

# UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIA EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

REGISTRO PALEOHIDROLÓGICO Y MICROPALAEONTOLOGICO DE LA TRANSICIÓN  
NORGRIPIANO-MEGALAYANO EN LA CIÉNEGA TONIBABI, SONORA, MÉXICO

The seal of the University of Sonora is a circular emblem. It features a central shield with a lamp of knowledge, a book, and a map. Above the shield are two eyes. Below the shield is a banner with the motto "TODO · LO · ILUMINAN". The shield is flanked by two figures. The entire seal is surrounded by the text "UNIVERSIDAD DE SONORA" and the year "1942" at the bottom.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOLOGÍA

PRESENTA:

JOSÉ MARIO TRINIDAD CAMARENA

1942

Hermosillo, Sonora. Junio de 2019

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

## **DEDICATORIA**

A mis padres Guadalupe Camarena y Mario Trinidad,  
a mis hermanos Judith e Iván,  
a Beatriz.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad de Sonora, especialmente al Departamento de Geología por otorgarme el conocimiento necesario para realizar este trabajo y para estar preparado para mi vida profesional.

A mi director de tesis, M. C. Iván Espinoza por ser mi profesor y amigo durante toda la universidad, por haberme ayudado a ser el estudiante que soy y ser parte significativa de mi formación social y académica.

A la Dra. Cristina Peñalba por darme la oportunidad de trabajar en el laboratorio de Recursos Naturales Terrestres y utilizar por horas el microscopio.

A la M. C. Antonia López y al M. C. Ricardo Amaya por las observaciones a mi trabajo de tesis.

A mis padres Guadalupe Camarena y Mario Trinidad por su afecto, apoyo y por alentarme siempre dentro y fuera del hogar incondicionalmente.

A Beatriz, por todo lo aprendido y lo que falta por aprender, por la ayuda cuando la necesité y acompañarme en todo momento cuando estaba en apuros.

A René Armenta, Luis Vega, Jorge Encinas, Ramón de la Cruz (†), Héctor Noriega, Salvador Arreola, Romario López, Rolando Peralta y Alan Matas por las vivencias de estudiante universitario.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
RESUMEN .....	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Hipótesis .....	2
1.3 Objetivo .....	2
II. ÁREA DE ESTUDIO.....	3
2.1 Localización .....	3
2.2 Geología .....	4
2.3 Clima y vegetación .....	6
III. ANTECEDENTES .....	7
3.1 El Periodo Cuaternario y la Época Holoceno.....	7
3.2 Diatomeas y ambientes cuaternarios .....	9
3.3 Registros paleohidrológicos cuaternarios en el noroeste de México.....	12
IV. METODOLOGÍA.....	15
4.1 Descripción y muestreo .....	15
4.2 Datación por radiocarbono .....	17
4.3 Análisis geoquímico .....	18
4.4 Análisis de diatomeas .....	19
4.5 Análisis estadístico .....	21
V. RESULTADOS.....	22
5.1 Estratigrafía .....	22
5.2 Fechamiento por carbono 14 .....	24
5.3 Geoquímica.....	26
5.4 Diatomeas fósiles.....	31
5.5 Análisis de correspondencia sin tendencia .....	36
VI. DISCUSIÓN.....	37
6.1 Correlación estratigráfica de los perfiles TBP2 y TBP3 .....	37

6.2 Condiciones paleohidrológicas de la ciénega Tonibabi .....	39
6.3 Diatomeas como indicadores paleoecológicos .....	39
6.4 Reconstrucción paleoambiental de la ciénega Tonibabi .....	41
VII. CONCLUSIONES.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
APÉNDICE I. Listado taxonómico.....	55
APÉNDICE II. Láminas de diatomeas fósiles de Tonibabi.....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la ciénega Tonibabi .....	3
Figura 2. Mapa geológico del área de estudio .....	5
Figura 3. El Periodo Cuaternario .....	8
Figura 4. Representación simplificada de la frústula.....	9
Figura 5. Reproducción asexual de las diatomeas .....	10
Figura 6. Localización del sitio de estudio y trabajos previos en la ciénega Tonibabi.....	15
Figura 7. Perfil de sedimentos TBP3, ciénega de Tonibabi, Sonora, México .....	16
Figura 8. Columna estratigráfica del Perfil TBP3. ....	23
Figura 9. Modelo de edad para el Perfil TBP3 .....	24
Figura 10. Estratigrafía y concentraciones de los elementos Al, Fe, Ti, Mg, Ca, K Na y Sr del Perfil TBP3.....	27
Figura 11. Índice de Alteración Química del Perfil TBP3.....	29
Figura 12. Concentración de cada elemento contra Índice de Intemperismo Químico.....	30
Figura 13. Diagrama de diatomeas fósiles .....	35
Figura 14. DCA para el total de las variables estudiadas .....	36
Figura 15. Correlación estratigráfica de los perfiles TBP2 y TBP3 .....	38
Figura 16. Reconstrucción paleoambiental de la ciénega Tonibabi .....	43
Figura 17. Fases ambientales de la ciénega Tonibabi desde 5,700 hasta 1,808 años cal AP .....	44

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Listado de diatomeas identificadas en los sedimentos de la ciénega Tonibabi .....	14
Tabla 2. Muestras obtenidas del perfil TBP3 para el análisis geoquímico y de diatomeas fósiles .....	17
Tabla 3. Edad de la muestra TBP3-220 .....	24
Tabla 4. Estimación de la edad de las muestras analizadas .....	25
Tabla 5. Concentraciones de elementos en el Perfil TBP3 .....	26
Tabla 6. Paleoecología de las diatomeas identificadas en el perfil TBP3 .....	32
Tabla 7. Descripción de la correlación estratigráfica de los perfiles TBP2 y TBP3 .....	37
Tabla 8. Espectro de salinidad .....	40



## **RESUMEN**

Los estudios micropaleontológicos y paleohidrológicos, constituyen un pilar importante en la reconstrucción de ambientes pasados, cimentándose en que los microfósiles y los sistemas hidrológicos del pasado son capaces de revelar información crucial para inferir las condiciones que prevalecieron en un determinado ambiente. El presente estudio consiste en la reconstrucción ambiental de la ciénega Tonibabi, Sonora, México durante la transición Norgripiano-Megalayano. Como herramienta para llevar a cabo el estudio, se muestreó un perfil de sedimentos denominado Perfil TBP3 de 234 cm de profundidad, fechado en 5,700 años cal AP a los 220 cm de profundidad. A través de un análisis geoquímico y de diatomeas fósiles, se identificaron las variaciones ambientales en el pasado de la ciénega, indicando cambios en la salinidad y mostrando una alcalinidad uniforme. Como recursos complementarios, se realizaron análisis estadísticos como Análisis de Correspondencia sin Tendencia y CONISS, así como una correlación estratigráfica con el Perfil TBP2 para perfeccionar la inferencia de la reconstrucción de los ambientes pasados en la ciénega. El estudio de diatomeas fósiles es crucial para este tipo de trabajos debido a que son excelentes bioindicadores, las asociaciones de éstas y sus características son usadas para determinar ambientes acuáticos tanto actuales como pasados.

## **I. INTRODUCCIÓN**

Los cuerpos de agua continentales son de gran importancia para la vida, particularmente para los seres humanos, ya que son la única fuente de agua dulce que puede ser utilizada para satisfacer las necesidades en el consumo de agua para beber y en el desarrollo de actividades agrícolas de las sociedades actuales (Caballero et al., 2013).

Hasta hace poco tiempo, el estudio de la química del agua, junto con las mediciones de parámetros como la temperatura y el pH, era considerada como un elemento único en la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los cuerpos de aguas continentales (López-Fuerte y Siqueiros-Beltrones, 2011). En la actualidad, el reconocimiento y la utilización de diferentes grupos taxonómicos, entre los que sobresalen las diatomeas, son considerados en algunos casos como elementos definatorios y/o complementarios en la determinación de las propiedades fisicoquímicas de los ambientes acuáticos continentales (López-Fuerte y Siqueiros-Beltrones, 2011).

Las diatomeas también han sido utilizadas con gran éxito para reconstruir los cambios ambientales en ecosistemas acuáticos continentales (como profundidad, pH y salinidad), ocurridos en el pasado histórico y geológico (Dixit et al. 1992; Stoermer y Smol, 1999; Battarbee et al., 2001), esto debido a la rapidez y sensibilidad con que responden a los cambios físicos, químicos y biológicos que se producen en su entorno (López-Fuerte y Siqueiros-Beltrones, 2011). Sin embargo, para poder interpretar adecuadamente la información que proporcionan las diatomeas, es necesario aplicar conjuntamente distintas metodologías, como la descripción estratigráfica, el fechamiento de los sedimentos o el análisis de otros microfósiles (Caballero et al., 2013).

En el presente estudio se realiza la reconstrucción de las condiciones paleohidrológicas de la ciénega Tonibabi (Sonora, México), a partir del registro geoquímico y micropaleontológico, de un perfil de sedimentos. Los resultados de los diferentes análisis son correlacionados por métodos estadísticos para definir las características paleoambientales durante el depósito de los sedimentos, y comparados con estudios previos realizados en la ciénega Tonibabi.

## **1.1 Justificación**

La ciénega Tonibabi se mantiene con cierta humedad durante todo el año, lo cual permite la preservación de diatomeas fósiles en sus sedimentos. Esta característica hace de la ciénega Tonibabi, un sitio adecuado para realizar un estudio paleoecológico basado en diatomeas que permita evaluar los cambios paleohidrológicos ocurridos en la zona durante los últimos 5,700 años. Esto con el fin de conocer si existieron variaciones en los parámetros fisicoquímicos en ambientes acuáticos continentales, asociadas a cambios en las condiciones climáticas ya que no existen estudios suficientes en la región central de Sonora.

## **1.2 Hipótesis**

El Cuaternario ha sido definido como un periodo de gran inestabilidad climática que ha provocado importantes cambios paleoambientales en la Tierra, los cuales han sido registrados en sedimentos marinos y continentales. Por lo tanto, en los sedimentos de la ciénega Tonibabi se verá reflejada esa gran variabilidad ambiental, a través del estudio paleoecológico de diatomeas fósiles.

## **1.3 Objetivo**

Describir los cambios ambientales que tuvieron lugar en la ciénega Tonibabi, Sonora, México, durante la transición Norgripiano-Megalayano, a través del análisis geoquímico y de las diatomeas preservadas en los sedimentos.

Los objetivos específicos del estudio son:

- Establecer los índices de escorrentía y salinidad para los sedimentos de la ciénega
- Identificar las diatomeas preservadas hasta el nivel taxonómico de especie
- Distinguir las variaciones hidrológicas ocurridas en el periodo estudiado
- Contrastar los resultados obtenidos con los trabajos anteriores realizados en el sitio

## II. ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 Localización

La ciénega Tonibabi se ubica en la porción sur de la sierra La Madera, en el municipio de Moctezuma, Sonora, México, en las coordenadas geográficas 29° 50' 16'' de latitud norte y 109° 33' 45'' de longitud oeste, a una altitud de 780 msnm (Espinoza-Encinas, 2012; Galaz-Samaniego, 2017). Su acceso principal, partiendo de la ciudad de Hermosillo, es la Carretera Federal México 14, hasta llegar al poblado de Moctezuma, luego se toma la Carretera Estatal Sonora 21, hasta llegar al kilómetro 14, donde se toma un camino de terracería rumbo al Rancho Tonibabi (Figura 1).

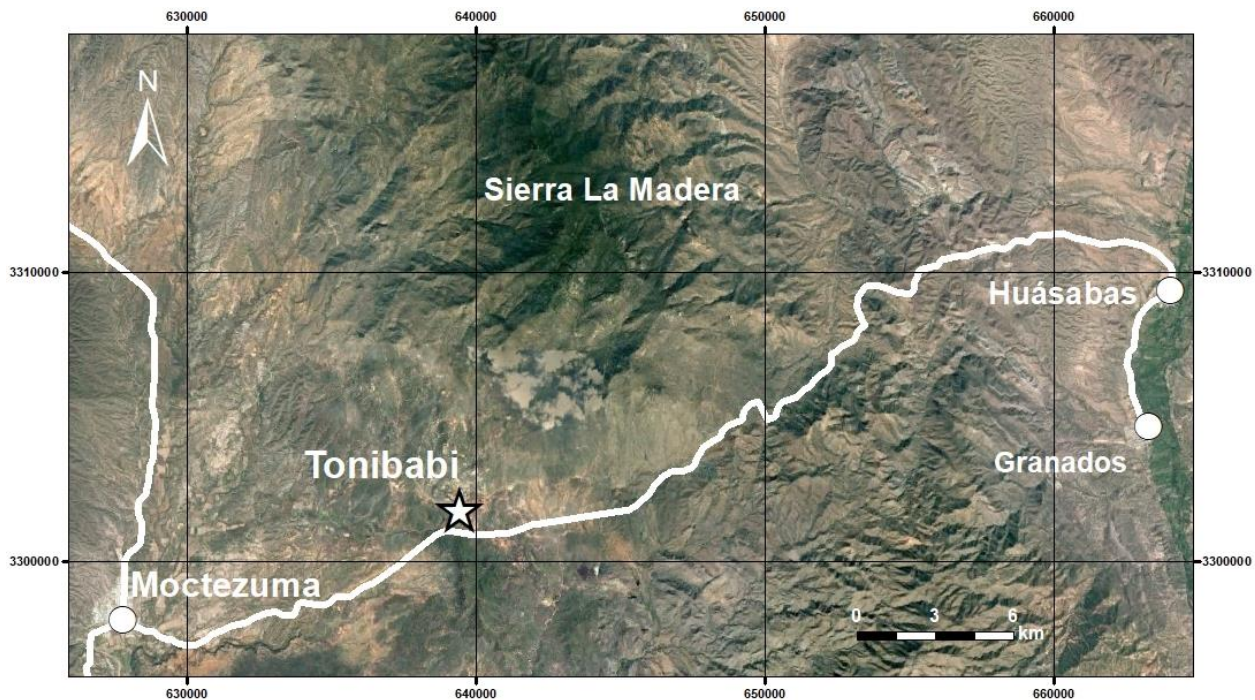


Figura 1. Localización de la ciénega Tonibabi (Modificado de Google Earth, 2019).

La ciénega es alimentada por manantiales termales relacionadas al granitoide laramídico de la región. Almirudis et al. (2015) reporta que las temperaturas superficiales de los manantiales que emergen del batolito oscilan entre 41.5 y 63.1° C, además de valores de pH que van de neutros a ligeramente alcalinos.

## **2.2 Geología**

Fisiográficamente, la ciénega Tonibabi está localizada en la subprovincia de Sierras y Valles Paralelos, caracterizada por montañas y valles alineados de norte-sur a noroeste-sureste, limitadas entre ellas por una serie de fallas normales (Roldán-Quintana, 1994). La litología en la región centro-noreste del estado de Sonora (Figura 2), está representada por rocas sedimentarias, vulcanosedimentarias y rocas ígneas volcánicas e intrusivas, que varían en edad desde el Cretácico tardío hasta el Holoceno (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

Durante el Cretácico tardío se depositaron secuencias vulcanosedimentarias que corresponden a la Formación Tarahumara, al sureste del área de estudio, principalmente compuestas de riolitas, tobas riolíticas, andesitas e intercalaciones de calizas (Servicio Geológico Mexicano, 2013). A este evento volcánico se le atribuye contemporáneamente el depósito de unidades de calizas y lutitas al sur, andesitas y tobas andesíticas al sureste, riolitas y tobas riolíticas al este-sureste de la zona. Aunque estos paquetes de rocas pertenecen a la Formación Tarahumara, localmente se encuentran con límites discordantes entre sí (Servicio Geológico Mexicano, 2013). Los cuerpos batolíticos de granito-granodiorita del Paleoceno que conforman la Sierra La Madera, al norte y que afloran también al sureste, afectaron las secuencias vulcanosedimentarias anteriormente descritas (Paz-Moreno et al., 2003); a su vez, durante el Eoceno un pórfido cuarzomonzonítico intrusionó a las rocas preexistentes al noreste, este y centro del área de estudio (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

El Oligoceno es representado por riolitas y tobas riolíticas principalmente en el centro y noreste de la zona de estudio, sobreyaciendo concordantemente afloran andesitas y basaltos de origen fisural al noreste, lo que indica un cambio en la química de la lava pasando de un vulcanismo ácido a uno básico, ligado al cambio de régimen tectónico que dio origen al sistema de fallas NW-SE (Paz-Moreno et al., 2003; Servicio Geológico Mexicano, 2013).

