).

El municipio de Tacámbaro de Codallos se localiza dentro de la Faja Volcánica Transmexicana, que es una provincia caracterizada por una intensa actividad volcánica durante el Neógeno que cruza a la República Mexicana a la altura del paralelo 19°N. Este municipio presenta un relieve muy variado donde se alternan montañas, valles, mesetas, barrancas profundas y pequeños conos volcánicos (Hernández Morales et al. 2009).

La Alberca de Tacámbaro es un lago cráter de origen volcánico, el cual se localiza al suroeste de la cabecera municipal de Tacámbaro de Codallos a 1,456 msnm, en las coordenadas 19° 12' 40"N y 101° 27' 30"W.

El lago se ubica en una depresión de forma aproximadamente elíptica, con el eje mayor orientado de SW a NE, correspondiendo a esta dirección la mayor diferencia de altura de los bordes. El borde SW aparece como una gran pared escarpada de 172 metros de altura sobre el nivel de las aguas que cubren el fondo de la cavidad, cuyos bordes van descendiendo gradualmente hacia el sur y hacia el norte (Ortiz Rubio, 1906).

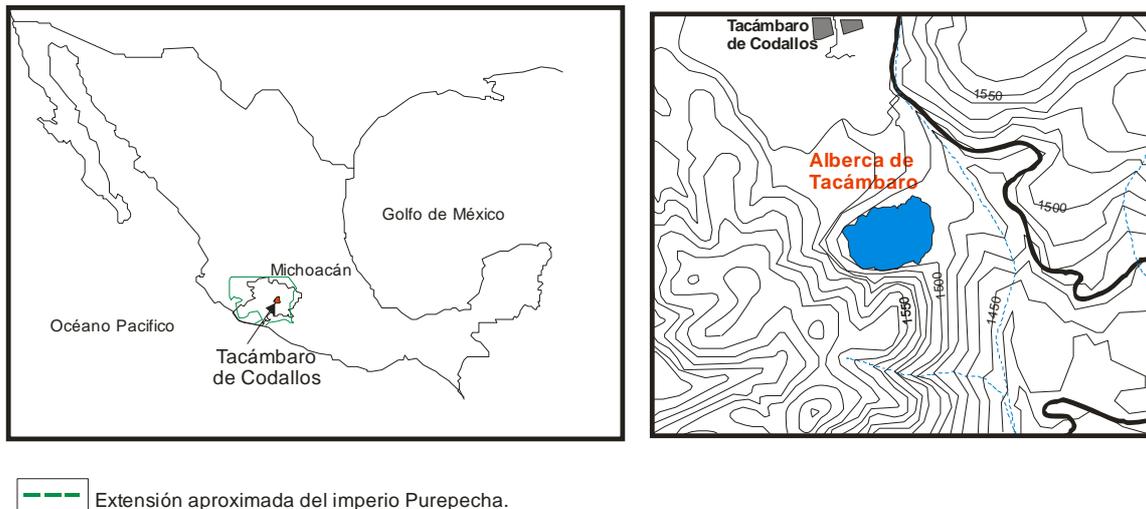


Figura 1. Localización del Lago La Alberca de Tacámbaro, Michoacán (Modificado de INEGI).

5.2 GEOLOGÍA

El cráter en el que se ubica la Alberca de Tacámbaro es parte de la expresión occidental de la Faja Volcánica Transmexicana, esta región se caracteriza por presentar predominantemente vulcanismo monogenético y se conoce como el “Campo Volcánico Monogenético Michoacán-Guanajuato”. La Alberca de Tacámbaro se ubica justo en el borde sur de este campo monogenético, en una región que ha sido considerada como la más activa durante el Holoceno (Guilbaud, 2012). En las cercanías de la Alberca de Tacámbaro afloran hacia el norte lavas del Pleistoceno cubiertas por el vulcanismo más reciente y hacia el sur rocas más antiguas, del Plioceno.

5.3 CLIMA

El clima que presenta el estado de Michoacán es muy variado, esto se debe a la relación de tres factores geográficos que son: los contrastes altimétricos del relieve, la presencia de una serie de cadenas montañosas que se alinean paralelas a la costa y que actúan como una barrera orográfica y su cercanía al mar lo cual proporciona vientos húmedos que provocan abundantes precipitaciones.

El estado se caracteriza por dos grandes áreas climáticas que son los climas templados de las zonas montañosas y los tropicales de las tierras bajas, Tacámbaro se sitúa justo en la transición entre ambos tipos de clima.

El tipo de clima que presenta en la zona de La Alberca de Tacámbaro es templado subhúmedo con lluvias en verano, los vientos presentes en la localidad tienen dirección sureste (Hernández Morales et al., 2009). La precipitación media anual es de 1,140 mm, la precipitación máxima mensual se da entre los meses de junio a septiembre, siendo julio el mes con mayor precipitación (290 mm) y la estación de secas se extiende de octubre a mayo. La Temperatura máxima anual es de 27.4 °C, siendo los meses de marzo a mayo los meses con mayor temperatura (29° a 31°C), los meses con menor temperatura (5 a 7° C) son diciembre a febrero (Servicio Meteorológico Nacional, 2000).

5.4 HIDROLOGÍA

El municipio de Tacámbaro pertenece a la región Hidrológica de la Cuenca del Balsas. La hidrografía está constituida por los ríos Tacámbaro, Pedernales y Frío, el Arroyo de Apo, la Laguna de la Magdalena y por el lago La Alberca de Tacámbaro (Gobierno del Estado de Michoacán, 2002).

5.5 VEGETACIÓN

La Alberca de Tacámbaro presenta una alta diversidad florística debido a que se encuentra en una zona climática transicional, con especies del bosque de coníferas, bosque mixto y selva baja caducifolia. Las especies del bosque coníferas son pino (*Pinus sp.*) y oyamel (*Abies religiosa.*). Las especies del bosque mixto son pino (*Pinus sp.*), encino (*Quercus sp.*) y cedro (*Cedrus sp.*). Las especies para la selva baja son parota (*Enterolobium cyclocarpum.*), cueramo (*Cordia elegnoides DC.*), ceiba (*Ceiba sp.*) y huisache (*Acacia sp.*) (Bastida y Sánchez. 2008).

5.6 ARQUEOLOGÍA-HISTORIA

El occidente de México, conformada por una enorme extensión que abarca casi en su totalidad los actuales estados de Nayarit, Colima, Jalisco Sinaloa y Michoacán, es una de las áreas menos estudiadas desde el punto de vista arqueológico. Esta región está dividida en varias sub aéreas donde se desarrollaron diversas culturas locales.

Antes del año 2000 a.C. el patrón de asentamiento fue disperso y sin grandes concentraciones humanas, se asentaban junto a los recursos que necesitaban y conformaban unidades político-sociales que controlaban territorios no muy amplios. Hacia el 2000 a.C.

hubo una penetración cultural, procedente de la Costa del Golfo que contaba ya con un bagaje cultural desarrollado. Hacia el año 1200 d.C. llegan a Michoacán los uacúsechas (posiblemente de origen Sudamericano) que se establecieron en los alrededores del lago de Pátzcuaro y que posteriormente darían paso al desarrollo de la cultura Purépecha o Tarasca durante el siglo XIV (Ávila Aldapa, 2002).

La cultura Purépecha o Tarasca se desarrolló en el postclásico dominaba la región de Michoacán a la llegada de los españoles, los Tarascos tuvieron asentamientos importantes (Pátzcuaro, Ihuaitzio y Tzinzunsan), principalmente en la zona conocida como la Meseta Tarasca delimitada por el Eje Volcánico Transversal que presenta un clima templado y cuenta con los lagos de Patzcuaro, Cuitzeo y Zirahuén. También ocuparon parte de la región de Tierra Caliente alrededor del 1440 d.C. (Pollard, 2004)

El pueblo purépecha fue conquistado por los españoles en el 1530 d.C. (Ávila Aldapa, 2002, Pollard 2004.). Se cree que para el momento de la conquista la mayor parte de la cuenca del lago de Patzcuaro ya se había modificado para maximizar la producción de alimentos. A principios del periodo hispano la población aquí como en otras partes del centro de México se desplomó catastróficamente en gran parte como resultado de las enfermedades europeas (Metcalf *et al*, 2006). Específicamente en el poblado de Tacámbaro los misioneros Diego de Chávez y Juan de San Román se establecieron hacia 1538, cuando este poblado se convirtió en un centro de evangelización. Durante la segunda mitad del siglo XVIII hubo una mayor degradación de los recursos, posiblemente por la combinación de causas sociales y naturales ya que se presentó un aumento en la población indígena que fue empujada a las zonas marginales, de tierras frágiles y la monopolización de los recursos por parte de las haciendas (Vázquez, 2003).