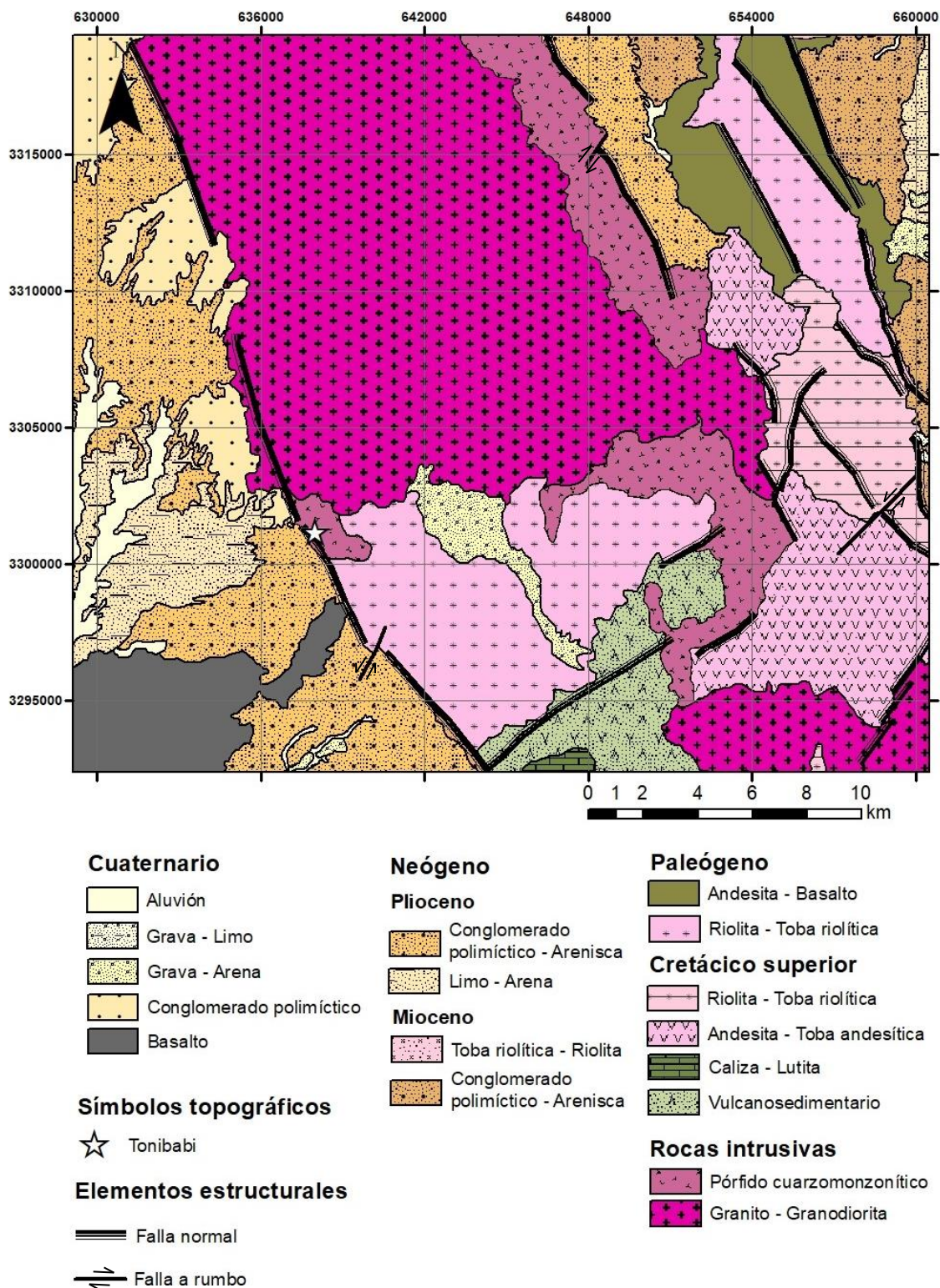


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio (Modificado de la Carta Geológico-Minera: Tonibabi H12-D15, Servicio Geológico Mexicano, 2013).

Discordantemente, sobreyaciendo a estas unidades, se depositaron paquetes sedimentarios del Mioceno compuestos por conglomerados polimícticos y areniscas intercalados con riolitas y tobas riolíticas, características que representan a la Formación Báucarit, localizadas al noreste del área (Servicio Geológico Mexicano, 2013). Al pie de las sierras se alojan conglomerados polimícticos semiconsolidados intercalados con areniscas del Plioceno. Durante el Pleistoceno tiene lugar un episodio de vulcanismo basáltico toleítico representado por afloramientos de basaltos correspondientes al campo volcánico cuaternario de Moctezuma al suroeste de Tonibabi (Paz-Moreno et al., 2003), concordantemente se depositaron sedimentos no consolidados de conglomerado polimíctico, gravas, arenas y limos. Los depósitos del Holoceno corresponden a material aluvial en ríos y arroyos compuestos por gravas, arenas y limos (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

### **2.3 Clima y vegetación**

El área de estudio presenta un clima seco semicálido, con una temperatura media anual de 21.7°C, una temperatura máxima de 43.6°C durante el mes es más cálido (junio) y una temperatura mínima de 3.8°C durante el mes más frío (diciembre); la precipitación anual es de 559.9 mm, siendo julio y agosto los meses con mayor precipitación, según información de la estación climatológica más cercana, 26251 Térapa, ubicada en las coordenadas 29°40'54'' Norte, 109°39'10'' Oeste, a 605 msnm (Servicio Meteorológico Nacional, 2019).

La vegetación que bordea la ciénega es de tipo xerófito, con matorral espinoso de piedemonte, caracterizada por ser asociaciones vegetales adaptadas a la escasez de agua en medios desérticos o esteparios, está compuesta por matorrales arbustivos o semiarborescentes de origen tropical, que representan la transición entre el Desierto Sonorense y el bosque tropical caducifolio (Mojica-Zárate, 2015). Las especies más representativas son: *Acacia russelliana*, *Bursera fagaroides*, *B. laxiflora*, *Cordia sonora*, *Fouquieria macdougalii*, *Haematoxylum brasiletto*, *Ipomoea arborescens*, *Jatropha cordata*, *Lysiloma divaricatum*, *L. watsonii*, *Mimosa distachya* y *Stenocereus thurberi* (Martínez-Yrizar et al., 2010).

### **III. ANTECEDENTES**

#### **3.1 El Periodo Cuaternario y la Época Holoceno**

El Cuaternario, tercer periodo de la Era Cenozoica comenzó hace 2.58 millones de años, manteniéndose hasta el presente (Cohen et al., 2018). El Cuaternario, cuyo nombre fue propuesto para datar los depósitos aluviales localizados en el valle del río Po al norte de Italia (Zafra-Otero, 2017), se encuentra dividido en dos épocas, la del Pleistoceno y la del Holoceno (Figura 3) (Walker et al., 2015).

El aspecto más distintivo del Cuaternario es el registro de períodos glaciares, en los cuales se han desarrollado e incrementado las capas de hielo presentes en los polos y en las montañas, estos periodos fríos han sido interrumpidos por periodos cálidos denominados interglaciares, en los cuales los casquetes polares y de alta montaña han disminuido (Lowe y Walker, 2015). El número preciso de ciclos climáticos ocurridos durante el Cuaternario sigue en discusión, pero evidencias de registros del fondo oceánico sugiere que han acontecido hasta cincuenta etapas glaciares con sus correspondientes episodios interglaciares (Shackleton et al., 1990).

El más reciente período glacial, ocurrió durante el Pleistoceno tardío, al cual le siguió el período interglacial conocido como Holoceno, la época más reciente del Cuaternario (Lowe y Walker, 2015). El Holoceno cubre el intervalo de tiempo desde hace 11,700 años hasta el presente (Cohen et al., 2018), y es probablemente la época más estudiada del registro geológico, cuyos estudios engloban evidencias geomorfológicas, climáticas, arqueológicas y bióticas, las cuales sirven como herramientas para explicar los fenómenos terrestres y marinos actuales (Walker et al., 2012).

Walker et al. (2018), propone una división de tres edades para el Holoceno: Groenlandiano, Norgripiano y Megalayano (Figura 3). Esta propuesta de tres edades, cada una con su correspondiente Sección Estratotipo y Punto de Límite Global (GSSP, por sus siglas en inglés), fue aprobada por la Comisión Internacional de Estratigrafía y formalmente ratificada por el Comité Ejecutivo de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (Cohen et al., 2018).



El GSSP de la edad más antigua, el Groenlandiano, coincide con el límite inferior del Holoceno (Walker et al., 2008), localizado en el núcleo de hielo NGRIP2 en Groenlandia, datado en 11,700 años, el cual coincidente con las primeras señales de calentamiento global tras finalizar el *Dryas Reciente*, último enfriamiento del Pleistoceno tardío (Bardají, 2018).

Para el Norgripiano, el GSSP es el núcleo de hielo NGRIP1 datado en 8,236 años, el cual encaja con un intervalo que muestra un brusco enfriamiento climático seguido del aumento de las temperaturas en el Groenlandiano (Walker et al., 2018).

El Megalayano, nombrado en referencia a la cueva de Mawmluh, en el estado de Megalaya, al noreste de India, la cual contiene numerosos espeleotemas, siendo el KM-A donde se registró el GSSP datado en 4,250 años (Walker et al., 2018).

<b>PERIODO</b>	<b>ÉPOCA</b>	<b>EDAD</b>	<b>EDAD NUMÉRICA (en millones de años)</b>
Cuaternario	Holoceno	Megalayano	0.0042-Actualidad
		Norgripiano	0.0082-0.0042
		Groenlandiano	0.0117-0.0082
	Pleistoceno	Tardío	0.126-0.0117
		Medio	0.781-0.126
		Calabriano	1.80-0.781
		Gelasiano	2.58-1.80

Figura 3. El Periodo Cuaternario (Modificado de Cohen et al., 2018).

### 3.2 Diatomeas y ambientes cuaternarios

Las diatomeas son importantes organismos fotosintéticos, cuyos cloroplastos tienen un tono pardo-dorado, el cual se debe a la presencia de pigmentos como la fucoxantina (Caballero et al., 2013). Presentan una pared celular de sílice amorfo hidratado llamada frústula, la cual tiene una longitud comprendida entre 5 y 2000  $\mu\text{m}$  (Brasier, 1980; Armstrong y Brasier, 2005). La frústula consiste en dos valvas que difieren ligeramente en tamaño, la epiteca y la hipoteca, la primera más grande que la segunda, las cuales embonan perfectamente protegiendo a la célula viva, encontrándose unidas por una serie de bandas que en conjunto son llamadas cíngulo (Tobón-Velázquez, 2015) (Figura 4).

Las valvas de las diatomeas contienen ornamentaciones características que permiten distinguir las diferentes especies de este grupo, las cuales son bastante específicas a parámetros como el pH, la salinidad y/o la profundidad del medio donde se desarrollan (Caballero et al., 2013), siendo de gran importancia paleoecológica al conservarse como fósiles, especialmente en sedimentos lacustres donde hay un buen aporte sedimentario (Metzeltin y García-Rodríguez, 2012).

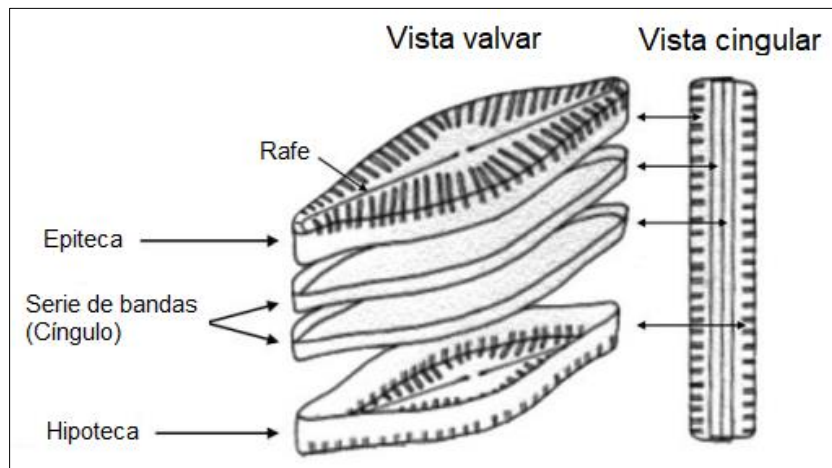


Figura 4. Representación simplificada de la frústula (Metzeltin y García-Rodríguez, 2012).

Las diatomeas se clasifican dentro de la División Bacillariophyta, la cual se divide en tres clases: Coscinodiscophyceae (diatomeas de simetría radial), Fragillariophyceae (diatomeas de simetría axial, sin rafe) y Bacillariophyceae (diatomeas de simetría axial, con rafe) (Round et al., 1990).

Se reproducen asexualmente por división celular directa (Figura 5), produciendo frecuentemente esporas de resistencia que pueden sobrevivir por mucho tiempo enterradas en los sedimentos (Caballero, 2018).

Las diatomeas se distribuyen por un amplio rango de ambientes acuosos y subacuados, las diatomeas de la Clase Coscinodiscophyceae abundan en el plancton de ambientes marinos, mientras que las diatomeas de las clases Fragillariophyceae y Bacillariophyceae dominan los ambientes de agua dulce, el suelo húmedo y los hábitats marinos bentónicos (Lowe y Walker, 1984; Armstrong y Brasier, 2005). El valor paleoecológico de las diatomeas está bien establecido, particularmente para la evidencia de cambios climáticos y cambios en las tasas de sedimentación en los océanos Ártico y Antártico (p.ej. Retallack et al., 2001; Bianchi y Gersonde, 2002; Shemesh et al., 2002; Wilson et al., 2002; Whittington et al., 2003), y proporcionan temperaturas estimadas en la superficie del mar (Birks y Koc, 2002).

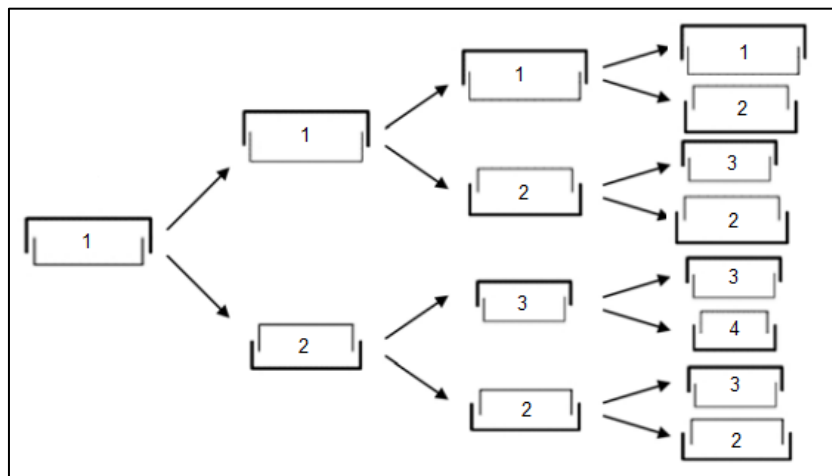


Figura 5. Reproducción asexual de las diatomeas (Metzeltin y García-Rodríguez, 2012).

Las diatomeas se consideran excelentes bioindicadores, sus asociaciones y las características de su hábitat han sido cuantificadas y usadas para caracterizar ambientes acuáticos, tanto presentes como pasados (Battarbee, 1986). Un control importante sobre la distribución de diatomeas es la salinidad. El sistema hialino de clasificación, introducido por Kolbe (1927) y modificado por Hustedt (1957), tiene cuatro principales grupos:

- Polihalobias: sobreviven en concentraciones mayores a 30%.
- Mesohalobias: sobreviven en concentraciones de 0.2 a 30%.
- Oligohalobias: sobreviven en concentraciones menores a 0.2%.
- Halófitas: no pueden tolerar aguas ligeramente saladas.

La distribución y abundancia de muchas especies de diatomeas también varía con el pH del agua (Battarbee y Charles, 1987; Smol, 1990). Las diatomeas han sido divididas tradicionalmente en cinco grupos de acuerdo con su preferencia al pH:

- Alcalibiónica: habitan aguas con valores en pH mayores a 7.
- Alcalófila: habitan aguas con pH cercanos a 7, pero preferentemente mayores a 7.
- Circumneutral: habitan aguas con valores en pH por encima y por debajo de 7.
- Acidófila: habitan en aguas con pH cercanos a 7, pero preferentemente menores a 7.
- Acidobiónica: habitan aguas con pH menores a 7, con distribución óptima debajo de 5.5.
- Indiferentes: No presentan una preferencia aparente hacia algún valor de pH.

Van Dam et al. (1994) presenta una clasificación en relación con la humedad en la que se someten las diatomeas:

- Nunca, o solo muy raras veces, ocurren fuera de cuerpos de agua.
- Ocurren principalmente en cuerpos de agua, algunas veces en sitios húmedos.
- Ocurren principalmente en cuerpos de agua, también son regulares en sitios húmedos.
- Ocurren principalmente en sitios húmedos o temporalmente secos.
- Ocurren, casi exclusivamente, fuera de cuerpos de agua.

### **3.3 Registros paleohidrológicos cuaternarios en el noroeste de México**

Según la Enciclopedia Británica (2008), la Paleohidrología es el estudio de los sistemas hidrológicos tal y como existieron en el pasado de la historia de la tierra, utilizando evidencias como los depósitos sedimentarios, la erosión de éstos, la meteorización de las rocas y los sedimentos, como herramientas para inferir las condiciones paleohidrológicas del objetivo a estudiar. El uso de técnicas paleohidrológicas proporciona un medio para evaluar los efectos de la variabilidad hidrológica a largo plazo y el cambio climático, ya que complementa los registros históricos y sistemáticos a corto plazo existentes, proporciona información en ubicaciones sin datos y ayuda a disminuir la incertidumbre en la estimación hidrológica (Jarrett, 1991).

Moser et al. (1996) realizó un estudio enfocándose en diatomeas de agua dulce para realizar reconstrucciones paleoambientales, donde incluye evidencias climatológicas, hidrológicas, geomorfológicas, biogeográficas y de calidad de agua. Demostrando así, una multitud de oportunidades de investigación que se pueden lograr con base en la amplia variedad de ambientes que ofrecen el estudio de las diatomeas.

En México, los estudios paleoambientales, en los cuales se han estimado que las condiciones paleohidrológicas durante el Pleistoceno tardío fueron más secas a las actuales, se han enfocados principalmente hacia la Faja Volcánica Transmexicana (p.ej. Bradbury, 1971, 2000; Caballero-Miranda, 1997; Ortega et al., 2002; Israde-Alcántara et al., 2010; Torres-Rodríguez et al., 2012), en el centro de México, siendo pocos los estudios realizados en la región noroeste (Metcalf, 2006).

En la laguna Babícora (Chihuahua), localizada en la región del Desierto Chihuahuense, se presentaron condiciones húmedas y frías durante el final del Pleistoceno tardío (Urrutia-Fucugauchi et al., 1997; Ortega-Ramírez et al., 1998; Metcalfe et al., 2002), mientras que durante el Holoceno se reconocieron condiciones más secas y temperaturas más cálidas (Ortega-Ramírez, 1995; Urrutia-Fucugauchi et al., 1997; Ortega-Ramírez et al., 1998; Palacios-Fest et al., 2001).

En diversos estudios basados principalmente en el análisis polínico en sitios localizados en la Sierra Madre Occidental (López-Higuera, 2005; Ortega-Rosas et al., 2008a; 2008b; 2017) también se observan condiciones generales más frías y húmedas durante el final del Pleistoceno tardío, comparadas con las condiciones prevalecientes durante el Holoceno, más cálidas y secas, aunque también se observaron pequeños periodos de enfriamiento y mayor humedad (Ortega-Rosas et al., 2008c).

En la laguna de San Felipe (Baja California), localizada en la región del Desierto Sonorense, diversos estudios de sus sedimentos (susceptibilidad magnética, geoquímica y polen) también registraron condiciones relativamente húmedas durante el Pleistoceno tardío (Ortega-Guerrero et al., 1999; Lozano-García et al., 2002; Roy et al., 2012). Un estudio de macrorestos vegetales y polen en middens (nidos de *Neotoma spp.*) de la Sierra San Pedro Mártir (Holmgren et al., 2011), la cual se eleva sobre la laguna San Felipe, reconstruye el cambio de un régimen climático de lluvias dominantes de invierno a verano, durante la transición del Pleistoceno al Holoceno.

En la ciénega San Marcial (Sonora), también ubicada en la región del Desierto Sonorense, la interpretación del registro polínico sugiere una gran inestabilidad climática, pasando de condiciones húmedas y frías hacia condiciones más cálidas y secas antes de concluir el Pleistoceno tardío (Ortega-Rosas et al., 2016). Un estudio de macrorestos vegetales y polen en middens localizados en Sierra Bacha (Sonora) indica la disminución de la humedad y el aumento de la temperatura en la región a partir del Norgripiano (Van Devender et al., 1994), periodo durante el cual se estima el establecimiento de condiciones desérticas similares a las actuales para el Desierto Sonorense (Peñalba y Van Devender, 1998).

En la ciénega Tonibabi, localizada en la zona de transición de la Sierra Madre Occidental y el Desierto Sonorense, el estudio de varios proxies sugiere que el sitio presentó condiciones más frías y húmedas durante el Groenlandiano, mientras que el Norgripiano y el Megalayano fueron en general más cálidos y secos, aunque también presentaron una gran variabilidad climática (Espinoza-Encinas, 2012), misma que fue corroborada por un estudio polínico posterior (Galaz-Samaniego, 2017).

En su estudio, Espinoza-Encinas (2012) identifica albita, cuarzo y microclina por medio de un análisis de difracción de Rayos X de los sedimentos de la ciénega, así como halita y thenardita en muestras de sal colectadas. También identifica 18 especies de diatomeas preservadas en los sedimentos holocenos de la ciénega Tonibabi (Tabla 1), siendo las especies más representativas de la ciénega: *Denticula elegans*, *Epithemia adnata* y *Rhopalodia gibberula*.

Tabla 1. Listado de diatomeas identificadas en los sedimentos de la ciénega Tonibabi (Espinoza-Encinas, 2012). ■ Especies encontradas en sedimentos del Norgripiano, ● Especies encontradas en sedimentos del Megalayano, ▲ Especies encontradas en sedimentos actuales.

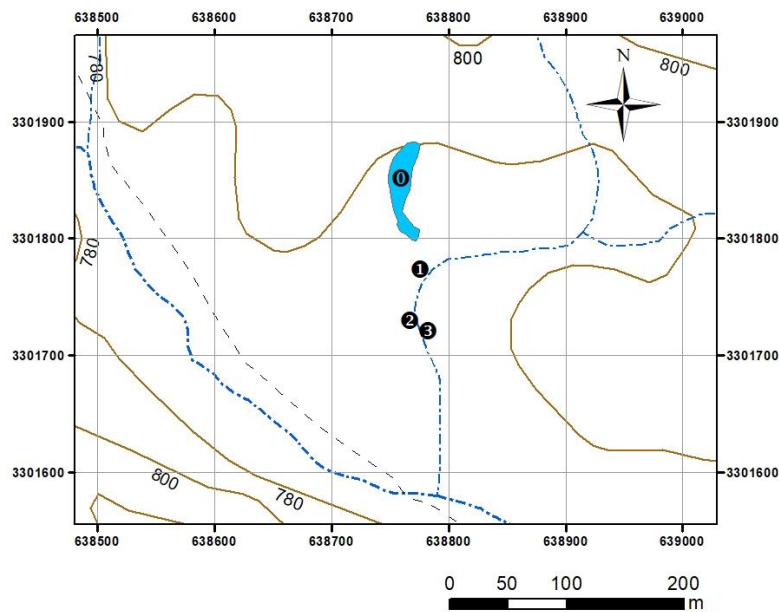
Especie		Especie	
<i>Achnanthes spp.</i>	■ ● ▲	<i>Navicula spp.</i>	■ ● ▲
<i>Amphora veneta</i>	■ ● ▲	<i>Nitzschia amphibia</i>	■ ● ▲
<i>Caloneis bacillum</i>	■ ● ▲	<i>Nitzschia spp.</i>	■ ● ▲
<i>Caloneis budensis</i>	■ ● ▲	<i>Pinnularia major</i>	■ ● ▲
<i>Cocconeis placentula</i>	■ ● ▲	<i>Pinnularia spp.</i>	●
<i>Denticula elegans</i>	■ ● ▲	<i>Rhopalodia gibberula</i>	■ ● ▲
<i>Diploneis elliptica</i>	■ ● ▲	<i>Surirella capronii</i>	■ ▲
<i>Epithemia adnata</i>	■ ●	<i>Surirella spiralis</i>	■ ●
<i>Mastogloia smithii</i>	■ ● ▲	<i>Synedra spp.</i>	■ ▲

#### IV. METODOLOGÍA

El presente trabajo se llevó a cabo a partir de un perfil de sedimentos, denominado en este estudio como TBP3, obtenido de las proximidades de la ciénega Tonibabi, Moctezuma, Sonora, México. Los análisis realizados sobre los sedimentos incluyen su descripción, datación por radiocarbono, geoquímica y contenido de diatomeas fósiles, además del análisis estadístico de los datos obtenidos.

##### 4.1 Descripción y muestreo

Al sureste de la ciénega de Tonibabi, se localizó un perfil de sedimentos antiguos de la ciénega, expuesto por el corte de un arroyo (Figura 6). La ubicación del perfil de sedimentos se obtuvo a partir de un sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés).



#### Simbología

- |                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| ① Núcleo de sedimentos TB1  | ■ Ciénega                |
| ② Perfil de sedimentos TBP1 | --- Arroyo Agua Caliente |
| ③ Perfil de sedimentos TBP2 | --- Afluentes            |
| ④ Perfil de sedimentos TBP3 | --- Brecha               |
|                             | — Curva de nivel         |

Figura 6. Localización del sitio de estudio y trabajos previos en la ciénega Tonibabi.



Antes de realizar el muestreo y la descripción de los sedimentos del perfil, se eliminó el material superficial utilizando una pala, esto con el propósito de poner al descubierto la litología y eliminar cualquier rastro de contaminación causada por la erosión de la superficie (Figura 7).

La descripción de los sedimentos del perfil se realizó a partir de las características físicas observadas, como tamaño de grano y color del sedimento. A partir de las diferencias identificadas en el sedimento el perfil, se obtuvieron las unidades sedimentarias, cuyos espesores fueron medidos utilizando una cinta métrica.



Figura 7. Perfil de sedimentos TBP3, ciénega de Tonibabi, Sonora, México.

El muestreo se realizó con ayuda de una espátula, obteniéndose paquetes de sedimento de 5 cm de altura por 10 cm de ancho y aproximadamente 5 cm de fondo, partiendo desde la cima del perfil de sedimentos TBP3. Las muestras obtenidas (Tabla 2) fueron resguardadas en bolsas de plástico debidamente etiquetadas para los distintos análisis en laboratorio.

Tabla 2. Muestras obtenidas del perfil TBP3 para el análisis geoquímico y de diatomeas fósiles. <sup>a</sup> Muestra únicamente para análisis geoquímico. <sup>b</sup> Muestra únicamente para análisis de diatomeas.

Número de muestra	Profundidad del perfil (cm)	Nombre de la muestra
1	0 - 20	TBP3-20 <sup>a</sup>
2	35 - 40	TBP3-40
3	40 - 55	TBP3-50 <sup>b</sup>
4	55 - 60	TBP3-60
5	75 - 80	TBP3-80
6	95 - 100	TBP3-100
7	115 - 120	TBP3-120
8	135 - 140	TBP3-140
9	155 - 160	TBP3-160
10	175 - 180	TBP3-180
11	195 - 200	TBP3-200
12	205 - 210	TBP3-210
13	215 - 220	TBP3-220

#### **4.2 Datación por radiocarbono**

Una muestra de carbones, encontrados a la profundidad de 220 cm (TBP3-220), se extrajo para su datación. El análisis fue realizado por el Laboratorio Beta-Analytic Inc., en Miami, Florida, Estados Unidos, a través del análisis de radiocarbono (<sup>14</sup>C) por espectrometría de masas con aceleradores (AMS, por sus siglas en inglés). El resultado obtenido fue calibrado utilizando la base de datos INTCAL13 (Talma y Vogel, 1993; Reimer et al., 2013), y se muestra en años calibrados antes del Presente (cal AP).

Para calcular la edad de las muestras de sedimento, se construyó el modelo de edad del perfil de sedimentos TBP3, utilizando el resultado obtenido por radiocarbono en la base del perfil (TBP3-220), y la edad de la cima estimada por correlación a partir de los resultados obtenidos por Espinoza-Encinas (2012).

### **4.3 Análisis geoquímico**

Las muestras seleccionadas para el análisis geoquímico (Tabla 2) fueron tratadas por el método de espectroscopía de Emisión de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-ES, por sus siglas en inglés) en el laboratorio Bureau Veritas Minerals, en Hermosillo, Sonora. En este análisis se obtuvieron las concentraciones de los elementos: aluminio (Al), calcio (Ca), estroncio (Sr), hierro (Fe), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na) y titanio (Ti). Con las concentraciones de Al, Ca, Na y K se estimó el Índice de Alteración Química (CIA, por sus siglas en inglés), propuesto por Nesbitt y Young (1982):

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \times 100$$

*\*representa la cantidad de CaO en los minerales silicatados únicamente*

El valor de CaO\* fue obtenido con el método propuesto por McLennan (1993), el cual consiste en aceptar los valores de CaO solamente si  $CaO < Na_2O$ , en caso contrario se sustituye su valor por el de Na<sub>2</sub>O.

El índice de escorrentía se obtuvo a partir del elemento que presentó el mayor coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) positivo con respecto a los valores calculados de CIA. El índice de salinidad se obtuvo con el elemento que presentó el mayor R<sup>2</sup> negativo, con respecto a los valores calculados del CIA. Las gráficas y cálculos fueron realizados con el programa Microsoft Excel®.

#### **4.4 Análisis de diatomeas**

El procesamiento para el análisis de diatomeas se llevó a cabo en el Laboratorio de Recursos Naturales del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS). Para cada muestra seleccionada del perfil de sedimentos TBP3 (Tabla 2), se pesaron alrededor de 20 g de sedimento en una balanza analítica previamente normalizada, y se dejaron secar a temperatura ambiente por 48 horas.

Posteriormente, se agregaron 0.5 g de sedimento seco en vasos de precipitado de 250 ml, previamente etiquetados. A continuación, utilizando una probeta gradada, se le añadió a cada vaso de precipitado 30 ml de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), para eliminar la materia orgánica de los sedimentos, y se dejó reaccionar a temperatura ambiente por 5 minutos, aproximadamente. En seguida, se colocaron en una placa de calentamiento por aproximadamente 30 minutos, para acelerar la reacción. Al finalizar la reacción, las muestras se retiraron de la placa de calentamiento y se dejaron enfriar a temperatura ambiente.