6. MATERIAL Y MÉTODO

6.1 MÉTODO DE CAMPO

En diciembre del 2006 un equipo de trabajo bajo la dirección de la Dra. Beatriz Ortega del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México recolectó un núcleo del lago de Tacámbaro con una longitud de 8.38 m, denominado TAC06 III (101° 27.5' W y 19° 12.7' N). Este núcleo se obtuvo utilizando un sistema de perforación tipo Usinger que consiste en un tubo nucleador con pistón y un sistema de extensiones y varillas internas que controlan la profundidad del tubo muestreador y del pistón. Los tubos nucleadores son de acero inoxidable, de 1 o 2 m de longitud y con un diámetro de 8 ó 5 cm. El sistema se montó y operó en una plataforma de perforación sobre un tirante de agua de 21 m.

6.2 MUESTREO, DESCRIPCIÓN Y FECHAMIENTO DEL NÚCLEO

De los tubos muestreados se procedió a extraer el sedimento contenido en éstos mediante un embolo del mismo diámetro del tubo muestreador utilizado, durante la extracción el sedimento se seccionó en mitades longitudinales que se colocaron en canales de PVC. Los tramos de sedimento de 2 m fueron seccionados en tramos de 1 m, donde se obtuvieron dos tramos con la misma numeración pero una inferior y el otro superior.

Cada una de las secciones obtenidas fue fotografiada y descrita por la Dra. Beatriz Ortega, la descripción incluye la identificación de color, el tipo de sedimento (fino o grueso) que lo forma y los horizontes de cenizas volcánicas presentes. De las secciones se tomaron muestras de seis horizontes seleccionados para realizar fechamientos por radiocarbono (AMS) en extracto de polen en un laboratorio comercial (Beta Analytic) con el objetivo de contar con un marco cronológico para esta secuencia.

El método de radiocarbono (AMS) consiste en separar químicamente el carbón del resto de la muestra, obteniendo grafito. Después el grafito es ionizado para transformar los átomos de carbón en iones negativos, los cuales son acelerados en un espectrómetro de masas y separados por su peso atómico permitiendo determinar el número relativo de átomos de cada uno de los isótopos de carbono (Beramendi *et al*, 2011). Dado que se asumen constantes las proporciones del isótopo radiogénico del carbono (¹⁴C) en el momento de la muerte de todo organismo, la proporción medida en la materia orgánica en estudio

determina el tiempo transcurrido desde que el sistema se cerró (el organismo murió) en función de la vida media de este isótopo (5568 ± 40 años).

Cada una de las secciones obtenidas se muestreó aproximadamente a cada 5 cm. Para la recolección de estas muestras se utilizó un mini-nucleador de forma cuadrada que extrae 1 cm^3 de muestra. De esa manera se obtuvieron muestras de los mismos horizontes para estudios de diatomeas, polen y contenido de carbón orgánico. Las muestras obtenidas se colocaron en frascos, se etiquetaron respectivamente con la clave del núcleo, el tramo al que pertenecen y la profundidad dentro del tramo. Para susceptibilidad magnética se colectaron otra serie de muestras cada cinco cm con cubos de acrílico de dos cm de lado y se etiquetaron de la misma manera.

Las muestras para análisis de diatomeas y de carbón orgánico se congelaron, una vez congeladas se colocaron en una liofilizadora para eliminar el agua por medio de sublimación.

6.3 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

El estudio de susceptibilidad magnética de los núcleos recuperados del lago de Tacámbaro fue realizado por la Dra. Beatriz Ortega del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. La susceptibilidad magnética se midió en los cubos de 2 cm de lado con un susceptibilímetro Bartington y se expresa en unidades de $10^{-5} k \text{ SI}$ (Sistema Internacional). En el presente trabajo se utilizaron los datos de susceptibilidad magnética para los primeros 2.25m de la secuencia.

La susceptibilidad magnética es una medida de la facilidad con que un material adquiere magnetización cuando es sometido a un campo magnético externo, esto se expresa matemáticamente mediante la fórmula $M = k H$, donde M es la intensidad de la magnetización de la muestra, H es la intensidad del campo magnético aplicado y k es la susceptibilidad de la muestra; dado que $k = M / H$ y ambas variables tienen las mismas unidades, este parámetro es adimensional. La susceptibilidad magnética depende, entre otras cosas, del tipo de minerales magnéticos presentes, el tamaño y forma de los granos y sus concentraciones (Stephen et al. 1991). Dado que la susceptibilidad magnética de los sedimentos lacustres será mayor mientras mayor sea la concentración de partículas

magnéticas y dado que este tipo de partículas son normalmente transportadas hacia el lago desde las rocas y suelos circundantes por el acarreo de la escorrentía superficial (erosión), el análisis de esta variable se puede interpretar como una medida del aporte sedimentario hacia la cuenca, esto es, una medida de la intensidad de la erosión.

6.4 CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO

El análisis del contenido de materia orgánica fue realizado por la Dra. Beatriz Ortega en el laboratorio Limnological Research Center de la Universidad de Minnesota. La materia orgánica es la fracción del sedimento que está compuesta por residuos de origen vegetal y animal en diferentes estados de descomposición y que están sometidos a un constante proceso de transformación y síntesis (Fassbender y Bornemisza, 1987). En los sedimentos lacustres su origen puede ser autóctono (productividad dentro del lago) o alóctono (proveniente del suelo y vegetación en la cuenca). La determinación cuantitativa de la materia orgánica del sedimento se hace mediante la determinación de carbón total sin embargo en los sedimentos lacustres el carbón también puede existir en forma de carbonatos.

- **Carbón Total:** (CT) se define como todo el carbón presente en la muestra de sedimento.
- **Carbón Inorgánico Total:** (CIT) es todo el carbón presente como carbonato en el sedimento.
- **Carbón Orgánico Total:** (COT) es todo el carbón presente como materia orgánica disuelto en el sedimento.

Para determinar la cantidad de COT primero se mide el carbón total (CT) que se obtiene de quemar un poco de sedimento a 950°C y el CO₂ se mide en un coulómetro (IIC 5020). A este valor se le debe restar el valor de carbón Inorgánico (CIT). El CIT se determina por medio de una digestión ácida en la que se mide en un coulómetro el CO₂ generado. Para obtener el COT se resta CT- CIT.

6.5 ANALISIS DE DIATOMEAS

Para la extracción de las 25 muestras de diatomeas se pesaron 0.5g de sedimento seco para cada muestra en vaso de precipitado de 150 ml, se le agregaron 10 ml de HCl al 10% para la eliminación de carbonatos y se procedió a calentar por 20 min, después de concluida la reacción con HCl se agregaron 30 ml de peróxido de hidrogeno, con la finalidad de eliminar la materia orgánica presente en el sedimento y se colocaron las muestras en una parrilla de calentamiento, hasta que el peróxido de hidrógeno terminara de reaccionar con la materia orgánica presente.

Terminada la reacción se agregaron 10ml de ácido nítrico, con la finalidad de eliminar el resto de materia orgánica presente. Terminada la reacción con ácido nítrico se retiraron las muestras de la parrilla de calentamiento y se les agregó una gota de Extran (pirofosfato de sodio) y se aforó al máximo volumen. Se dejaron sedimentar por 12hrs y se procedió a decantar mediante una línea de vacío, se repitió el proceso hasta obtener un pH neutro, una vez alcanzado el pH se vertieron a una botella de 30ml.

Para el montaje de las muestras se tomó del frasco de 30ml un alícuota de 1ml y se realizaron pruebas de dilución 1:5, 1:10, 1:50, esto con la finalidad de observar con qué tipo de dilución se tiene una mejor dispersión de las diatomeas, una vez definida la dilución adecuada se tomó una alícuota de 200µl con una micro-pipeta, se montaron en un cubre-objetos, teniendo cuidado de no desbordar la alícuota y se dejaron reposar por 12hrs para que el agua contenida se evapore. Las preparaciones se montaron con la resina Naphrax (índice de refracción 1.65) y se etiquetaron.

Las preparaciones se observaron en un microscopio óptico OLYMPUS BX50 con el objetivo de 100x. En cada preparación, se realizaron de uno a cuatro conteos diametrales (transectos) estableciendo un conteo mínimo de 300 diatomeas. Para su identificación taxonómica se tomaron fotografías utilizando una cámara DP2-BSW OLYMPUS y su programa de manejo de imágenes.

Los datos obtenidos de los conteos de las preparaciones se introdujeron en una matriz especies vs. muestras. Esta matriz se procesó mediante el programa TILIA (Grimm 2004) para transformar los datos de abundancia de especies a porcentajes del conteo total

(abundancia relativa) en cada muestra. En esta matriz también se incluyeron los datos de abundancia total de diatomeas por gramo de sedimento seco (diatomeas/gss), los cuales se derivaron de la formula:

$$\text{Diatomeas por } 10^6 \text{ en 1g de sedimento} = \frac{Pt [(A)Vt (f)]}{[(a)(Vpp)(x)]}$$

Pt = diatomeas promedio por transecto

A = área del cubreobjetos

Vt = volumen final (30ml)

a = área del campo visual del transecto

Vpp = alícuota de la preparación

f = dilución

x = g iniciales de sedimento (0.5g)

Mediante el uso del programa TILIA también se elaboraron las gráficas de abundancia relativa de las especies vs. profundidad que permiten ver de manera grafica la distribución de los taxas en la secuencia del núcleo. Mediante la sub-rutina CONISS de TILA (Grimm 2004) se realizó un análisis de cúmulos lo que permitió identificar los grupos de muestras que comparten un mismo conjunto de diatomeas y así dividir la secuencia estudiada en zonas o etapas con conjuntos de diatomeas característicos y por lo tanto condiciones limnológicas distintas.