Después de enfriar las muestras, se vaciaron en tubos de ensayo previamente lavados y etiquetados. A continuación, se les añadió agua desionizada con el propósito de neutralizar el pH. Las muestras contenidas en los tubos de ensayo fueron centrifugadas a 3000 revoluciones por minuto (rpm) durante 5 minutos en una centrífuga Thermo Scientific® modelo Sorvall ST 8. Al terminar el centrifugado, se desechó el líquido y se repitió el proceso en tres ocasiones más, para obtener la muestra con pH neutro. Finalizado este procedimiento, las muestras fueron almacenadas en frascos de plástico, previamente etiquetados, aforándolos a 60 ml.

Para montar las preparaciones en los portaobjetos, se utilizó una micropipeta Transferpette®, con capacidad de 10 µl. Las muestras fueron colocadas en un cubreobjetos colocado sobre la placa de calentamiento para evaporar el agua de la muestra. Una vez seca la muestra, se le añadió al cubreobjetos una gota de Naphrax®, para sellar el montaje en el portaobjetos.

Los montajes fueron observados en un microscopio Leica® Gallen III, con una ampliación de 100x, utilizando aceite de inmersión. Las especies de diatomeas fueron identificadas en base a su ornamentación, utilizando los atlas de referencia de Krammer y Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, 1991b). La ecología de las diatomeas fue interpretada con base en los trabajos de Bradbury (1971), Gasse (1980), Caballero-Miranda (1971) y Van Dam et al. (1994).

Para cada muestra se realizó un conteo mínimo de 400 valvas, siguiendo la metodología propuesta por Fabry y Leclercq (1984), Scherer (1988), Van Dam (1996) y Battarbee et al., (2001). En las muestras con menor abundancia, se realizaron conteos mínimos de 100 valvas. La abundancia total de valvas de diatomeas por muestra fue calculada utilizando la fórmula propuesta por Gasse (1980):

$$A_t = F \left( \frac{Ac}{(L)(D)} \right) \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \left( \frac{1}{P} \right)$$

Donde:

$A_t$  = abundancia total expresada en valvas/g de sedimento seco

$F$  = número de valvas contadas

$Ac$  = área del cubreobjetos

$L$  = longitud del cubreobjetos

$D$  = distancia del conteo

$V_1$  = volumen del frasco de almacenaje

$V_2$  = volumen tomado en la micropipeta

$P$  = peso de sedimento seco al inicio del tratamiento

Los conteos obtenidos de cada muestra fueron capturados en una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel®, donde fueron calculadas las frecuencias relativas de cada taxón con base en el total de valvas identificadas. Las frecuencias relativas fueron exportados al programa Tilia® 2.1.1 (Grimm, 1991-2018) para graficar los resultados del análisis de diatomeas.

Los valores de pH fueron calculados para cada muestra del Perfil TBP3 obtenidos mediante el método propuesto por Holmes et al. (1989), el cual utiliza cuatro de los cinco grupos de diatomeas clasificadas de acuerdo con sus preferencias en pH. El método consiste en valorar el pH aplicando la siguiente fórmula:

$$pH = 7.08 - (0.0086 \times \% ACP) + (0.0012 \times \% IND) + (0.0081 \times \% ALP) + (0.021 \times \% ALB)$$

Donde:        ACP = acidófilas,  
                  IND = indiferentes + circumneutrales,  
                  ALP = alcalófilas,  
                  ALB = alcalibiónticas

#### **4.5 Análisis estadístico**

Los tratamientos estadísticos realizados con los datos obtenidos del análisis geoquímico y análisis de diatomeas incluyeron el análisis de agrupamiento aglomerativo y jerárquico estratigráficamente restringido (CONISS, por sus siglas en inglés) y el análisis de correspondencia sin tendencia (DCA, por sus siglas en inglés).

El análisis CONISS (Grimm, 1987) se utilizó para agrupar los datos obtenidos de las muestras que presentaron una semejanza en los conjuntos de diatomeas preservadas en los sedimentos. Este análisis se llevó a cabo por el método de suma total de cuadrados, incluido en el programa Tilia® 2.1.1 (Grimm, 1991-2018).

El DCA (Gauch, 1982; Pielou, 1984) se realizó en el programa Past 3.23 (Hammer et al., 2001) utilizando todo el conjunto de datos obtenidos del análisis geoquímico y análisis de diatomeas, para agrupar los datos a partir de las semejanzas que presentan las muestras sin restricción estratigráfica.

## **V. RESULTADOS**

Se muestreó un perfil de sedimentos, denominado en el presente estudio como Perfil TBP3, ubicado al sureste de la Ciénega Tonibabi, en el municipio de Moctezuma, Sonora, México. El Perfil TBP3 se localiza en las coordenadas geográficas 29°50'17.47'' de latitud norte, 109°33'48.44'' de longitud oeste, a 776 msnm (Figura 6).

### **5.1 Estratigrafía**

El Perfil TBP3 presenta ocho unidades sedimentarias, las cuales fueron establecidas a partir de las observaciones hechas en campo, basadas en el tamaño de las partículas y el color de los sedimentos (Figura 7), las cuales se describen a continuación:

- *Unidad A (234 – 218 cm)*. Grava arenosa de composición granítica color café oscuro. La unidad se localiza en la base del Perfil TBP3.
- *Unidad B (218 – 166 cm)*. Limos arcilloso color negro, con abundante materia orgánica. Contiene un lente de arena gruesa color beige en la profundidad 180 – 175 cm.
- *Unidad C (166 – 148 cm)*. Arena gravosa de composición granítica color gris. La grava se presenta angulosa a subangulosa, con un diámetro mayor a 2 cm.
- *Unidad D (148 – 80)*. Limo arenoso color café grisáceo, con algunas raíces. Representa la unidad con mayor espesor del perfil TBP3.
- *Unidad E (80 – 75 cm)*. Limo arenoso color gris claro. Presenta granos de arena media a gruesa de composición granítica.
- *Unidad F (75 – 45 cm)*. Arena limosa color café grisáceo, con grava de composición granítica mayor a 1 cm y algunas raíces.
- *Unidad G (45 – 30 cm)*. Limo color negro, con grava milimétrica de composición granítica y abundante materia orgánica.
- *Unidad H (30 – 0 cm)*. Suelo areno-gravoso color café grisáceo, con abundantes raíces. Fragmentos de arena y grava de composición granítica. La unidad se localiza en la cima del Perfil TBP3.

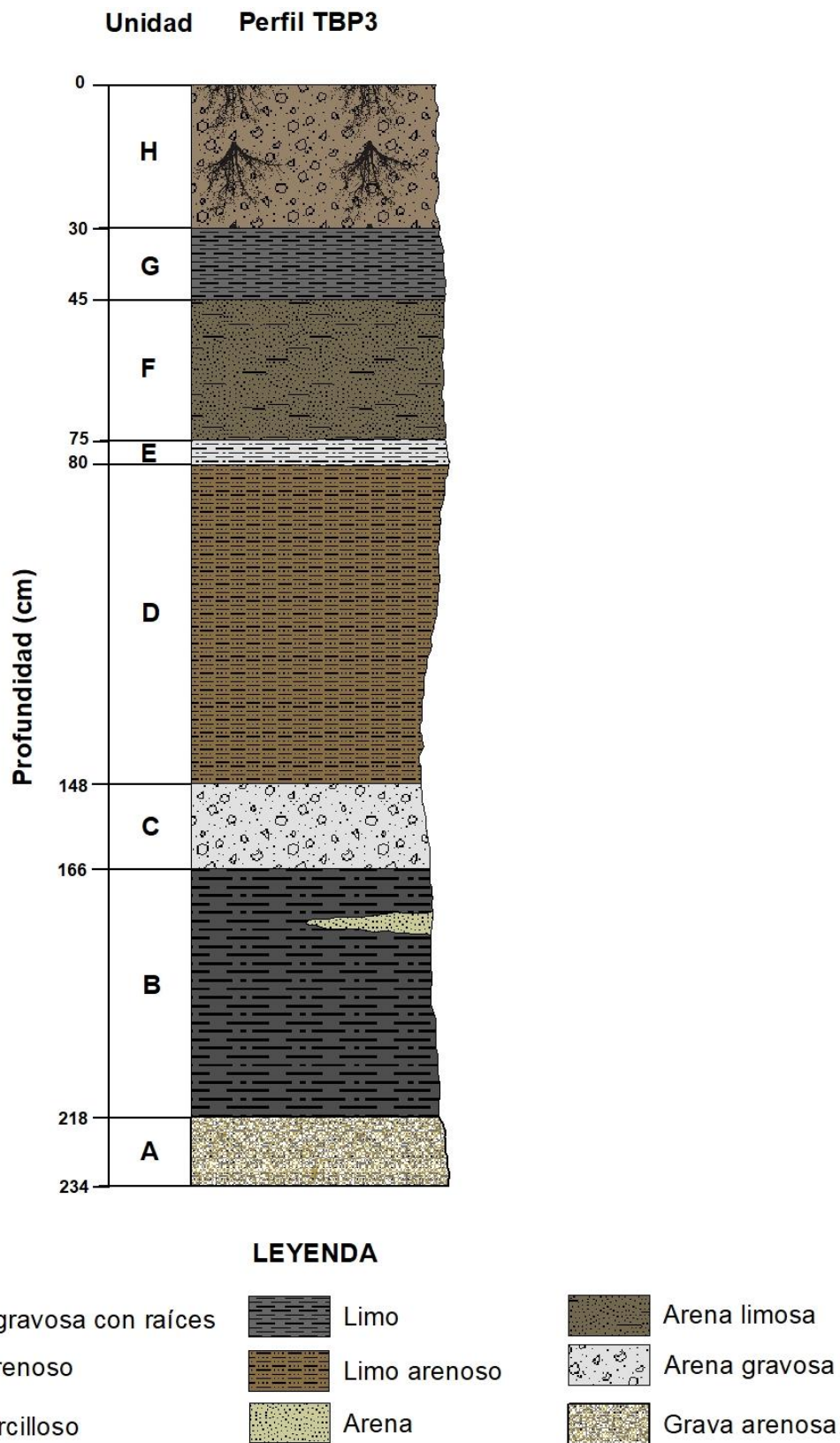


Figura 8. Columna estratigráfica del Perfil TBP3.



## 5.2 Fechamiento por carbono 14

La muestra de carbones TBP3-220 analizada para su datación por el método de carbono 14 (Tabla 3), fue calibrada en 5,700 años AP, con una probabilidad de 95%.

Tabla 3. Edad de la muestra TBP3-220.

Muestra	Código de laboratorio	Profundidad (cm)	Edad <sup>14</sup> C (años AP)	Edad calibrada (años cal AP)	Material fechado
TBP3-220	Beta-430518	220	4,990 ± 30	5,700	Carbón

El modelo de edad del Perfil TBP3 (Figura 9), se construyó a partir de un modelo matemático lineal, utilizando la edad calibrada de la muestra TBP3-220 para la base del perfil y, mediante correlación estratigráfica, la edad calibrada de la muestra TBP2-120 (2,490 años cal AP), localizada en la parte orgánica más superficial del Perfil TBP2, para la profundidad de 55 cm del Perfil TBP3.

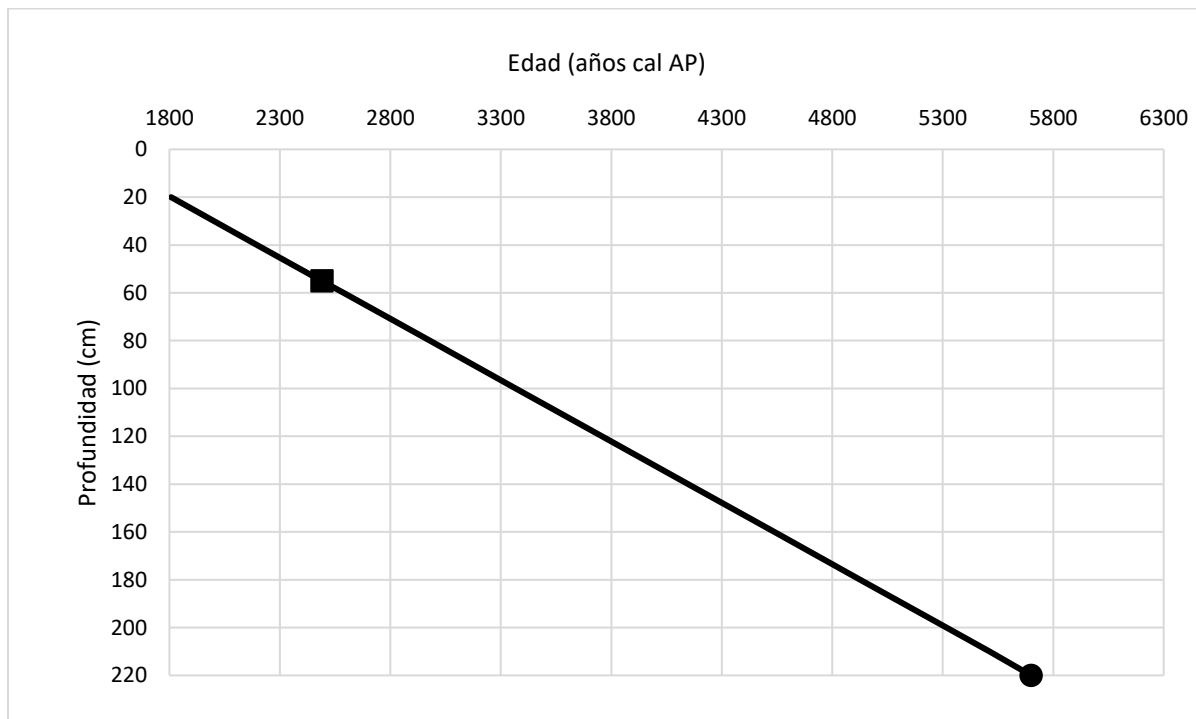


Figura 9. Modelo de edad para el Perfil TBP3. Cuadrado: 2,490 años cal AP (muestra TBP2-120); círculo: 5,700 años cal AP (muestra TBP3-220).

A partir del modelo edad del Perfil TBP3 se calcularon las edades de las muestras analizadas del Perfil TBP3 (Tabla 4).

Tabla 4. Estimación de la edad de las muestras analizadas.

Nombre de la muestra	Edad (años cal AP)
TBP3-20	1,808
TBP3-40	2,198
TBP3-50	2,490
TBP3-60	2,588
TBP3-80	2,978
TBP3-100	3,368
TBP3-120	3,758
TBP3-140	4,148
TBP3-160	4,538
TBP3-180	4,928
TBP3-200	5,318
TBP3-210	5,513
TBP3-220	5,700

### 5.3 Geoquímica

Las concentraciones de Al (1.88-6.76%), Fe (0.71-1.94%), Ti (0.05-0.25%), Mg (0.09-0.31%), Ca (0.28-0.81%), K (0.63-3.41%), Na (0.68-2.41%) y Sr (134-276 ppm) en los sedimentos del Perfil TBP3 se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Concentraciones de elementos en el Perfil TBP3.

Muestra	Al (%)	Fe (%)	Ti (%)	Mg (%)	Ca (%)	K (%)	Na (%)	Sr (ppm)
TBP3-20	5.89	0.96	0.14	0.18	0.40	2.97	2.41	148
TBP3-40	6.03	1.94	0.17	0.31	0.52	2.43	1.65	249
TBP3-60	6.76	1.31	0.17	0.25	0.41	3.22	2.36	200
TBP3-80	3.28	0.97	0.09	0.20	0.28	1.14	0.80	161
TBP3-100	4.56	1.21	0.14	0.27	0.42	1.69	1.27	276
TBP3-120	2.04	0.80	0.06	0.11	0.59	0.70	0.75	216
TBP3-140	1.88	0.71	0.05	0.09	0.59	0.63	0.68	252
TBP3-160	5.03	0.78	0.10	0.11	0.29	2.98	1.87	134
TBP3-180	6.73	1.15	0.17	0.19	0.52	3.41	2.41	168
TBP3-200	4.13	1.32	0.13	0.18	0.81	1.34	1.11	171
TBP3-210	6.27	1.93	0.25	0.26	0.52	2.32	2.03	229
TBP3-220	6.24	1.31	0.19	0.20	0.63	2.93	2.23	194

Los elementos Fe, Ti y Mg presentan una distribución similar a lo largo del Perfil TBP3 (Figura 10), mostrando valores máximos en las muestras TBP3-210 y TBP3-40, y valores mínimos en la muestra TBP3-140.