6.6 PALINOLOGÍA Y PARTÍCULAS DE CARBÓN

El estudio de polen lo realizó la M. en C. Yajaira de los Ángeles Sánchez Dzib, bajo la dirección de la Dra. Socorro Lozano, en el laboratorio de Paleoambientes del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Para este estudio se procesaron 81 muestras, a cada 10cm, que fueron tratadas con HCl (10%) y HF(48%) para eliminar carbonatos, materia orgánica y silicatos respectivamente (Sánchez Dzib, 2011), las muestras fueron observadas al microscopio, teñidas con safranina, y montadas con gelatina glicerizada en preparaciones selladas con barniz transparente. En esta tesis solo se

utilizaron los datos palinológicos de los 2m superiores de la secuencia sedimentaria TAC06III.

El método palinológico se basa en que solo una fracción de los granos de polen cae en la parte materna de la flor y fertiliza el ovulo. La mayoría del polen cae a la tierra o agua donde sufren descomposición, a menos de que este caiga en un ambiente sedimentario anoxico donde se pueda preservar sin sufrir procesos de oxidación, como lo es el sedimento que se acumula en el fondo de un lago. Durante el proceso de sedimentación el cuerpo blando de las células del polen se pierden y el polen fósil solo conserva una capa de exina (esporopolenina) (Islebe, 1999).

El análisis polínico proporciona una visión a la dinámica de dispersión y cambios en la distribución de las especies arbóreas, la ascendencia, el desarrollo y la continuidad de las comunidades de plantas modernas y biomas, así como la sensibilidad y la respuesta de los mecanismos de las plantas y la vegetación a variaciones climáticas así como la influencia de los seres humanos en la vegetación (Seppä, 2007).

7. RESULTADOS

7.1 ESTRATIGRAFÍA, SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA Y CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO

La descripción de la estratigrafía de la secuencia TAC06-III, así como los resultados de susceptibilidad magnética y contenido de carbón orgánico fueron realizados y proporcionados por la Dra. Beatriz Ortega del Instituto de Geofísica de la UNAM. Estos datos se describirán brevemente a continuación. La secuencia completa (8.38 m) fue dividida en tres unidades, de las cuales solo la unidad 1 y la parte superior de la unidad 2 corresponden con los primeros 2.25 m que se reportan en esta tesis (Fig. 2).

Unidad II (5.37 a 0.84m): la parte de esta unidad analizada en esta tesis (2.24 a 0.84 m) está formada por sedimentos biogénicos de grano fino (limo) finamente laminados, principalmente por restos de esponjas, diatomeas y abundante materia orgánica. El contenido de carbón orgánico es en general alto (>10%) mientras que la susceptibilidad

magnética es baja ($<100 \text{ k SI} \times 10^{-5}$). En el tramo analizado de esta unidad existe solamente una delgada capa de ceniza volcánica a los 1.30 m.

Unidad I (0.84 a 0.0 m): Esta unidad presenta sedimentos laminados con un cambio de textura a los 0.54 m; por debajo de este nivel el sedimento es limo-arcilloso volviéndose limo-arenoso por arriba de esta profundidad. Esta unidad muestra valores bajos de carbono orgánico ($<5\%$) y se caracteriza por un incremento marcado en la susceptibilidad magnética ($>400 \text{ k SI} \times 10^{-5}$) llegando a tener valores de hasta $681 \text{ k SI} \times 10^{-5}$. Esta unidad presenta una delgada capa de ceniza volcánica a los 0.81 m.

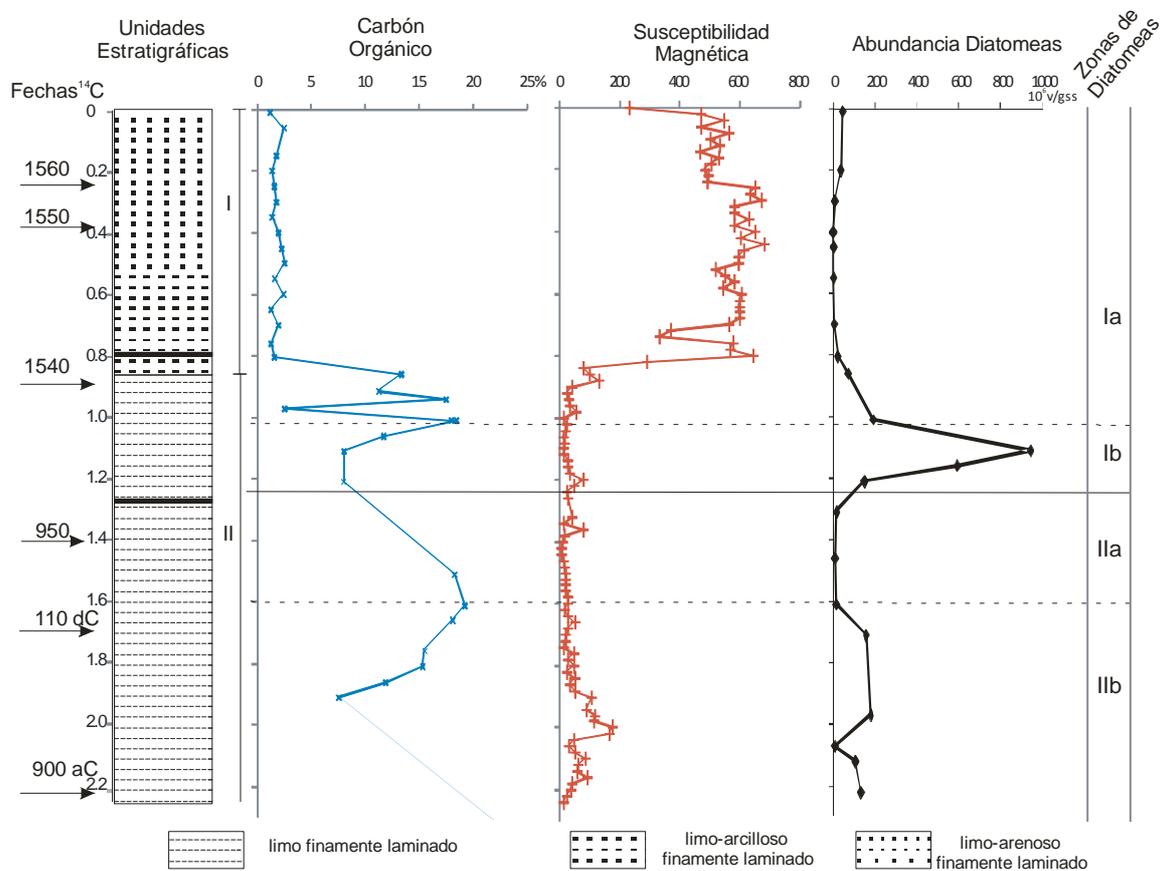


Figura 2. Fechamientos de radiocarbono, unidades estratigráficas, contenido de carbón orgánico, susceptibilidad magnética y abundancia total de diatomeas en los primeros 2.25 m del núcleo TAC06III, Alberca de Tacámbaro, Michoacán.

7.2 MARCO CRONOLÓGICO

Se cuenta con seis fechamientos de radiocarbono para los primeros 2.24 m de la secuencia (Tabla 1) a partir de los cuales se puede construir un marco cronológico sólido. Inicialmente se consideró que habría un error de fechamiento dado que las fechas más superficiales arrojaban edades más antiguas de lo esperado. Es por ello que en marco cronológico presentado en Sánchez Dzib (2011) se consideró que los fechamientos Beta 275148 (0.22m) y Beta-258661 (0.38m) eran erróneos y fueron descartados. Un análisis más detenido de la secuencia permitió identificar que ésta se encuentra “descabezada”, esto es, que no tiene los sedimentos más recientes, que pudieron haber sido removidos debido a su baja consolidación por las corrientes de agua generadas durante las maniobras de perforación. Con esta nueva aproximación se considera que todas las fechas son correctas y se construyó un nuevo modelo de edad que permite asignar a la base de la sección estudiada en esta tesis la fecha de 900 a.C. (Tabla 1). De acuerdo a este modelo de edad la transición entre la Unidad 2 y la Unidad 1 (0.84 m) y la ceniza correspondiente a los 0.81 corresponden a una edad cercana al año 1540, mientras que la ceniza volcánica a los 1.30 m data en una edad cercana al año 800 d.C. Dentro de la secuencia analizada se detecta un cambio brusco en la tasa de sedimentación, de un valor de aproximadamente 0.40 a 0.50 mm/año para los sedimentos por debajo de los 0.84 m (Unidad 2) a un valor de entre 16 a 51 mm/ año para las sedimentos por arriba de este horizonte Unidad 1 (Tabla 1). La cima de la secuencia se estima que data del año 1570 d.C.

Clave de laboratorio	Prof. (m)	Materia fechado	Edad ¹⁴ C (AP)	Edad Calibrada (años dC/aC)	±2 σ	Tasa de acumulación (mm/año)
Beta-275148	0.22	polen	320±40	1560 dC	±100	16.00
Beta-258661	0.38	polen	330±40	1550 dC	±100	51.00
Beta-258662	0.89	polen	370±40	1540 dC	±100	0.86
Beta-227820	1.4	macroresto	1090±40	950 dC	±70	0.36
Beta-232517	1.7	polen	1910±40	110 dC	±100	0.53
Beta-237600	2.24	polen	2730±50	900 aC	±95	

Tabla 1. Muestras fechadas por el método de radio carbono (MAS) obtenidas del núcleo TAC06-III proveniente del lago "La Alberca" Tacámbaro Michoacán.

7.3 DIATOMEAS

Durante el análisis de núcleo TAC06-III se identificaron 33 especies de diatomeas, de las cuales las más abundantes (>10%) fueron:

- *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (O.Müller) Simonsen 1979*
- *Cocconeis placentula* var. *linneata* (Ehrenberg) Van Heurck 1885*
- *Discostella stelligera* (Cleve & Grunow) Houk & Klee 2004*
- *Encyonema silesiacum* (Bleisch) D.G.Mann 1990
- *Fragilaria capucina* Desmazières 1830
- *Gomphonema* spp.*
- *Navicula cryptotenella* Lange-Bertalot 1985
- *Navicula radiosa* Kützing 1844.
- *Navicula veneta* Kützing 1844
- *Nitzschia acicularis* (Kützing) W. Smith 1853
- *Ulnaria delicatissima* (W.Smith) M.Aboal & P.C.Silva 2004*
- *Ulnaria ulna* (Nitzsch) P.Compère 2001

En el apéndice se presenta la descripción detallada y morfometría de las principales especies encontradas en la secuencia (>30% marcadas con * en el listado anterior), las cuales también se ilustran en la lámina 1.

El análisis de cúmulos realizado con la subrutina CONISS del Programa Tilia (Grimm, 2004) permitió identificar dos zonas de diatomeas principales, cada una caracterizada por la dominancia de una diatomea planctónica principal; la zona II (900aC a 900dC, 2.24 a 1.26 m) está dominada *Ulnaria delicatissima* mientras que la zona I (900 a 1570 dC, 1.26 a 0.00 m,) se encuentra dominada por *Discostella stelligera* (Fig. 3).

Zona de diatomeas II (2.24 - 1.26 m; 900 a.C. – 900 d.C., Fig. 3): Esta etapa se caracteriza, por la dominancia de la especie planctónica *U. delicatissima* (20 a 80%) y por una

abundancia total de diatomeas media a baja ($< 200 \times 10^6$ v/gss). Las diatomeas perifíticas que acompañan a *U. delicatissima* son porcentajes variables de *Gomphonema* spp., *Navicula cryptotenella*, *Navicula radiosa*, *Navicula veneta* y *Nitzschia acicularis*. La parte más antigua de esta zona (sub-zona IIb: 900 a.C.- 200 d.C., 2.22 a 1.60 m) presenta una abundancia total de diatomeas que en general oscila entre 100 y 200×10^6 v/gss y una abundancia relativa de *U. delicatissima* $\geq 50\%$. En la parte más reciente (sub-zona IIa: 200 a 900 d.C., 1.60 a 1.26 m;) la abundancia total de diatomeas es $< 20 \times 10^6$ v/gss y la abundancia relativa de *U. delicatissima* disminuye a $< 40\%$, por lo que las especies perifíticas de los géneros *Gomphonema*, *Navicula* y *Nitzschia* tienen un mayor representación.

Zona de diatomeas I (1.26 a 0.0 m; 900 – 1570 d.C., Fig. 3): Se caracteriza, además de la dominancia de la especie planctónica *Discostella stelligera* (30 a 90%), por una recuperación en la abundancia de diatomeas que alcanzan sus valores máximos en ésta zona. En la parte inicial (Ib: 900 a 1300 d.C., 1.25 a 1.05 m;) *Aulacoseria granulata* var. *angustissima* es la principal acompañante de *D. stelligera* aunque también se registra *U. delicatissima*; es en esta sub-zona cuando se alcanzan los valores más altos de abundancia de diatomeas (943×10^6 v/gss). En la segunda parte de esta zona (Ia: 1300-1570 d.C., 1.05 a 0.0 m;) vuelve a disminuir la abundancia total de diatomeas ($< 20 \times 10^6$ v/gss) y *D. stelligera* es acompañada principalmente por *Cocconeis placentula* var. *linneata*, aunque también hay porcentajes importantes de *U. delicatissima*.

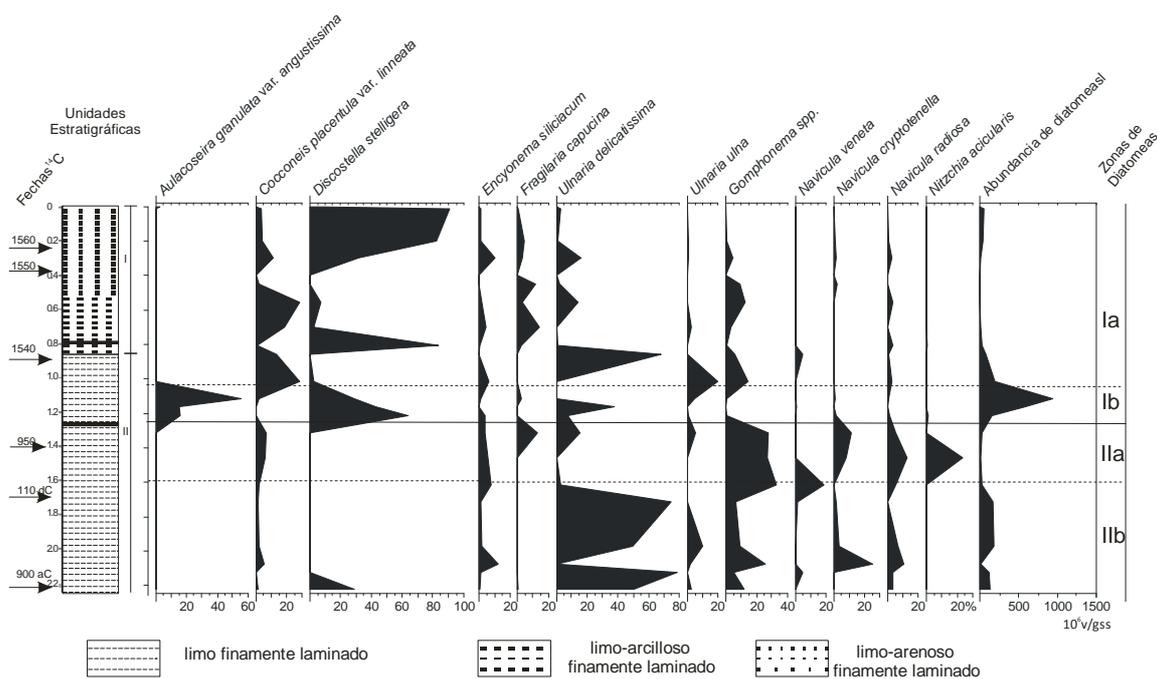


Figura 3. Distribución estratigráfica de los principales taxones de diatomeas (>10%) identificados en los primeros 2.25 m del núcleo TAC06III, Alberca de Tacámbaro, Michoacán.

7.4 PALINOLOGÍA Y PARTÍCULAS DE CARBÓN

El análisis de polen, palinomorfos y partículas de carbón de la secuencia de Tacámbaro fue realizado por Sánchez Dzib (2011). Como ya se comentó el modelo cronológico usado en ese trabajo ha sido modificado y por lo tanto en esta sección se hará una breve descripción del comportamiento de los principales taxa identificados por Sánchez Dzib (2011) y del contenido de partículas de carbón en el marco del nuevo modelo de edad. Sánchez Dzib (2011) identificó tres zonas polínicas en toda la secuencia TAC06III, de las cuales la sección reportada en esta tesis (<2.24 m) corresponde con la parte superior de la zona II (3.67 a 1.26 m) y a la zona I (1.26 a 0.0 m). Cabe destacar que el horizonte de 1.26 m también es el que separa las zonas de diatomeas I y II por lo que hay buena correlación entre ambos tipos de análisis.

Zona polínica II (3.67 – 1.26 m). La parte superior de esta zona (2.25 a 1.26 m) corresponde precisamente con la zona de diatomeas II identificada en el registro de diatomeas con una temporalidad de entre 900 a.C. – 900 d.C. Esta zona se caracteriza por

un contenido polínico elevado, dominado por taxa arbóreas (>75%) como *Pinus*, *Quercus* y *Alnus*. En la muestra correspondiente a 2.02 m (500 a.C. en la nueva cronología) el registro de *Pinus* se distingue por una disminución muy marcada. Las partículas de carbón tienen concentraciones elevadas en esta zona (ca. 6,000 a 8,000 partículas/cm³). El registro local es pobre y solo hay un pico de abundancia de algas (*Botryococcus*, *Senedesmus* y *Tetraedron*) hacia la cima de la zona.