Los elementos Fe, K y Na presentan una distribución semejante entre sí (Figura 10). En las muestras TBP3-180 y TBP3-60 se observan sus valores máximos, mientras que en la muestra TBP3-140 sus valores mínimos, al igual que los elementos Fe, Ti y Mg.

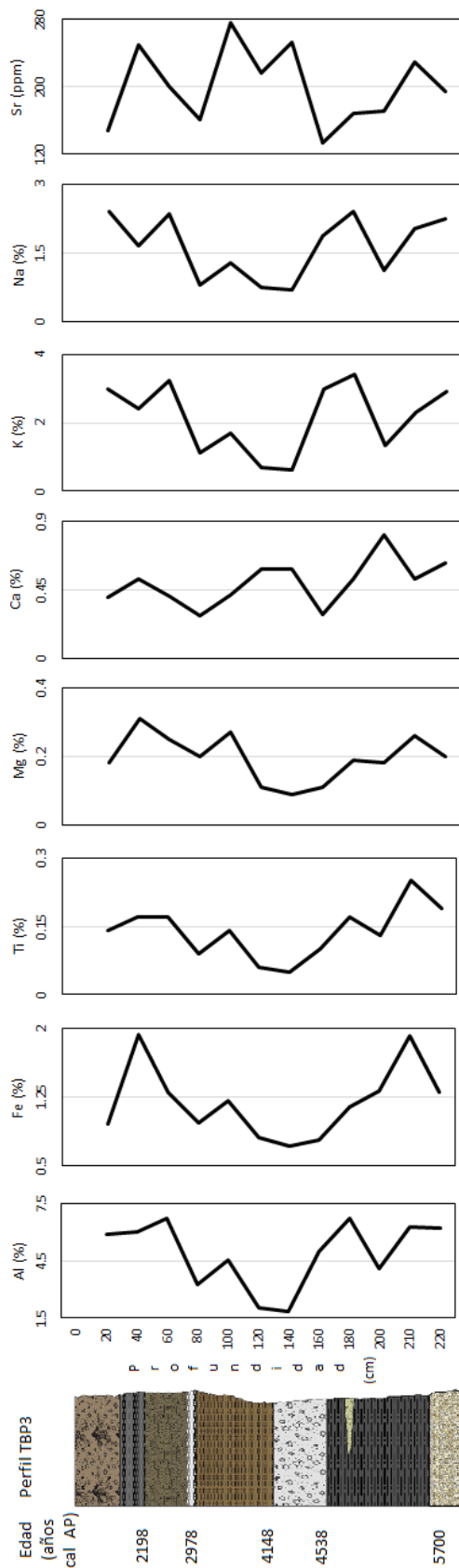


Figura 10. Estratigrafía y concentraciones de los elementos Al, Fe, Ti, Mg, Ca, K, Na y Sr del Perfil TBP3.

Un comportamiento diferente exhibe los elementos Ca y Sr (Figura 10). El valor máximo y mínimo para el elemento Ca se encuentra en las muestras TBP3-200 y TBP3-80, respectivamente. El elemento Sr presenta su valor máximo en la muestra TBP3-100 y su valor mínimo en la muestra TBP3-160.

El Índice de Alteración Química presenta valores que oscilan entre 48.1 y 60.9 (Figura 11). Partiendo de la base del Perfil TBP3, se observa un decremento progresivo hasta la muestra TBP3-120, incrementándose los valores hacia la cima. Los valores del Índice de Alteración Química de las muestras analizadas fluctúan en el rango de intemperismo bajo o incipiente, a excepción de las muestras TBP3-120 y TBP3-140 que son clasificadas dentro del campo de intemperismo nulo, y la muestra TBP3-80 con intemperismo medio o moderado (según Nesbitt y Young 1984; 1989).

La concentración de los elementos Al, Fe, Ti y Mg presentan una clara tendencia positiva al incrementarse el Índice de Alteración Química (Figura 12), siendo el Mg el elemento con el mayor coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.6358$ ), seguido de Fe ( $R^2 = 0.3593$ ). Los elementos K, Na y Sr muestran una tendencia positiva más sutil que los elementos anteriores (Figura 12). El elemento Ca exhibe una tendencia negativa al comportamiento del Índice de Alteración Química, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.0843$ .

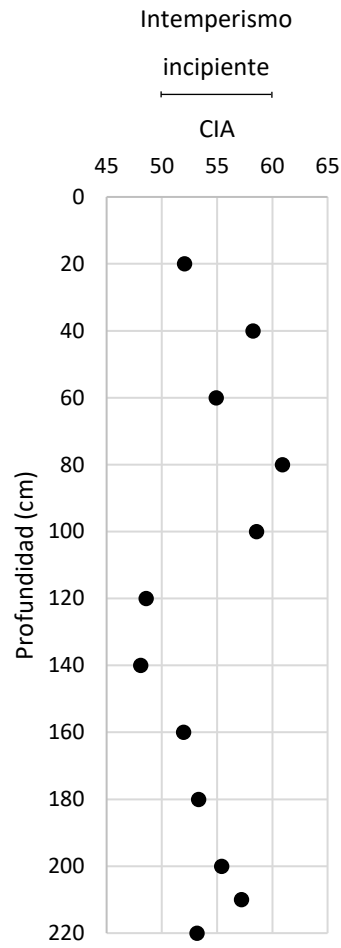


Figura 11. Índice de Alteración Química del Perfil TBP3.

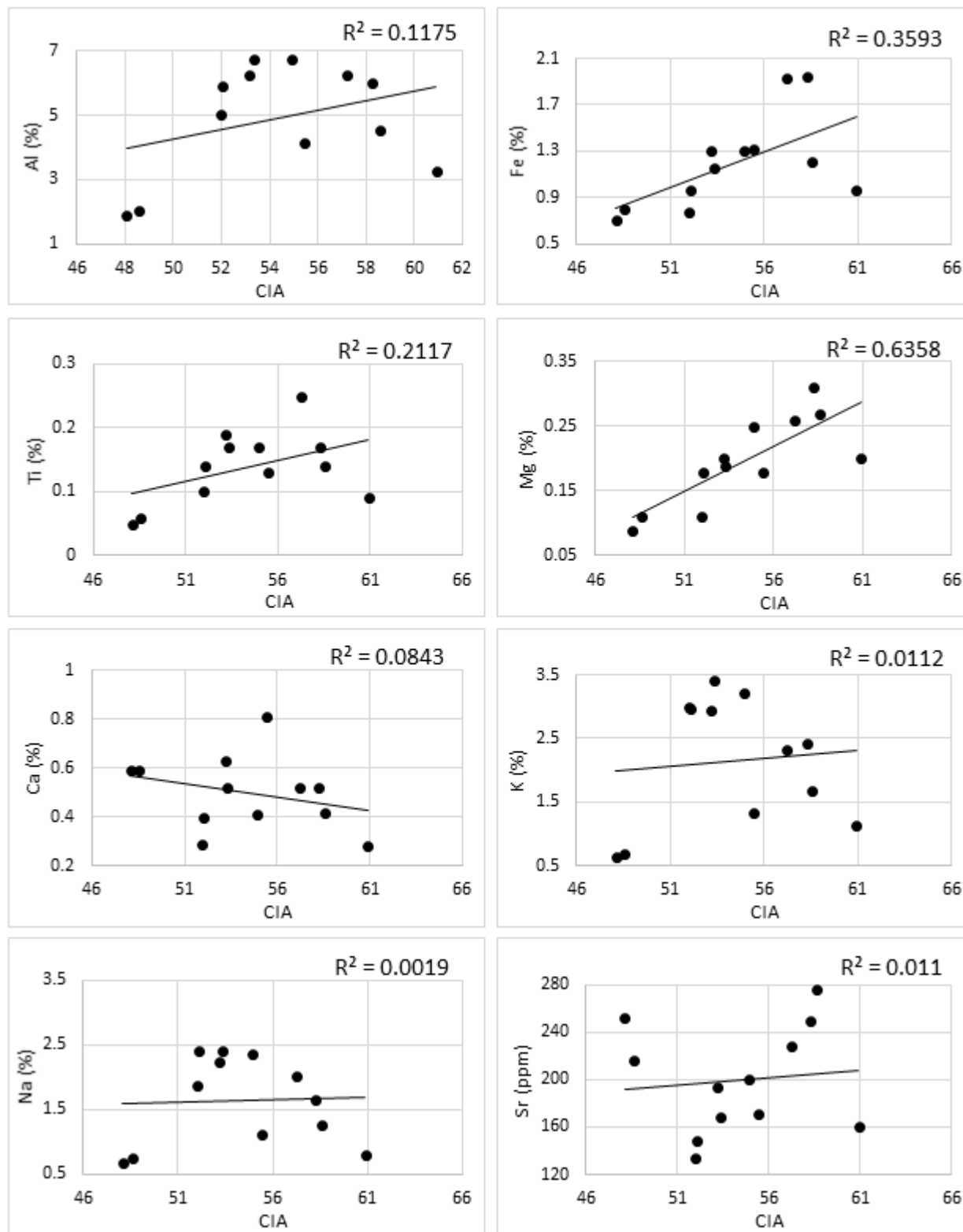


Figura 12. Concentración de cada elemento contra Índice de Intemperismo Químico.

#### **5.4 Diatomeas fósiles**

Se analizaron 13 muestras de sedimentos del Perfil TBP3, en diez de las muestras se contó como mínimo 400 valvas por muestra, dos de las muestras (TBP3-160 y TBP3-180) presentaron baja concentración, por lo que solo se contaron 100 valvas por muestra. La muestra TBP3-20 no presentó valvas completas, solo se observaron algunos fragmentos, por lo cual no se tomó en cuenta para el análisis.

Se identificó un total de 24 taxones (Tabla 6), 20 fueron reconocidos a nivel taxonómico de especie y tres a nivel de género. Las diatomeas dominantes en el perfil son *Denticula elegans* con una frecuencia relativa máxima de 72% y *Rhopalodia gibberula* con 55%. Taxones como *Diploneis elliptica* y *Epithemia adnata* presentan un porcentaje máximo de 16%, y *Epithemia turgida* con 11%. Los taxones con frecuencias relativas entre 1 y 5% son: *Amphora venneta*, *Navicula brasiliensis*, *Navicula radiosa*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea*, *Pinnularia viridis*, *Rhopalodia gibba* y *Surirella sp.* El resto de los taxones, *Eunotia minor*, *Ulnaria ulna*, *Caloneis limosa*, *Caloneis sp.*, *Cocconeis placentula*, *Encyonema caespitosum*, *Gomphonema pumilum*, *Navicula splendicula*, *Planothidium lanceolatum*, *Anomoeoneis sphaerophora* y *Mastogloia elliptica*, presentan una abundancia menor a 1%.

La representación de las frecuencias relativas de los taxones de cada muestra se observa en el diagrama de diatomeas fósiles (Figura 13). El diagrama fue dividido en cinco zonas de diatomeas, con base en el análisis CONISS.



Tabla 6. Paleoecología de las diatomeas identificadas en el perfil TBP3.

Taxón	Forma de vida	Salinidad	pH
<i>Ulnaria ulna</i>	Ticoplanctónica	Oligohalobia	Alcalófila
<i>Eunotia minor</i>	Bentónica	Oligohalobia	Acidófila
<i>Amphora venneta</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalibiónica
<i>Caloneis sp.</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalibiónica
<i>Caloneis limosa</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalibiónica
<i>Cocconeis placentula</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalófila
<i>Denticula elegans</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalibiónica
<i>Diploneis elliptica</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalófila
<i>Encyonema caespitosum</i>	Bentónica	Oligohalobia	Circumneutral
<i>Epithemia adnata</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalibiónica
<i>Epithemia turgida</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalibiónica
<i>Gomphonema pumilum</i>	Bentónica	Oligohalobia	Circumneutral
<i>Navicula brasiliensis</i>	Bentónica	Oligohalobia	Circumneutral
<i>Navicula radiosa</i>	Bentónica	Oligohalobia	Circumneutral
<i>Navicula splendicula</i>	Bentónica	Oligohalobia	Circumneutral
<i>Nitzschia amphibia</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalófila
<i>Nitzschia palea</i>	Bentónica	Oligohalobia	Circumneutral
<i>Planothidium lanceolatum</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalófila
<i>Pinnularia viridis</i>	Bentónica	Oligohalobia	Circumneutral
<i>Rhopalodia gibba</i>	Bentónica	Oligohalobia	Alcalibiónica
<i>Anomoeoneis sphaerophora</i>	Bentónica	Polihalobia	Alcalibiónica
<i>Surirella sp.</i>	Bentónica	Polihalobia	Alcalibiónica
<i>Rhopalodia gibberula</i>	Bentónica	Polihalobia	Alcalófila
<i>Mastogloia elliptica</i>	Bentónica	Polihalobia	Alcalófila

**Zona A (220 – 215 cm; 5,700 a 5,607 años cal AP).** Corresponde a los últimos 5 cm de profundidad del perfil TBP3. Se caracteriza por el dominio de *Denticula elegans* con una frecuencia relativa entre 38 y 59%, y de *Rhopalodia gibberula* con una abundancia entre 24 y 35%. *Epithemia adnata* presenta un porcentaje entre 6 y 10% seguido de *Diploneis elliptica* con una frecuencia entre 2 y 10%. Los taxones que muestran porcentajes menores a 5% son: *Caloneis sp.*, *Cocconeis placentula*, *Epithemia turgida*, *Navicula brasiliensis*, *Navicula radiosa*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea* y *Pinnularia viridis*.