Zona polínica I (1.26 a 0 m). Esta zona corresponde precisamente con la zona de diatomeas I y que según el nuevo modelo de edad corresponde entre 900 a 1570 d.C. De acuerdo a Sánchez Dzib (2011) esta zona se caracteriza por niveles bajos de polen arbóreo (ca. 60%), en particular el polen de *Pinus* tiene concentraciones variables, con marcadas disminuciones en la muestra 1.16m (1075 d.C. en la cronología corregida) y entre 0.7 y 0.3m (1544 a 1555 d.C. en la cronología corregida). Los otros elementos arbóreos como *Quercus* y *Alnus* muestran valores bajos y decrecientes, mientras que elementos herbáceos como las Asteraceae y Poaceae son altos (ca. 35%). Las partículas de carbón presentan un pico al inicio de la zona después de lo cual presentan valores bajos (< 2,000 partículas / cm³). El registro local es pobre, los únicos elementos reportados son *Testaceae* y, en la base de la zona, *Anabaena*.

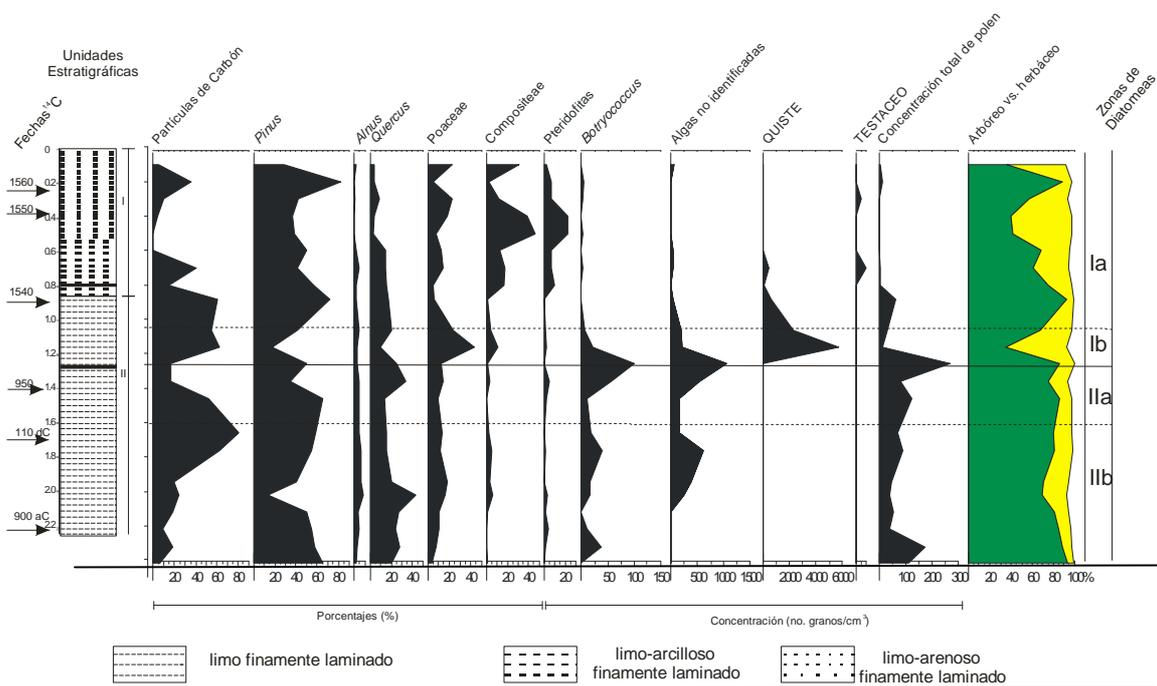


Figura 4. Distribución estratigráfica de las partículas de carbón y los principales taxones de polen y palinomorfos identificados en los primeros 2.25 m del núcleo TAC06III, Alberca de Tacámbaro, Michoacán

8. DISCUSIÓN

El análisis taxonómico de las especies de diatomeas de los primeros 2.25 m del núcleo TAC06-III permitió identificar las especies más importantes (>30%) y que mayor información ecológica aportan. El análisis de los datos obtenidos del estudio de diatomeas en conjunto con los de susceptibilidad magnética, contenido de materia orgánica, polen y partículas de carbón, permitió generar una interpretación de los cambios climáticos y antropogénicos que se presentaron en la región del lago La Alberca, en Tacámbaro Michoacán, identificando dos etapas principales de cambio ambiental con dos sub etapas cada una. Dado que las zonas de diatomeas y de polen son muy similares en el resto del texto se hablará de las etapas II (sub-etapas IIb y IIa) y I (sub-etapas Ib y Ia), dando por entendido que la división entre estas etapas se basa tanto en el registro de diatomeas como en el de polen y palinomorfos.

Etapa II (2.24 – 1.26m; 900 a.C. – 900 d.C.): El registro polínico de esta etapa indica que el tipo de vegetación en la zona correspondía a un bosque de pino-encino, este tipo de bosque representa un clima templado (Cw); se puede distinguir una pérdida de vegetación arbórea por la disminución de polen en esta unidad aunque esta disminución no es muy considerable, podría representar una variación en las condiciones climáticas de la región.

El registro de susceptibilidad magnética muestra valores bajos lo que indica que el aporte de sedimento de la cuenca hacia el lago (erosión) también fue bajo. Una baja erosión sugiere que el impacto humano durante esta etapa fue bajo, lo que es consistente con el registro arqueológico, ya que esta etapa abarca los periodos culturales del Pre-Clásico y el Clásico durante los cuales en esta región todavía no se daba el desarrollo de la cultura Purépecha. Sin embargo, hacia el año 500 d.C. se detecta un evento en el que tanto el polen como las diatomeas marcan una alteración del sistema, con una disminución marcada en la abundancia de diatomeas en el lago, en especial de *Ulnaria delicatissima*, que es seguida por una disminución en el polen de pino. Dado que este evento está asociado a un leve aumento en la susceptibilidad magnética es posible que corresponda con un evento corto de deforestación y erosión.

En el lago los porcentajes relativamente altos de carbón orgánico sugieren una alta productividad, sin embargo esto se contradice por los valores medios a bajos de abundancia de diatomeas y de algas en general dan una idea de una productividad biológica limitada sobre todo durante el intervalo entre 200 a 900 d.C. (etapa IIa: 1.60 a 1.26 m) cuando la abundancia de diatomeas es muy baja. El alto contenido de materia orgánica puede ser un reflejo de una baja tasa de degradación en el fondo debido a condiciones de anoxia (condición muy común en el lago actualmente). La dominancia de la especie *Ulnaria delicatissima*, una especie con una relación área/volumen elevada, indica que el lago presentaba una estratificación muy marcada, con poca mezcla vertical lo que pudo haber favorecido una pobre recirculación de nutrientes del fondo a la superficie, lo que explica la baja productividad biológica, así como una pobre distribución del oxígeno de la superficie al fondo, lo que explica la preservación del carbono orgánico. Entre 200 a 900 d.C. la productividad del lago fue particularmente baja, con la desaparición de las especies planctónicas en la columna de agua y un aumento en las especies periféricas como

Gomphonema spp. Todo esto sugiere una disminución en la profundidad de la columna de agua del lago durante esta etapa que corresponde con el Clásico (200 a 900 d.C.). También se nota un aumento de *Quercus*, una especie más tolerante a condiciones de sequía.

Tanto el polen como las diatomeas sugieren entonces que el Clásico fue una etapa de clima relativamente cálido con nivel lacustre bajo. Diversos estudios sostienen que en sitios del centro y occidente de México al final del Clásico se presentaron condiciones de creciente sequía que alcanzó su clímax con un evento de sequía marcado que se ha asociado con el colapso de la cultura Maya y que marca el final del periodo Clásico (Hodell et al. 1995; Vázquez, 2003). En el registro de Tacámbaro no se tiene evidencia de un evento más marcado de sequía, pero sí de un periodo largo de condiciones extremas en el lago que limitaron su productividad. Hacia el final de esta etapa se tiene el registro de especies de micro algas como *Botryococcus*, *Scenedesmus* y *Tetraedon*, estas especies de clorofitas se encuentran en cuerpos de agua someros como estanques y lagos, y se desarrollan en condiciones con altas concentraciones de nutrientes y degradación de materia orgánica, que marcan el final de esta etapa.

La Etapa I (1.26 – 0m, 900 d.C. a 1570 d.C.): El registro de diatomeas en esta etapa está dominado por la especie planctónica *Discostella stelligera*, acompañado inicialmente por *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (Ib) y posteriormente por *Cocconeis placentula* (Ia). *Discostella stelligera* es una especie perifítica-planctónica, característica de ambientes con un pH alrededor de 7.5 a 8.5 con altas concentraciones de nutrientes (eutróficos), y tolerante a la turbidez y a grandes concentraciones de sedimentos en suspensión (Lowe, 1974, Bahls et al, 1984). *Aulacoseira granulata* es una especie que requiere una elevada cantidad de nutrientes y que se desarrolla en los periodos en que la estratificación termal de un lago se rompe provocando que las aguas del fondo ricas en nutrientes se mezclen con el agua superficial (Wang et al, 2008). Esta combinación de especies indica que Tacámbaro presentaba estratificación térmica durante los periodos cálidos (máximo en *Discostella stelligera*) y una mezcla eficiente en el invierno (máximo en *Aulacoseria granulata* var. *angustissima*), durante la cual los nutrientes del fondo puedan recircular y favorecer mayor abundancia de diatomeas como la registrada al principio de esta etapa (etapa Ib). Durante esta sub-etapa (Ib) se detecta una disminución en el polen arbóreo y un incremento en el

polen de pastos (Poaceae) hacia el año 1075 d.C. que indica un segundo evento de impacto humano en el Postclásico temprano, antes del establecimiento de la cultura Purépecha en el territorio que hoy es Michoacán. Estudios similares en el lago de Pátzcuaro han documentado periodos de impacto humano que se encuentran relacionados con el desarrollo del cultivo de maíz y la deforestación ocasionada por la expansión de la agricultura ocasionaron un incremento en la erosión que se evidenció en un aumento en la sedimentación en el lago (Vázquez, 2003).

Hacia el año 1540 d.C. (etapa Ia) la abundancia de diatomeas decrece, desaparece del registro *A. granulata* var. *angustissima*, y se da un aumento en *Cocconeis placentula* que es una especie que se desarrolla en aguas con contenido de nutrientes altos y que sugiere que el nivel del lago era relativamente somero ya que esta especie habita adherida al sustrato. Este cambio en las diatomeas está asociado a un aumento muy marcado en susceptibilidad (de <100 a >500 SI) y a una disminución en el polen arbóreo con un aumento en el polen de herbáceas (Asteraceae). Este momento está ligado de manera muy cercana con la llegada de los españoles, quienes se establecieron en Tacámbaro aproximadamente en 1538, cuando este poblado se convirtió en un centro de evangelización.

9. CONCLUSIONES

El análisis conjunto de susceptibilidad magnética, contenido de materia orgánica, diatomeas, polen y partículas de carbón permiten dividir el registro estudiado en dos etapas cada una con dos sub-etapas: Iib: 900 a.C. a 200 d.C. (Preclásico, 2.22 a 1.60m); Iia: 200 a 900 d.C. (Clásico, 1.60 a 1.25m); Ib: 900 a 1300 d.C., (Postclásico temprano 1.25 a 1.05m); Ia: 1300 a 1570 d.C. (Postclásico tardío-apogeo Purépecha y Conquista, 1.05 a 0m)

Durante toda la Etapa II (Preclásico y Clásico) los datos indican que los factores que afectaron las condiciones del lago fueron principalmente de origen climático aunque se detectó un breve evento de impacto antropogénico hacia el año 500 a.C. (Preclásico). La señal climática marca una etapa de clima más seco durante el Clásico con un lago más somero entre 200 y 900 d.C. (Etapa Iia). Estas condiciones climáticas favorecieron que el lago permaneciera fuertemente estratificado, limitando la recirculación de nutrientes y con ello la productividad del mismo.

Durante el Posclásico temprano (etapa Ib, 900 a 1300 d.C.) es difícil determinar si los factores que afectaron las condiciones del lago fueron de tipo climático o antropogénico. Los datos indican que el lago tuvo un cambio hacia un patrón de circulación más eficiente y un aumento en la productividad, este cambio parece estar relacionado con el fin de las condiciones de sequía que dominaron el Clásico. Sin embargo se registra otro evento de impacto humano hacia el año 1075dC, que predata el apogeo de la cultura Purépecha. En relación con la degradación ambiental, archivos coloniales de Michoacán sugieren que el desarrollo de las civilizaciones del Postclásico contribuyeron a la degradación en sitios como Pátzcuaro y Cuitzeo y que la llegada de los españoles no tuvo un impacto negativo inmediato en el ambiente (Vázquez, 2003). Los registros presentados en este trabajo muestran que en la región de Tacámbaro el impacto antropogénico mas intenso corresponde con la llegada de los españoles en 1538, que en este lago en particular estuvo asociada con una etapa de erosión muy intensa.

10. BIBLIOGRAFIA

- Ávila Aldapa R. M. 2002, *Los Pueblos Mesoamericanos*. Tresguerras. México D.F. 327 pp.
- Bahls L.L. Weber E.E. Jarvie J.O. 1984. *Ecology and Distribution of Major Diatom Ecotypes in the Southern Fort Union Coal Region of Montana*. U.S. Geological Survey. 151pp.
- Bartram J. Ballace R. 1996. *Water Quality Monitoring. Apractical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programs*. E& FN SPON. Gran Bretaña. 366 pp.
- Bastida G. S. y Sánchez P. I. 2008. *Plan de Desarrollo Municipal 2008-2011*. H. Ayuntamiento de Tacámbaro. Michoacán. 68 pp.
- Beramendi Orosco L.E. Gonzales Hernades G. 2011. *Datación por radiocarbono una herramienta para estudios del cuaternario tardío*. En: *Escenarios de cambio climático: Registros del Cuaternario en América Latina (Vol. I)*. Caballero M. y Ortega B. (compiladoras). Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, UNAM (ISBN: 978-607-02-2432-4) pp 321-337.
- Bocco G. Vázquez A. Mendoza M. Torres M. A. Torres A. 1996. *Regionalización Ecológica del Estado de Michoacán*. INE-SEMARNAP. Unidad Académica Morelia. 89 pp.
- Bradbury J.P 2000. *Limnological history of Lago de Patzcuaro, Michoacán. México for the past 48,000 years; impacts of climate and man*. Paleogeography. Paleoclimatology. Palaeoecology. 163:69-65.
- Cohen A.S. 2003. *Paleolimnology: The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press. Oxford. 528 pp.
- De la Lanza G., Hernández P. S, Carbajal P.J. 2000. *Organismos Indicadores de la Calidad del Agua y de la Contaminación*. Plaza y Valdés, S.A. de C.V. México, D.F. 639 pp.
- English, J. and Potapova. M. 2010. *Aulacoseira granulata*. In Diatoms of the United States. http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/species/aulacoseira_granulata_angustissima
- Fahnenstiel G.L. and J.M. Glime. 1983. Subsurface chlorophyll maximum and associated Cyclotella pulse in Lake Superior. *International Review der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*. 68 : 605-616.
- Fassbender H. W. Bornemisza E. 1987. *Química de los Suelos de América Latina*. IICA. San José. C.R. 420 pp.
- Gasse. 1986. *East African diatoms: taxonomy and ecological distribution*. J. Cramer. Berlin. 201 pp.

- Gill R.B. Mayewaski P.A. Nyberg J., Haug G.H. Peterson L.C. 2007. Drought and the maya collapse. *Ancient Mesoamerica* 18: 283-302.
- Gobierno del Estado de Michoacán. 2002. *Hidrografía de Michoacán*. Secretaria de Planeación y desarrollo Estatal. Gobierno del Estado de Michoacán. 11 pp.
- Grimm E. (2004) Tilia and TGView 2.0.2 Illinois State Museum. Research and Collection Center, Springfield, Illinois.
- Hernández-Morales, R., M. R. Ortega-Murillo, J. D. Sánchez-Heredia, R. A. Villanueva, y M. S. A. Ríos. 2009. Ocurrencia nictimetral del fitoplancton en la época de lluvias en el lago tropical profundo de Tacámbaro. Michoacán. México. *Biológicas*. No 11.48-55 pp.
- Hodell D.A. Curtis J.H., Brenner M., 1995. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. *Nature* 375:391–394
- Houk V & Klee R. 2004 The stelligeroid taxa of the genus *Cyclotella* (Kützing) Brébisson (Bacillariophyceae) and their transfer into the new genus *Discotella* gen. nov. *Diatom Research* 19 203-208.
- Islebe G. 1999. La Paleoecología: Bases y su Aplicación. *Foresta Veracruzana*. 2: 47-50.
- Jahn R., Kusber W.H., Romero O.E. 2009. *Cocconeis pediculus* Ehrenberg and *C. placentula* Ehrenberg var. *placentula* (Bacillariophyta): Typification and taxonomy. *Fottea* 9(2): 275–288,
- Kilham, S.S. and Kilham, P. 1975. *Melosira granulata* (Ehr.) Ralfs: morphology and ecology of a cosmopolitan freshwater diatom. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 19: 2716-2721.
- Kramer & Lange Bertalot, 1991. Susswasserflora von Mitteleuropa, Vol 2/3 Bacukkaruiotyceae Centrals, Fragilariaceae, Eunotiaceae.
- Laws, A.E. 1981. *Aquatic Pollution*. Wiley Interscience. Publication E.U.A.482pp.
- Lowe R. L. 1974. Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatoms. Environmental Monitoring Series. Environmental Protection Agency Report 670/4-74-055. 334pp.
- Metcalfe S.E., Sarah J., Davies, John D. Braisby, Melanie J. Leng, Anthony J. Newton, Nicola L. Terrett, Sara L. O'Hara. 2006. Long and short-term change in the Patzcuaro Basin, central Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Elsevier. Vol. 247. 272-275 pp.
- O'Hara, S., Street-Perrot, F. A. y Burt, T. P. 1993. Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehispanic agriculture. *Nature* 362:48-51.
- Ortiz-Rubio P. 1906, El axalapazco de Tacámbaro. 1906. *Boletín de la sociedad geológica mexicana*. Tomo II: 65-69,pp
- Patrick, R., and C. W. Reimer. 1966. *The diatoms of the United States: exclusive of Alaska and Hawaii* Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 688pp.