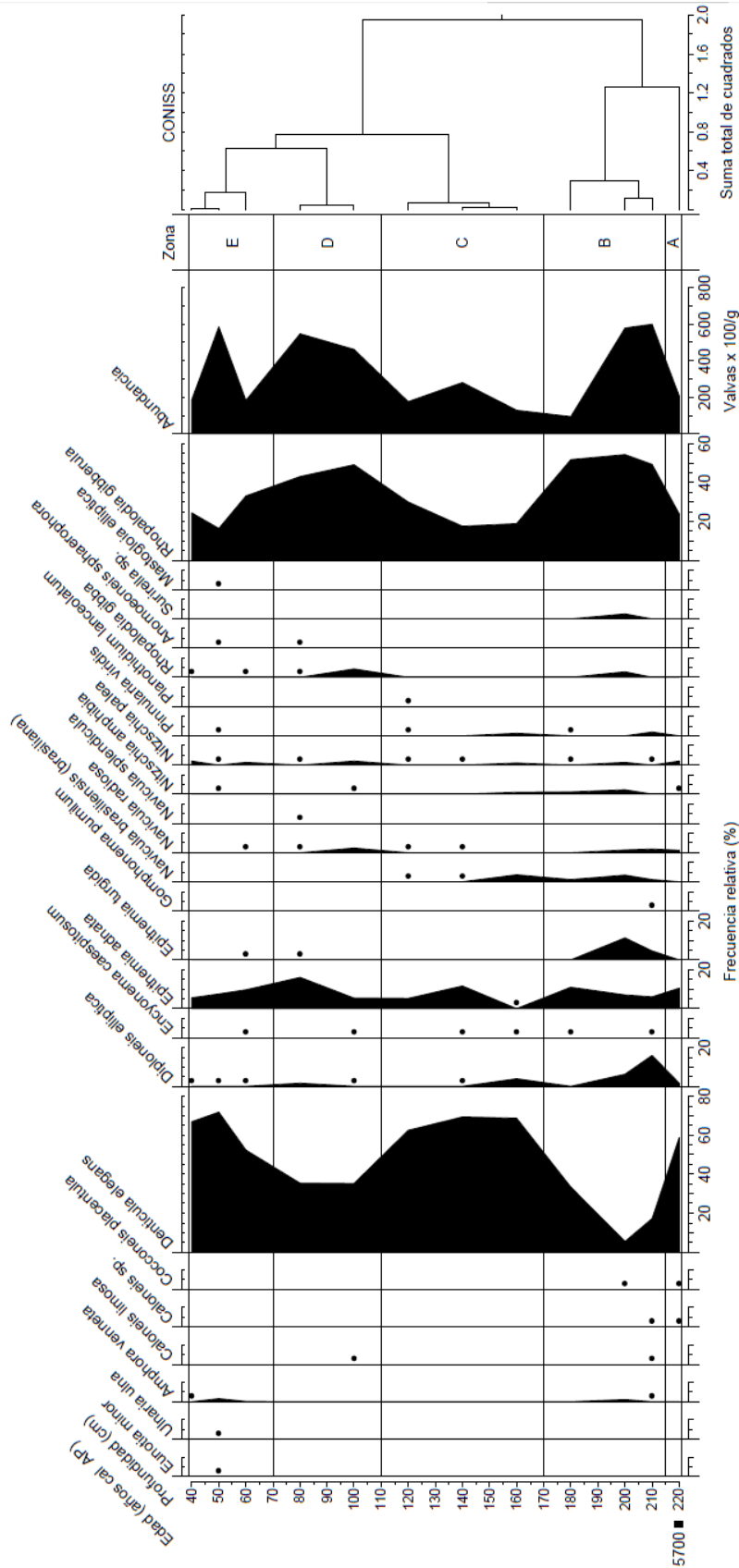
**Zona B (215 – 170 cm; 5,607 a 4,733 años cal AP).** Esta zona compete parte de la base del perfil TBP3 y está caracterizada por ser la zona con mayor abundancia de diatomeas para una única muestra y la de mayor registro de taxones en de este estudio. El taxón dominante en esta zona es *Rhopalodia gibberula* con una frecuencia relativa entre 35 y 55%. *Denticula elegans* reduce la abundancia entre 6 y 50%. *Diploneis elliptica* presenta un porcentaje máximo de 16%; mientras que *Epithemia adnata* y *Epithemia turgida* alcanzan frecuencias máximas de 11%. El resto de los taxones con abundancia menor a 5% son: *Amphora veneta*, *Caloneis limosa*, *Caloneis sp.*, *Cocconeis placentula*, *Encyonema caespitosum*, *Navicula brasiliensis*, *Navicula radiosa*, *Gomphonema pumilum*, *Nitzschia amphibia*, *Pinnularia viridis*, *Rhopalodia gibba* y *Surirella sp.*

**Zona C (170 – 110 cm; 4,733 a 3,563 años cal AP).** Pertenece a la parte media del perfil TBP3. Se caracteriza por el dominio nuevamente de *Denticula elegans* con una frecuencia relativa entre 48 y 70%. *Rhopalodia gibberula* disminuye la abundancia entre 18 y 40% mientras que *Epithemia adnata* aumenta ligeramente a un porcentaje máximo de 12%. Otros taxones menores a 5% son: *Diploneis elliptica*, *Encyonema caespitosum*, *Navicula brasiliensis*, *Navicula radiosa*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea*, *Pinnularia viridis*, *Planothidium lanceolatum* y *Rhopalodia gibba*.

**Zona D (110 – 70 cm; 3,563 a 2,783 años cal AP).** Esta zona es caracterizada por el regreso al dominio de *Rhopalodia gibberula* con un porcentaje entre 39 y 51%; le sigue *Denticula elegans* con una frecuencia relativa entre 35 y 50%. *Epithemia adnata* vuelve a aumentar a un porcentaje entre 5 y 16% al igual que *Rhopalodia gibba* alcanzando un máximo porcentaje de 5%. Los taxones remanentes menores a una abundancia de 5% son: *Caloneis limosa*, *Diploneis elliptica*, *Encyonema caespitosum*, *Epithemia turgida*, *Navicula radiosa*, *Navicula splendicula*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea* y *Anomoeoneis sphaerophora*.

**Zona E (70 – 40 cm; 2,783 a 2,198 años cal AP).** Representa la cima del perfil TBP3 incluyendo 40 cm de suelo. Se caracteriza por la abundancia relativa de *Denticula elegans* con un porcentaje entre 45 y 72%, le sigue *Rhopalodia gibberula* con una frecuencia entre 20 y 40%. *Epithemia adnata* decremента ligeramente a una abundancia entre 7 y 16%. El resto de los taxones con una frecuencia relativa menor a 5% son: *Eunotia minor*, *Ulnaria ulna*, *Amphora venneta*, *Diploneis elliptica*, *Encyonema caespitosum*, *Epithemia turgida*, *Navicula radiosa*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea*, *Pinnularia viridis*, *Rhopalodia gibba*, *Anomoeoneis sphaerophora* y *Mastogloia elliptica*.

Registro paleohidrológico y micropaleontológico de la transición Norgripiano-Megalayano en la ciénega Tonibabi, Sonora, México



### 5.5 Análisis de correspondencia sin tendencia

El análisis de correspondencia sin tendencia (DCA) separa en 4 grupos a la totalidad de las variables estudiadas (Figura 14).

En el Grupo 1 se encuentran las diatomeas *Surirella sp.* y *Epithemia turgida*. En el Grupo 2 se sitúan la mayoría de las especies, incluyendo *Denticula elegans*, *Rhopalodia gibberula* y *Epithemia adnata*, así como el todo el conjunto de elementos analizados. En el Grupo 3 se localizan las diatomeas *Amphora venneta* y *Anomoeoneis sphaerophora*. En el Grupo 4 están *Ulnaria ulna*, *Eunotia minor*, única diatomea ticoplanctónica y acidófila de este estudio respectivamente, y *Mastogloia elliptica*.

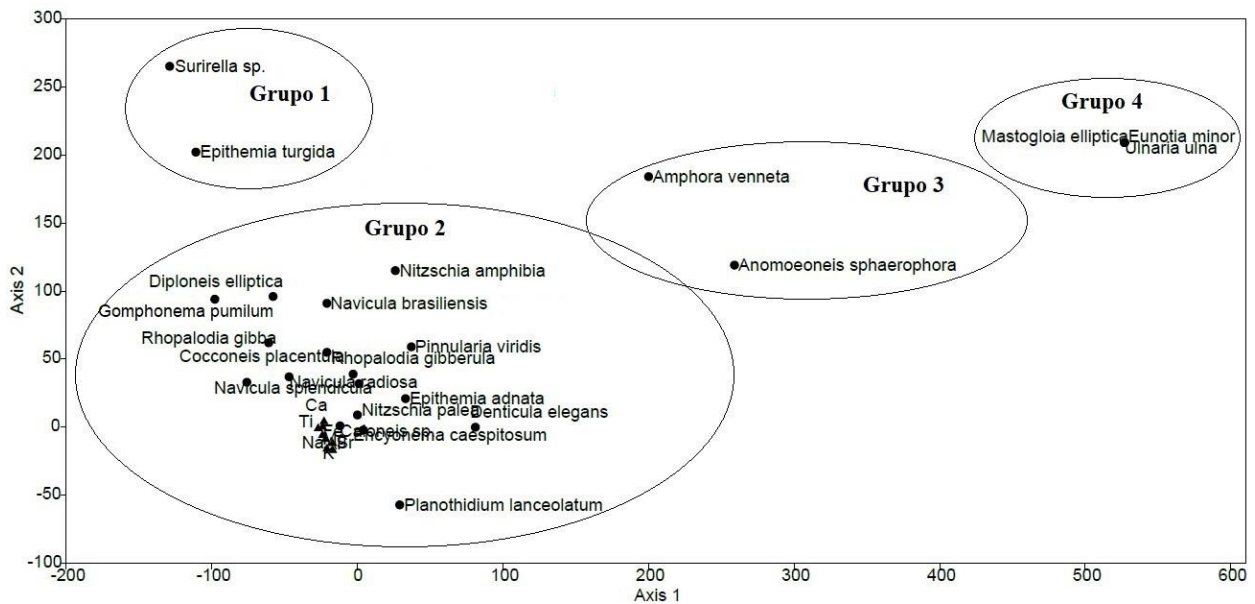


Figura 14. DCA para el total de las variables estudiadas. Los círculos indican las especies de diatomeas y los triángulos indican los elementos químicos.

## VI. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del análisis geoquímico y de diatomeas fósiles permiten reconstruir los ambientes pasados de la ciénega Tonibabi e inferir las condiciones paleohidrológicas y paleoclimáticas en los últimos 5,700 años en sus alrededores. Asimismo, el análisis estratigráfico del Perfil TBP3, con el apoyo de estudios previos en la ciénega, fue posible determinar las correlaciones cronoestratigráficas y litoestratigráficas del perfil estudiado.

### 6.1 Correlación estratigráfica de los perfiles TBP2 y TBP3

El Perfil TBP2, ubicado en las coordenadas geográficas 29°50'17.73'' de Latitud Norte, 109°33'48.85'' de Longitud Oeste, a 771 msnm (Espinoza-Encinas, 2012), 6 m al noroeste del Perfil TBP3 (Figura 6). Ambos perfiles se encuentran expuestos por el mismo afluente del arroyo Agua Caliente. Se identificaron siete unidades en el perfil TBP2, las cuales fueron correlacionables con el perfil TBP3, de acuerdo con sus características litológicas (Figura 15), presentando ligeras variaciones en los cambios de sedimentación (Tabla 7), para definir la cronología de los eventos de sedimentación.

Tabla 7. Descripción de la correlación estratigráfica de los perfiles TBP2 y TBP3.

Unidad	Descripción	Presente en TBP2
A	Grava arenosa color café oscuro.	NO
B	Limo arcilloso color negro con lente de arena color beige.	SI
C	Arena gravosa color gris.	SI
D	Limo arenoso color café grisáceo.	SI
E	Limo arenoso color gris claro.	NO
F	Arena limosa color café grisáceo.	NO
G	Limo color negro.	NO
H	Suelo areno-gravoso color café grisáceo.	SI

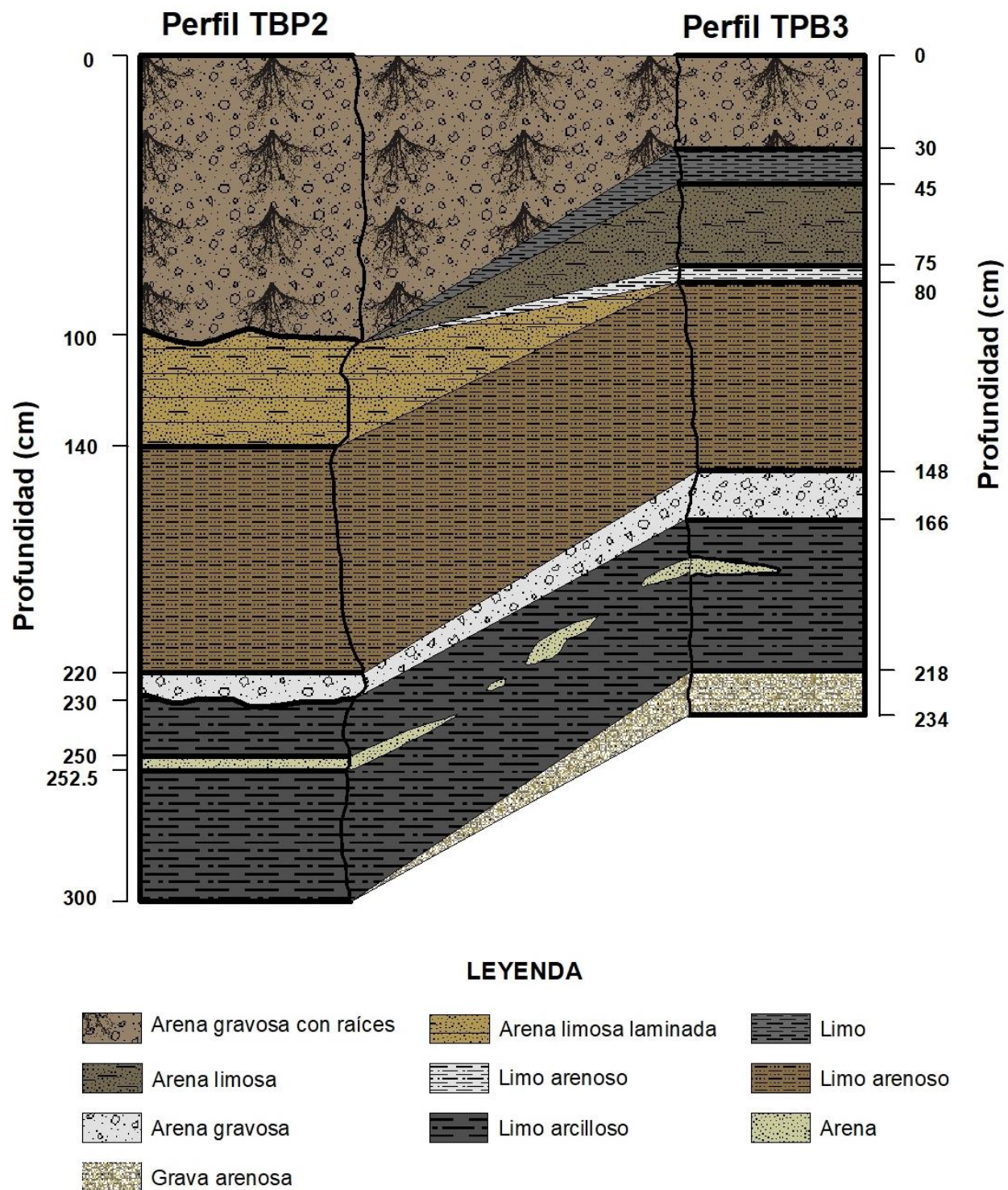


Figura 15. Correlación estratigráfica de los perfiles TBP2 y TBP3.

## **6.2 Condiciones paleohidrológicas de la ciénega Tonibabi**

Las condiciones paleohidrológicas del sitio de estudio están dadas por el índice de escorrentía y el índice de salinidad. En el presente trabajo las concentraciones de Mg, Ca y los valores calculados del CIA son utilizados como indicadores paleohidrológicos.

El CIA es utilizado como medida del grado de alteración química de sedimentos y rocas. Los valores del CIA para el Perfil TBP3 varían desde un intemperismo nulo hasta un intemperismo medio o moderado (según Nesbitt y Young 1984; 1989). La mayor parte del perfil se encuentra en el grado de intemperismo bajo o incipiente, lo que indica una baja interacción de los sedimentos con la corriente del arroyo. Las muestras TBP3-120 y TBP3-140 están dentro del rango de intemperismo nulo. Únicamente la muestra TBP3-80 está clasificada en el grado de intemperismo moderado, infiriendo así un aumento en la interacción de la corriente de agua con el sedimento hacia la parte media del perfil.

El índice de escorrentía para los sedimentos del Perfil TBP3 es representado por la concentración de Mg, el cual muestra el mayor coeficiente de determinación con pendiente positiva ( $R^2 = 0.6358$ ), mientras que la concentración de Ca presenta el mayor coeficiente de determinación con pendiente negativa ( $R^2 = 0.0843$ ), por lo tanto, es utilizado como índice de salinidad.