- Pollard P.H. 2004. *El Imperio Tarasco en el Mundo Mesoamericano. Relaciones Colegio de Michoacán*. Colegio de Michoacán Zamora, México.115-145 pp.
- Round F.E, R. Crawford W, Cambridge D. G. 1990. *The Diatoms Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge University Press,747 pp.
- Sánchez Dzib, Y. A, 2011. *Análisis Paleo ecológico del Holoceno en el Lago Cráter la Alberca en Tacámbaro, Michoacán*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica UNAM. México, 112 pp.
- Schoeman 1973. *A systematical and ecological study of the diatom flora of Lesotho with special reference to the water quality*. V&R Printers, Pretoria, 355 pp + 10 plates.
- Seppä H, 2007. *Pollen Analysis, Principles. Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier No. 1977, 251-259pp.
- Servicio Meteorológico Nacional. 2000. Normales Climatológicas 1971-2000. Estado de Michoacán. Estación 00016123. Tacámbaro, Tacámbaro.
(smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/mich/NORMAL16123.TXT).
- Stephen J. G, Peter G. Hoare.1991. *Quaternary Sediments: Petrographic Methods for the Study of Unlithified Rocks*. Halsted Press. New York3 323 pp.
- Street-Perrott, F.A. & S.P. Harrison, 1985. Lake-levels and climate reconstruction. In: A.D. Hecht (ed.), *Palaeoclimate analysis and modeling*, John Wiley & Sons, New York: 219 – 340
- Tanaka, H.. 2007. Taxonomic Studies of the Genera *Cyclotella* (Kützing) Brébisson, *Discostella* Houk Et Klee, and *Puncticulata* Håkansson in the Family Sephanodiscaceae Glezer Et Makarova (Bacillariophyta) in Japan. Vol. 53. J. Cramer,204 pp.
- Vázquez L.2003. El Escenario Paleoambiental de la Region. En: Velázquez A, Torres A, Bocco G. 2003. *Las enseñanzas de San Juan: investigación participativa par el manejo de recursos naturales*. INE-SEMARNAT. México.79-93pp.
- Vázquez G. & M. Caballero, 2012. The structure and species composition of the diatom communities in tropical volcanic lakes of eastern Mexico. *Diatom Research* 28(1):77-91
doi:10.1080/0269249x.2012.739974
- Wang L., H. Lu, J. Liu, Z. Gu, J. Mingram, G. Chu, J. Li, P. Rioual, J. Negendank, J. Han, T. Liu 2008. Diatom-based inference of variations in the strength of Asian winter monsoon winds between 17,500 and 6000 calendar years B.P. *Journal of Geophysical Research* 113, D21101:1-9. doi:10.1029/2008JD010145.

11. APÉNDICE: DESCRIPCIÓN TAXONÓMICA DE LA PRINCIPALES ESPECIES DE DIATOMEAS EN EL REGISTRO DE LOS ULTIMOS 2000 AÑOS EN EL LAGO DE TACÁMBARO:

División: Bacillariophyta (Round et al., 1990)

Clase: Coscinodiscophyceae

Orden: Aulacoseirales

Familia: Aulacoseiraceae

Género: *Aulacoseira*

Aulacoseria granulata var. *angustissima* (O.Müller) Simonsen 1979

Descripción: Tiene frústulos cilíndricos con manto alto por lo que se observan normalmente en vista cingular. Miden de 2.5 a 4(5) μm de diámetro y 8 a 20 (30) μm de longitud del manto (Shoeman, 1973; English, J., y Potapova, M. 2010). En esta variedad la relación entre el largo del manto y el diámetro de la valva es mayor a 3. El manto presenta lados rectos y la cara de la valva es plana. Forma cadenas y la unión entre las valvas es mediante espinas que se encuentran en el borde de la cara valvar, estas espinas son cortas, aplanadas y hay una en cada interestría. Hay valvas (de separación) que tienen espinas cónicas que abarcan dos interestrías. Una o dos de estas espinas son particularmente largas, tan largas como el manto. Estas valvas también tienen una ranura que corresponde con la espina larga de la valva opuesta. El manto esta ornamentado con areolae que forman hileras (estrías). Las hileras de areolae tienen una densidad de 10-20 / 10 μm y pueden ser curvadas o rectas (valvas de separación). Las areaolae dentro de cada hilera tienen una densidad de 15 / 10 μm . Hay una zona del manto sin ornamentación (collum) con un engrosamiento interior (sulcus o ringslete) sólido y poco evidente.

Morfometría en Tacámbaro: Diámetro 3 a 5 μm , manto 11 a 17 μm , relación manto/diámetro >3, hileras de areoale 13- 18 / 10 μm , areolae en hileras 18-20 / μm . Solo una espina larga en las valvas de separación, que tienen hileras de areoale rectas; el resto de las valvas las tienen en espiral. Los ejemplares de Tacámbaro se ajustan bien a las mediciones descritas en la literatura, solo discrepan en la densidad de las areolae en las hileras que es un poco más alta a la reportada.

Ecología: Alcalófila (pH óptimo alrededor de 8), en aguas con altos niveles de nutrientes (eutrofica). Oligohaloba, frecuente en conductividad eléctrica media (500 a 1,200 $\mu\text{S/cm}$ y con preferencia por aguas dominadas por bicarbonatos (Gasse, 1986). Planctónica, frecuente en lagos poco profundos. Tolerancia a aguas con alta turbidez. Estas características corresponden bien con las encontradas actualmente en Tacámbaro, salvo que la conductividad eléctrica es un poco menor (ca. 200 $\mu\text{S/cm}$).

Esta variedad es una variación morfológica que forma parte del ciclo de vida de la variedad tipo, sin embargo deben existir factores ecológicos que determinen que en Tacámbaro solo este presente la variedad *angustissima*, y no la variedad nominal. Estos factores pueden estar relacionados con una turbulencia baja, insuficiente para mantener las formas más pesadas de la variedad nominal (Kilham y Kilham 1975) o estar relacionada con alguna limitación por nutrientes.

Clase: Coscinodiscophyceae
Orden: Thalassiosirales
Familia: Stephanodiscaceae
Género: *Discostella*

Discostella stelligera (Cleve & Grunow) Houk & Klee 2004
(Sinónimo: *Cyclotella stelligera* (Cleve & Grunow) Van Heurck 1882)

Descripción: Frústulos cilíndricos con manto corto por lo que se observan normalmente en vista valvar. Células solitarias, con diámetro de 5 a 40 μm (Kramer y Lange Bertalot, 1991; Houk y Klee, 2004). En la cara valvar se distingue una zona marginal y una zona central. La zona central tiene normalmente una ondulación concéntrica (cóncava o convexa). En las valvas convexas se presentan una serie de alveolos circulares a elongados que forman un patrón de estrella, puede haber un alveolo circular central. En las valvas cóncavas no hay alveolos en la zona central, hay un patrón de estrella externo formado por costillas radiales. La zona marginal es estriada ocupa entre 25% y 40% del radio valvar y está separada por un anillo de la zona central. Las estrías marginales están formadas por costillas radiales engrosadas (alveoladas interiormente) con una densidad de 9-13/10 μm en la descripción del material tipo pero que en la literatura frecuentemente se reportan densidades más elevadas (eg. 11-16, Tanaka 2007). Hay fultoportulae marginales entre las costillas, cerca del margen valvar, cada 1 a 4 alveolos. Internamente las fultoportulas tienen dos poros satelitales laterales, externamente son aperturas sencillas ligeramente engrosadas. Hay una rimoportula con labio sésil posicionada hacia la orilla de la valva, entre dos costillas marginales; la orientación del labio es radial u oblicua. No hay espinas marginales y no hay fultoportulae en la cara valvar.

Morfometría en Tacámbaro: diámetro 5 a 10 μm , zona central cóncava/convexa, con patrón de estrella. Anillo hialino separa la zona central de la marginal que ocupa entre 30 y 40% de la valva. Estrías marginales 18 - 20 / 10 μm . La morfometría en Tacámbaro se ajusta a la descrita en la

bibliografía pero los diámetros caen dentro del rango más pequeño y la densidad de estrías hacia el rango más alto reportado.

Ecología: Ha sido reportada en ambientes oligotróficos a eutróficos por diferentes autores, en México parece ser abundante en ambientes eutróficos como es éste lago o como son los lagos en Los Tuxtlas (Vázquez y Caballero 2012). Ha sido reportada como perífítica, pero en general se considera una especie euplanctónica. Vive en pH circumneutral a levemente alcalino y en agua dulce aunque también ha sido reportada en ambientes marinos.

Se considera buena competidora de nutrientes (N y Si), ya que presenta florecimientos durante la etapa cálida, cuando es más frecuente la limitación de nutrientes. Vive al nivel de la termoclina, durante estratificación pronunciada (Fahnenstiel and Glime 1983, Wang et al 2008). Por su tamaño pequeño tiene tasas de sedimentación bajas que les permiten quedarse en la columna de agua más tiempo cuando hay menos turbulencia. En Los Tuxtlas se ha observado que pueden vivir adheridas a otras algas y usarlas para mejorar su flotabilidad (Vázquez y Caballero 2012), aquí también florece en verano, cuando las otras algas sobre las que viven también florecen.

Clase: Fragilariophyceae
Orden: Fragilariales
Familia: Fragilariaceae
Género: *Ulnaria*

Ulnaria delicatissima (W. Smith) Aboal & Silva 2004
(Sinónimo: *Synedra delicatissima* W. Smith 1853)

Descripción: Existen dos conceptos de esta especie, aquí seguimos el utilizado por Patrick y Reimer, 1966. Valva linear en forma de aguja, de 100-230 μm de largo, que gradualmente se adelgaza en los extremos los cuales tienen una terminación redondeada. Pseudorafe muy estrecho, las estrías a lo largo de la valva son paralelas, con una densidad de 11-14/10 μm . Zona central más larga que ancha, con estrías muy cortas en los márgenes.

Morfometría en Tacámbaro: largo 77 – 234 μm , ancho 2.0 a 4.9, 11-15 str/10 μm hay valvas que no presentan una zona central clara.

Ecología: Es una especie planctónica. pH indiferente, característica de aguas sin movimiento y con alto contenido de nutrientes (eutrófica), su forma de vida euplanctónica.

Clase: Bacillariophyceae
Orden: Achnanthes
Familia: Cocconeidaceae
Género: *Cocconeis*

Cocconeis placentula* var. *linneata (Ehrenberg) Van Heurck 1885.

Descripción: Valva elíptica a linear elíptica, 10.9 a 50 (98) μm largo y 7.2–30 (40) μm de ancho, ligeramente convexa (Jahn et al. 2009). Valva con rafe tiene un área central axial lineal con una pequeña zona central circular. Estrías (16-26/10 μm) paralelas rectas en el centro, curvadas radiales en los polos, formadas por poroides redondos (24-28/10 μm). Las estrías son discontinuas, formando una zona hialina sub-marginal después de la cual las estrías continúan con 3 a 4 poroides más hasta un anillo hialino marginal que rodea toda la valva. Valva sin rafe con un esternón o pseudorafe linear. Estrías (15-25 /10 μm) paralelas rectas en la zona central a curvadas, radiales en los polos, formadas por areolas alargadas (6-12/10 μm) que no se alinean, dando la impresión de líneas longitudinales (transapicales) irregulares.

Morfometría en Tacámbaro: Largo 20 y 30 μm , ancho 14 a 19 μm . Poroides en las estrías de la valva con rafe 20/10 μm , un poco más bajo al reportado en la literatura; 5 a 7 areolas en las estrías de valva con pseudorafe (10-12/10 μm).

Ecología: De circumneutral a alcalifila, en todo tipo de contenido de nutrientes salvo aguas muy oligotróficas, tolera salinidad (eurihaloba). Típicamente bentónica, adherida a rocas, macrofitas y algas en las que forma películas, se adhieren al sustrato con moco secretado por el rafe, por lo que resiste corriente y es común en ríos. De crecimiento rápido, por lo que es pionera.

Clase: Bacillariophyceae
Orden Cymbellales
Familia: Gomphonemataeae
Género: **Gomphonema** Ehrenberg 1832

Descripción: Valvas simétricas en el eje apical pero asimétricas en el eje transapical. Campo poroso apical que es cruzado por el extremo distal del rafe por donde se segrega mucílago que forma un tallo mediante el cual se adhieren a un sustrato. En vista singular tienen forma de cuña con el extremo más delgado corresponde al extremo donde se localiza el campo poroso apical. En vista valvar es frecuente observar un estigma (en ocasiones más de uno) en un lado del área central.

Morfometría en Tacámbaro: En Tacámbaro se identificaron cuatro especies de este género (*G. parvulum*, *G. gracile*, *G. tructum* y *G. angustatum*) pero siempre presentes en porcentajes bajos (<10%), por lo que se decidió reunir las y presentarlas a nivel de género dado que todas las especies tienen una forma de vida similar, fija sobre un sustrato, que tiene un significado ecológico. La especie más común fue *Gomphonema parvulum* y es la que se ilustra en la lámina 1.

Ecología: Son especies que viven adheridas a un sustrato.

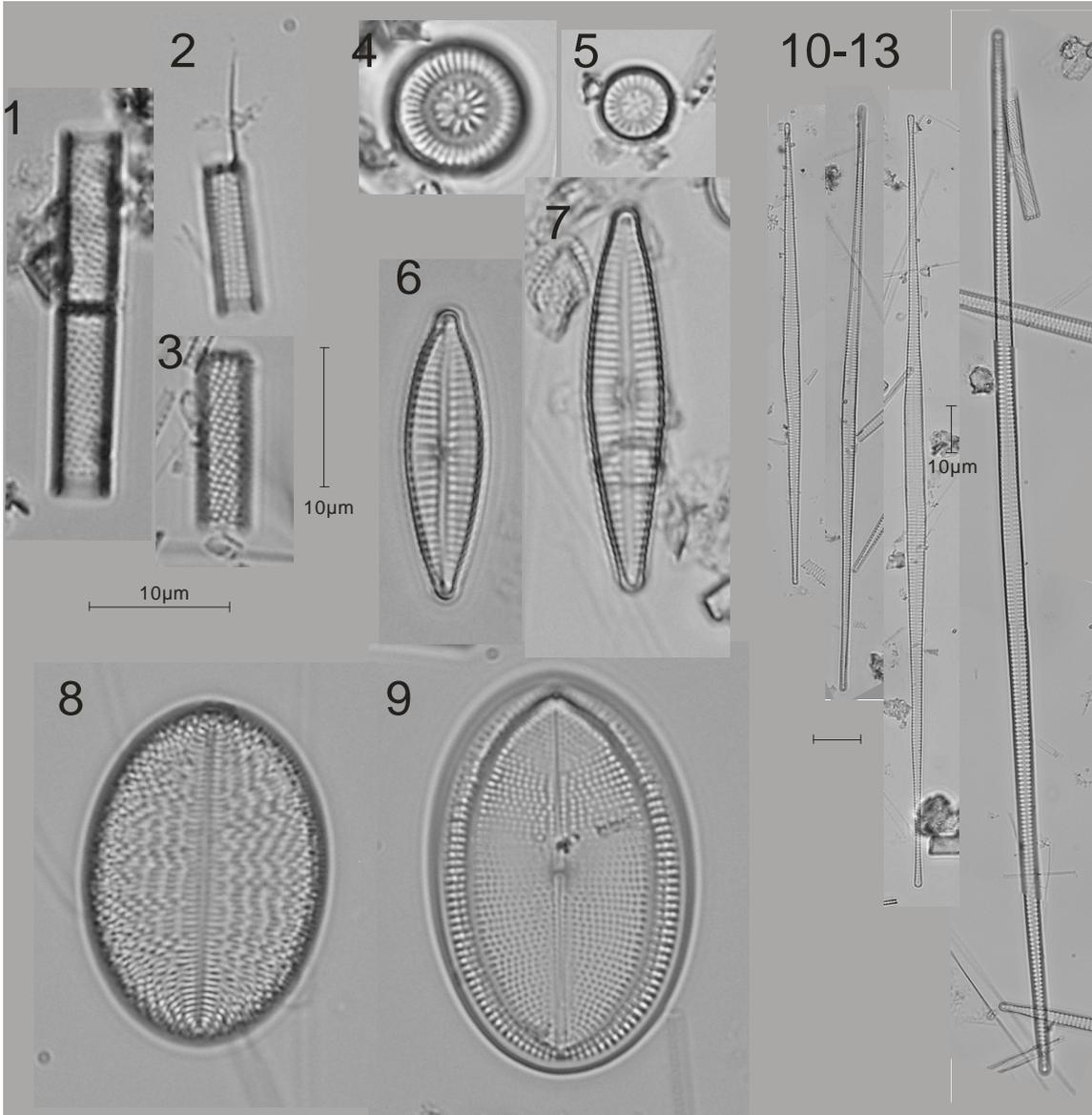


Lámina 1. 1-3 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, 4 -5 *Discostella stelligera*, 6 - 7 *Gomphonema parvulum*, 8-9 *Cocconeis placentula* var. *linneata*, 10 - 13 *Ulnaria delicatissima*