El índice de escorrentía (Mg) representa el aporte de sedimentos hacia una cuenca dependiendo de la cantidad de agua que contienen los ríos y arroyos, así, su incremento refleja condiciones de mayor humedad. El índice de salinidad (Ca) representa la cantidad de sales contenidas en el agua, por lo tanto, un incremento de éste indica periodos de mayor evaporación y sequía.

## **6.3 Diatomeas como indicadores paleoecológicos**

La reconstrucción paleoambiental basada en el estudio de diatomeas requiere del conocimiento de la taxonomía y ecología de las especies de diatomeas actuales (Díaz-Pardo et al., 2008). Por esta razón, es necesario reconocer la ecología actual de las especies identificadas de la ciénega Tonibabi en este estudio, para precisar las condiciones paleoambientales de la ciénega.



La estimación del índice de salinidad a partir del análisis de diatomeas (independiente al índice de salinidad constituido por la concentración de Ca), se basa en el espectro de salinidad de Kolbe (1927), modificado por Lowe (1974) (Tabla 8).

Tabla 8. Espectro de salinidad (modificado de Lowe, 1974).

Categoría	Salinidad (mg/L)
Polihalobias	> 40,000
Euhalobias	30,000 – 40,000
Mesohalobias	500 – 30,000
Mesohalobias $\alpha$	10,000 – 30,000
Mesohalobias $\beta$	500 – 10,000
Oligohalobias	< 500

Espinoza-Encinas (2012) llevó a cabo un estudio de diatomeas actuales de la ciénega Tonibabi, donde se encontró que *Denticula elegans* es la especie más abundante; porcentajes importantes de *Rhopalodia gibberula* se observan en el estudio; y en menor escala *Diploneis elliptica*. En ese estudio es remarcable la ausencia de *Epithemia adnata*, que en abundancia total de especies del presente trabajo es la tercera. *Denticula elegans*, dentro de los medios de aguas continentales, usualmente vive en ambientes lacustres (Shepard, et al., 2000). Respecto a *Rhopalodia gibberula*, es común en aguas saladas y su presencia aumenta conforme crece la salinidad (Escandell et al., 2009). *Epithemia adnata* es común en ambientes dulceacuícolas como pantanos, ríos, lagos y estanques (Beaver, 1981; Escandell et al., 2009).

Es importante la presencia de *Anomoeoneis sphaerophora*, *Mastogloia elliptica* y *Surirella sp.*, debido que junto con *Rhopalodia gibberula*, son las únicas especies polihalobias en el estudio, por lo tanto, indican los periodos más secos de los últimos 5,700 años en la ciénega Tonibabi. *Anomoeoneis sphaerophora* es común en lagos salados alcalinos (Hecky y Kilham, 1973). *Mastogloia elliptica* existe desde aguas salinas hasta aguas salobres en ambientes continentales (Krammer y Lange-Bertalot, 1986). *Surirella sp.* es común en ambientes salados marinos y en transiciones agua dulce-salada (Ruck et al., 2016).

La presencia de *Ulnaria ulna* en el registro del Perfil TBP3, aunque su ocurrencia tiene porcentajes mínimos, es de especial interés debido a que es la única especie ticoplanctónica del presente estudio y es exclusiva de ambientes de agua dulce (Podunay et al., 2014). Las diatomeas ticoplanctónicas se caracterizan por ser originarias de hábitats bentónicos o epífitos, y realizar los procesos reproductivos y metabólicos en zonas planctónicas (Denys, 1992).

#### **6.4 Reconstrucción paleoambiental de la ciénega Tonibabi**

Los resultados de los análisis realizados en el Perfil TBP3, plantean seis fases de cambios ambientales en la ciénega Tonibabi (Figura 18). Cada una de las fases, han sido descritas de acuerdo con el registro de diatomeas y los cambios en la sedimentación del perfil. La salinidad fue clasificada dependiendo de las especies de diatomeas presentes en cada fase, tomando en cuenta el espectro de salinidad (modificado de Lowe, 1974; Tabla 8), se refirió como pantano oligohalino o polihalino (Montagna et al., 2013) según sea el caso.

La primera fase ambiental ocurre durante el Norgripiano, de 5,700 a 5,464 años cal AP, desarrollándose en ella diatomeas oligohalobias (*Denticula elegans* y *Diploneis elliptica* principalmente) a principios de la sedimentación, la cual corresponde a limo arcilloso, para después presentarse un incremento acentuado de diatomeas polihalobias (domina *Rhopalodia gibberula*), con el CIA ligeramente alto y un índice de salinidad alto al finalizar la fase. Para esta primera fase se propone un ambiente de pantano oligohalino con pH alcalino (Figura 19A).

La segunda fase ambiental sucede a finales del Norgripiano, entre 5,464 y 4,733 años cal AP, caracterizada por comenzar con un dominio de diatomeas polihalobias (domina *Rhopalodia gibberula*) durante gran parte de la fase, para luego disminuir notablemente su presencia; la sedimentación se constituye de limo arcilloso y lentes de arena gruesa de espesor delgado; al mismo tiempo se observa un descenso ligero y gradual en el CIA y la salinidad. Se estima un ambiente de pantano polihalino con pH alcalino (Figura 19B).

La tercera fase ambiental acontece durante la transición Norgripiano-Megalayano y gran parte del Megalayano, de 4,733 a 3,563 años cal AP, se trata de un periodo donde también ocurren cambios en el contenido de diatomeas. Con un dominio de diatomeas oligohalobias (*Denticula elegans* y *Epithemia adnata* principalmente) durante la totalidad de la fase, observándose un paulatino decremento en su abundancia. En esta etapa se depositó en una primera etapa limo arcilloso, arena gravosa en una segunda etapa y por último limo arenoso. Se presenta un ligero aumento en el índice de esorrentía y el CIA se mantiene constante. Se plantea un ambiente de pantano oligohalino con pH alcalino para esta fase (Figura 19C).

La cuarta fase corresponde entre 3,563 y 2,783 años cal AP, dentro del Megalayano, sin un claro tipo de diatomeas dominantes al inicio de la fase, debido a que tanto oligohalobias (*Denticula elegans* y *Epithemia adnata*) como polihalobias (*Rhopalodia gibberula*) muestran un porcentaje similar. En una etapa posterior el porcentaje de diatomeas oligohalobias incrementa ligeramente, al mismo tiempo que el CIA presenta los valores más altos y el índice de esorrentía oscila entre valores altos y bajos. La sedimentación es constituida por limo arenoso y arena limosa. Para esta fase se propone un ambiente de pantano polihalino con pH alcalino (Figura 19D).

La quinta fase perdura de 2,783 a 2,003 años cal AP, con predominio de diatomeas oligohalobias (*Denticula elegans* y *Epithemia adnata*), presentando un ligero decremento en el CIA y el índice de esorrentía. Respecto a la sedimentación, se depositó una arena limosa y posteriormente hay una acumulación de limo antes de la formación de suelo. En esta fase se plantea un ambiente de pantano oligohalino con pH alcalino (Figura 19E).

La sexta fase ambiental consiste en la interrupción de la sedimentación de la ciénega por la formación del suelo constituido por una arena gravosa que ocurre desde 2,003 hasta 1,808 años cal AP, debido a la creación de éste, hay ausencia de diatomeas durante la denominada fase seca (Figura 19F).

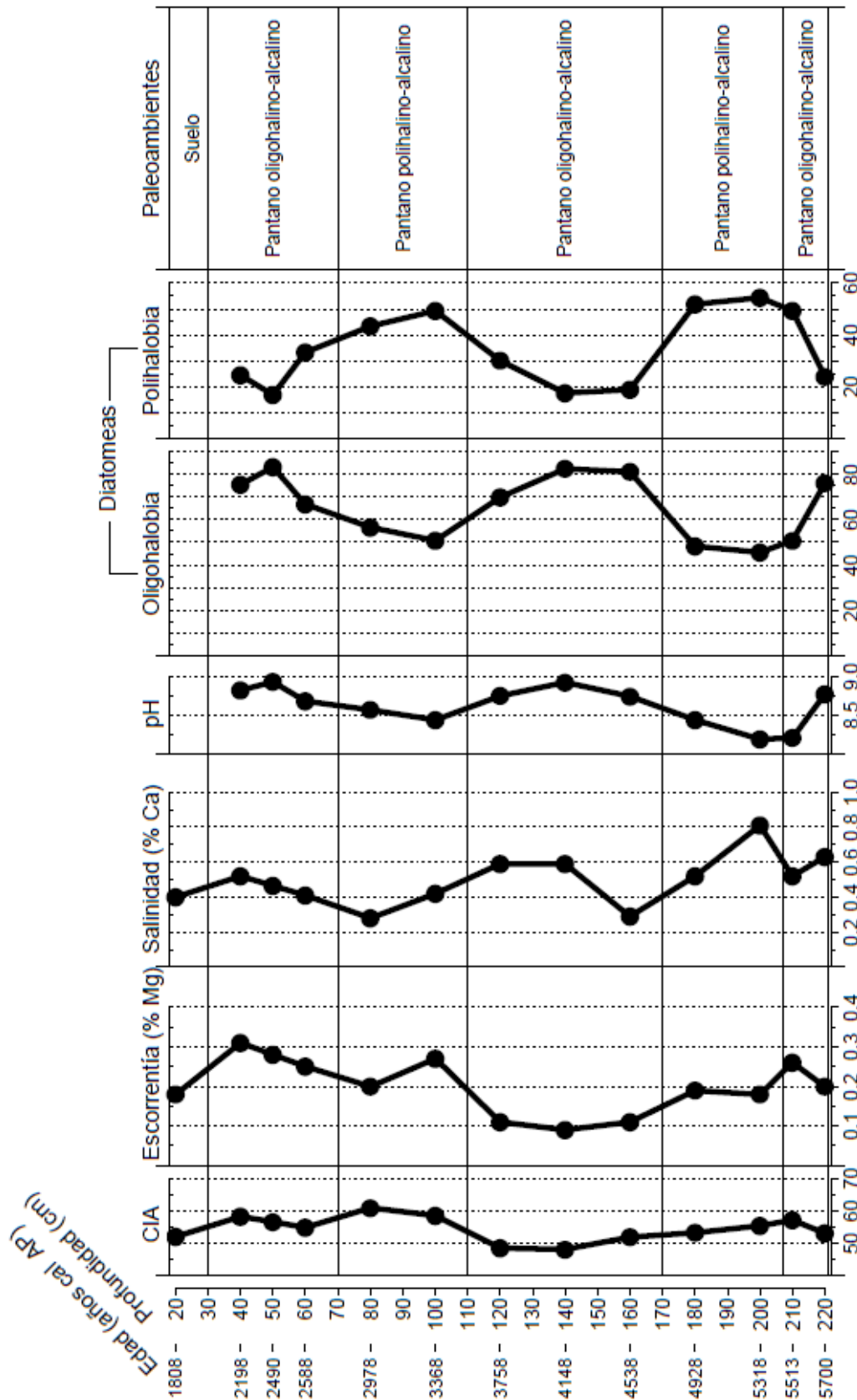


Figura 16. Reconstrucción paleoambiental de la ciénega Tonibabi.

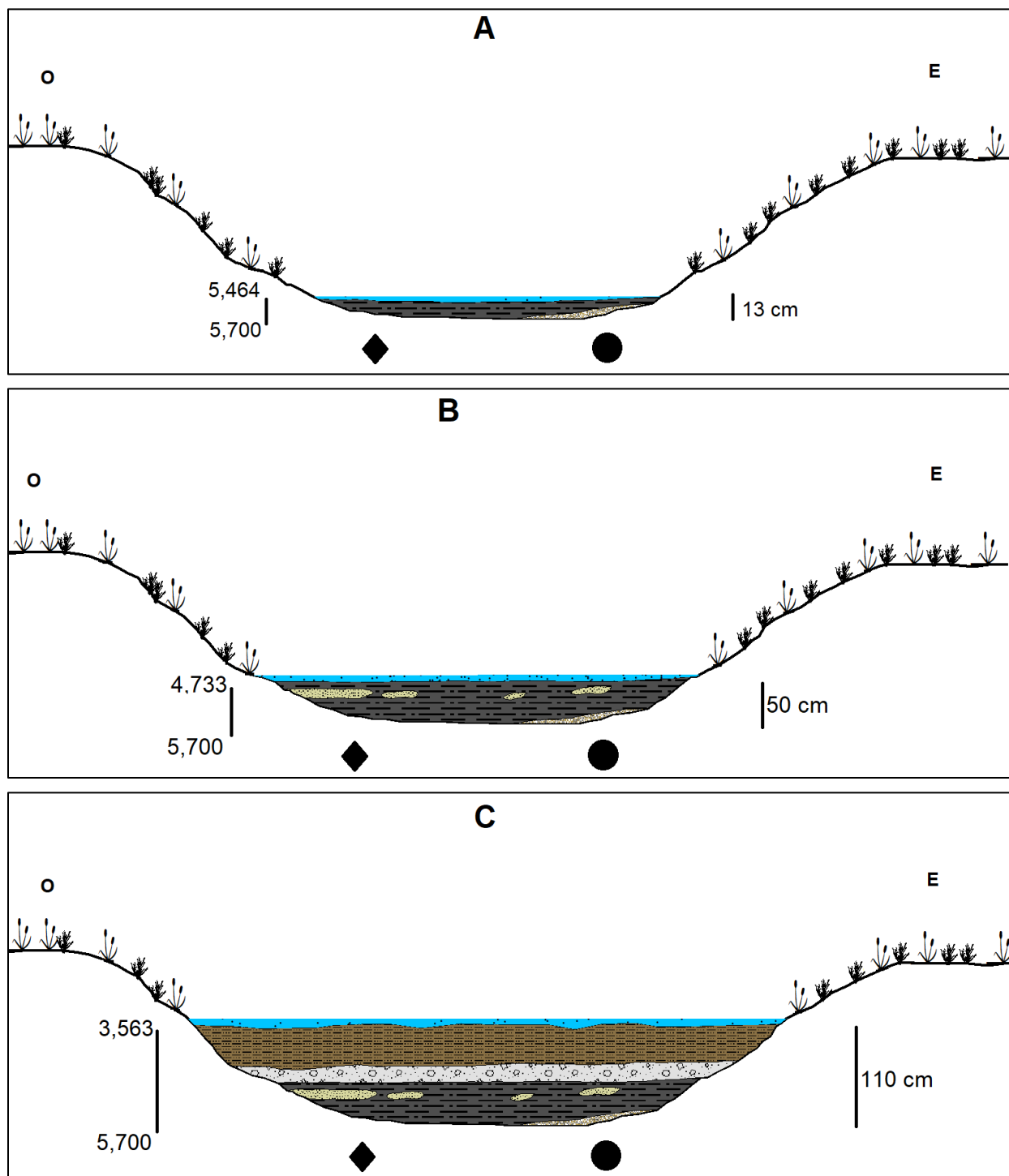


Figura 17. Fases ambientales de la ciénega Tonibabi desde 5,700 hasta 1,808 años cal AP. Escala distinta para los ejes vertical y horizontal. A la izquierda: edad en años cal AP. A la derecha: espesor del sedimento. Rombo: Perfil TBP2. Círculo: Perfil TBP3.

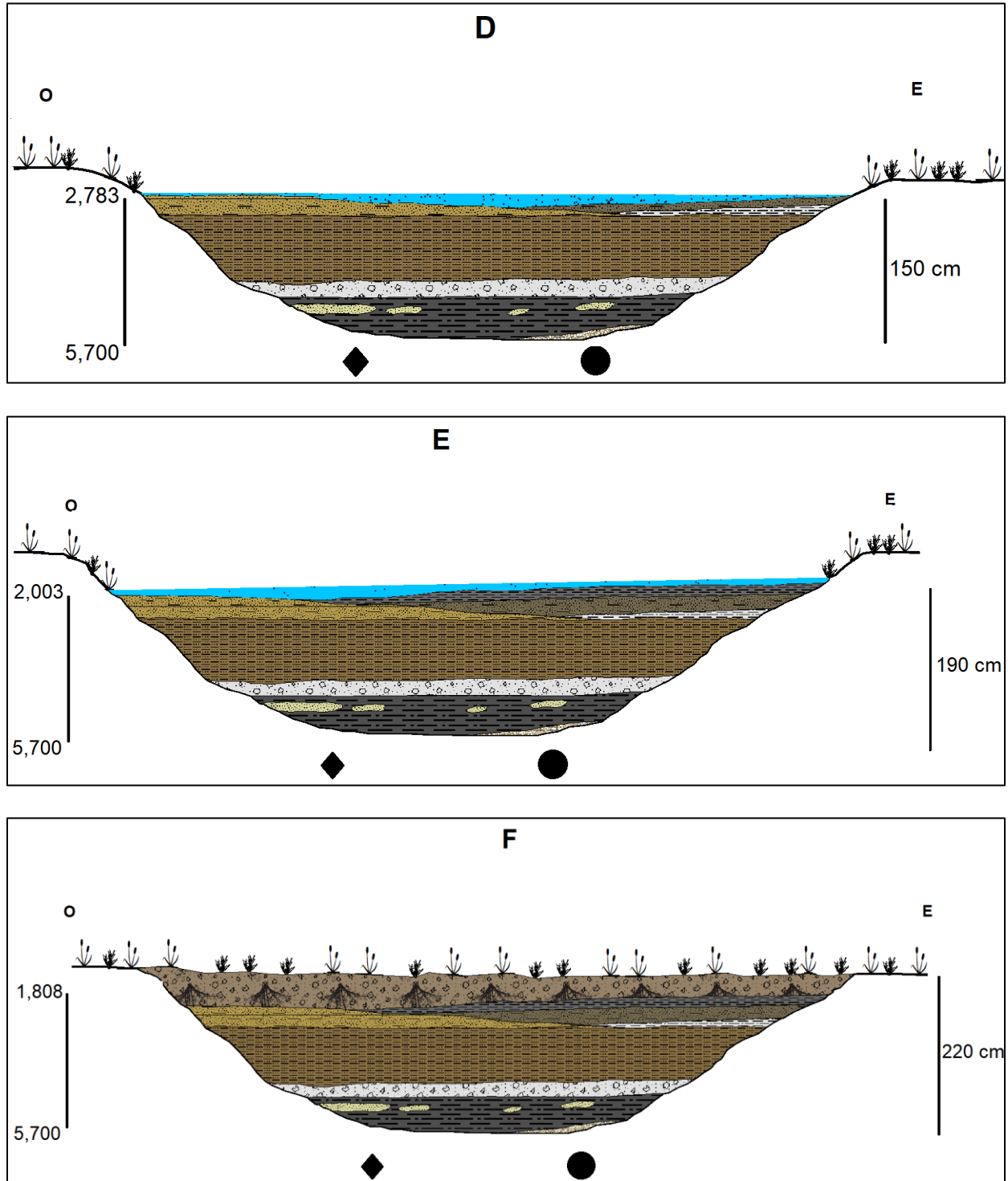


Figura 17 (continuación). Fases ambientales de la ciénega Tonibabi desde 5,700 hasta 1,808 años cal AP. Escala distinta para los ejes vertical y horizontal. A la izquierda: edad en años cal AP. A la derecha: espesor del sedimento. Rombo: Perfil TBP2. Círculo: Perfil TBP3.

## VII. CONCLUSIONES

El presente trabajo está enfocado al estudio de diatomeas fósiles dentro de los sedimentos antiguos cercanos a la ciénega Tonibabi, Sonora, México, con el fin de reconstruir las condiciones ambientales de los últimos 5,700 años. Dentro del registro, se identificaron 24 taxones, donde el 20% se encuentra en el registro actual de la ciénega, siendo de suma importancia por su abundancia relativa *Denticula elegans*, *Rhopalodia gibberula*, *Diploneis elliptica* y *Epithemia adnata*, al igual que *Anomoeoneis sphaerophora*, *Surirella sp.*, *Rhopalodia gibberula* y *Mastogloia elliptica* por ser diatomeas comunes en ambientes de agua salada, y *Ulnaria ulna* siendo la única especie ticoplanctónica del registro.

Los sedimentos antiguos de la ciénega Tonibabi demuestran distintos patrones de sedimentación desde hace 5,700 años hasta 1,808 años con la formación del suelo; dichos patrones viéndose reflejados con la correlación de los perfiles TBP2 y TBP3, en donde se observan cambios en cuanto a los espesores de las capas de sedimento entre uno y el otro perfil, así como diferentes estados de energía durante la sedimentación determinados por los cambios en el tamaño de grano de cada capa.

Con el análisis de los resultados, se determinaron seis fases ambientales para la ciénega Tonibabi desde hace 5,700 años hasta 1,808 años. La primera fase ocurre hace 5,700 años presentándose como un pantano con muy baja salinidad. Hace 5,464 años sucede la segunda fase, la sedimentación pasa de un estado de baja energía a uno de alta energía depositando lentes de arena en algunas zonas de la ciénega y aumentando su salinidad formando así un pantano polihalino. La tercera fase abarcando la transición Norgripiano-Megalayano, comienza hace 4,733 años, caracterizada por ser la fase que más sedimentos depositó, así como un acentuado descenso en el contenido de sales. Hace 3,563 años la salinidad incrementa y ocurren cambios ligeros en la sedimentación intercalándose capas con otras. La quinta fase acontece hace 2,783 años disminuyendo nuevamente la salinidad y observándose una sedimentación más pausada que en fases anteriores, dando indicios de una interrupción en la depositación de éstos. La sexta fase ambiental tiene lugar a partir de hace 2,003 años hasta 1,808 años dando lugar a la formación del suelo que actualmente prevalece en la cima de los perfiles TBP2 y TBP3, denominada fase seca.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almirudis, E., Guevara, M., Santoyo, E., Torres-Alvarado, I. S., y Paz-Moreno, F. 2015. Geothermal energy potential of a promissory area in the Central and Eastern zones of Sonora, Mexico: A preliminary geochemical study. In *Proceedings of the World Geothermal Congress* (p. 9).
- Armstrong, H. A., y Brasier, M. D. 2005. *Microfossils* (2da ed.). Oxford, Inglaterra.
- Bardají, T. 2018. Subdivisión formal del Holoceno. *Cuaternario y Geomorfología*. 32(3-4): 7-8.
- Battarbee R. W., Jones V. J., Flower R. J., Cameron N. G., Bennion H., Carvalho L. y Juggins S. 2001. Diatoms. In: *Tracking environmental change using lake sediments Vol 3: Terrestrial, algal and siliceous indicators*. (eds Smol JP, Birks HJB, Last W) pp 155-202. Dordrecht, Kluwer.
- Battarbee, R. W. 1986. Diatom analysis. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. 527 - 570.
- Battarbee, R. W., y Charles, D. F. 1987. The use of diatom assemblages in lake sediments as a means of assessing the timing, trends, and causes of lake acidification. *Progress in Physical Geography*. 11(4): 552-580.
- Beaver, J. 1981. *Apparent Ecological Characteristics of Some Common Freshwater Diatoms*. Ontario Ministry of the Environment. Rexdale, Ontario, Canada. 517 pp.
- Bianchi, C., y Gersonde, R. 2002. The Southern Ocean surface between Marine Isotope Stages 6 and 5d: Shape and timing of climate changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 187(1-2): 151-177.
- Birks, C. J., y Koc, N. 2002. A high-resolution diatom record of late-Quaternary sea-surface temperatures and oceanographic conditions from the eastern Norwegian Sea. *Boreas*. 31(4): 323-344.
- Blinn, D. W., Hevly, R. H., y Davis, O. K. 1994. Continuous Holocene record of diatom stratigraphy, paleohydrology, and anthropogenic activity in a spring-mound in southwestern United States. *Quaternary Research*. 42(2): 197-205.
- Bradbury, J. P. 1971. Paleolimnology of lake Texcoco, Mexico. Evidence from diatoms. *Limnology and Oceanography*. 16(2): 180-200.
- Brasier, M. D. 1980. *Microfossils* (p. 193). London: G. Allen y Unwin.



- Caballero, M. 2018. Diatomeas: División Bacillariophyta. Instituto de Geofísica, Universidad Autónoma de México. México. Recuperado de:
- Caballero, M., Rodríguez, A., Vilaclara, G., Ortega, B., Roy, P., y Lozano-García, S. 2013. Hydrochemistry, ostracods and diatoms in a deep, tropical, crater lake in Western Mexico. *Journal of Limnology*. 72(3): e42.
- Caballero-Miranda, M. (1997). Reconstrucción paleolimnológica del Lago de Chalco, México, durante el último máximo glacial-El registro de diatomeas entre 34,000 y 15,000 años AP. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 14(1): 91-100.
- Cohen, K. M., Finney, S. C., Gibbard, P. L. y Fan, J.-X. 2018; actualizada. The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes. 36: 199-204.
- Cruz, T. 2011. Paleoambientes del Cuaternario Tardío en Sonora a partir del registro paleopedológico. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Denys, L. 1992. A check-list of the diatoms in the Holocene deposits of the western Belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements. *Service Geological of Belgium Professional Paper*. 246:1-41.
- Díaz-Pardo, C. A., Echazú, D. M. y Maidana, N. I. 2008. Diatomeas continentales como indicadores de cambios climáticos en Patagonia. *Efecto de los cambios globales sobre la biodiversidad*. Pp. 233-246
- Dixit, S. S., Smol, J. P., Kingston, J. C., y Charles, D. F. 1992. Diatoms: powerful indicators of environmental change. *Environmental science & technology*, 26(1), 22-33.
- Encyclopædia Britannica (2008). Paleohydrology. Consultado: 29-01-2019. Recuperado de: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/439504/paleohydrology>
- Escandell, A., Espinosa, M. A. e Isla, F. I. 2009. Diatomeas como indicadores de variaciones de salinidad durante el Holoceno tardío en el río Negro, Patagonia Norte, Argentina. *Ameghiniana*. 46(3): 461-468.
- Espinoza-Encinas, I. R. 2012. Paleoambientes cuaternarios de la ciénega Tonibabi, Moctezuma, Sonora, México. Tesis de maestría. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Galaz-Samaniego, C. A. 2017. Vegetación de la ciénega Tonibabi, municipio de Moctezuma, Sonora, México, en los últimos 1500 años. Tesis de licenciatura. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.

- Hasbargen, J. 1994. A Holocene paleoclimatic and environmental record from Stoneman Lake, Arizona. *Quaternary Research*. 42(2): 188-196.
- Hecky, R. E. y Kilham, P. 1973. Diatoms in alkaline, saline lakes: ecology and geochemical implications 1. *Limnology and Oceanography*. 18(1): 53-71.
- Holmes, R. W., Whiting, M. C. y Stoddard, J. L. 1989. Changes in diatom-inferred pH and acid neutralizing capacity in a dilute, high elevation, Sierra Nevada lake since A. D. 1825. *Freshwater Biology*. 21: 295-310.
- Hustedt, F. 1957. Die diatomeenflora des Flußsystems der wesen im Gebiet der Hansestadt Bremen. *Abhandlungen des naturwissenschaftlichen Vereins zu Bremen*, 34, 181-440.
- INEGI. 2000. Síntesis de Información geográfica del estado de Sonora.
- Jarrett, R. D. 1991. Paleohydrology, Floods and Droughts. *U.S. Geological Survey*. Recuperado de: <https://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/paleohydro/>
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. 1986. Bacillariophyceae. Teil 1–4 in H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, and D. Mollenhauer (editors). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*.
- López-Fuerte, F. O. y Siqueiros-Beltrones, D.A. 2011. Las diatomeas como indicadores de la calidad ecológica de los oasis de Baja California Sur. CONABIO. *Biodiversitas*. 99: 8-11.
- López-Higuera, A. 2005. El final del Pleistoceno tardío en el noroeste de la Sierra Madre Occidental: análisis geológico y palinológico en un perfil de sedimento de la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco. Tesis Maestría en Ciencias – Geología. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora.
- Lowe, J. J., y Walker, M. J. C. 2015. *Reconstructing Quaternary Environments*. Inglaterra.
- Lowe, R. L. 1974. Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatoms (Vol. 1). National Environmental Research Center, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Lozano-García, S., Ortega, B. y Sosa, S. 2002. Mid – to late – Wisconsin Pollen Record of San Felipe Basin, Baja California. *Quaternary Research*. 58: 84-92.
- Mann, D. G., y Droop, S. J. M. 1996. Biodiversity, biogeography and conservation of diatoms. *Biogeography of freshwater algae*. 118: 19-32. Dordrecht, Holanda.
- Martínez-Yrizar, A., Felger, R. S., y Búrquez, A. (2010). Los ecosistemas terrestres de Sonora: un diverso capital natural. *Diversidad biológica del estado de Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México, México DF. 129-156.

- Mathewes, R. W. 1993. Evidence for Younger Dryas-age cooling on the North Pacific coast of America. *Quaternary Science Reviews*. 12(5): 321-331.
- Metcalfe, S. E. 2006. Late Quaternary environments of the northern deserts and central transvolcanic belt of Mexico. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 93(2): 258-273.
- Metzeltin, D. y García-Rodríguez, F. 2012. Las diatomeas uruguayas (2da ed.). Montevideo, Uruguay.
- Mojica-Zárate, H. T. 2015. Alternativas productivas para el desarrollo local en Moctezuma, Sonora, México. *Avanzada científica*. 18(1): 1-14.
- Mojica-Zárate, H. T., y Martínez-Martínez, C. C. 2014. Propuesta innovadora para el aprovechamiento de la fauna silvestre en ranchos ganaderos de Moctezuma, Sonora, México. *Avanzada Científica*. 17(3): 102-112.
- Montagna, P., Palmer, P. y Pollack, J., 2013. Hydrological Changes and Estuarine Dynamics. Springerbriefs in Environmental Science. Volume 8. Texas A&M University-Corpus Christi. Texas, USA.
- Moser, K. A., MacDonald, G. M., y Smol, J. P. 1996. Applications of freshwater diatoms to geographical research. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 20(1): 21-52.
- Nesbitt, H. W., y Young, G. M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 48(7): 1523-1534.
- Nesbitt, H. W., y Young, G. M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*. 97(2): 129-147.
- Ortega-Guerrero, B., Caballero-Miranda, C., Lozano-García, S. y De la O, M. 1999. Paleoenvironmental record of the last 70,000 yr in San Felipe Basin, Sonora Desert, Mexico. *Geofísica Internacional*. 38 (3): 153-163.
- Ortega-Ramírez, J. 1995. Correlación estratigráfica de los depósitos cuaternarios de la Laguna Babícora, Chihuahua, México. *Geofísica Internacional*, 34 (1): 117-129.
- Ortega-Ramírez, J., Valiente, A., Urrutia, J., Mortera, C. y Alvarado, G. 1998. Paleoclimatic changes during the Pleistocene – Holocene in Laguna Babícora, near the Chihuahuan Desert, Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 35: 1168-1179.

- Ortega-Rosas, C. I., Guiot, J., Peñalba, M. C. y Ortiz-Acosta, M. E. 2008a. Biomization and quantitative climate reconstruction techniques in northwestern Mexico – With an application to four Holocene pollen sequences. *Global and Planetary Change*. 61: 242-266.
- Ortega-Rosas, C. I., Peñalba, M. C. y Guiot, J. 2008b. Holocene altitudinal shifts in vegetation belts and environmental changes in the Sierra Madre Occidental, Northwestern Mexico, based on modern and fossil pollen data. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 151: 1-20.
- Ortega-Rosas, C. I., Peñalba, M. C., López-Sáez, J. A., y Van Devender, T. R. 2008c. Retrospectiva del bosque de pino y encino de la Sierra Madre Occidental, Sonora, noroeste de México, hace 1000 años. *Acta botánica mexicana*. 83: 69-92.
- Palacios-Fest, M.R., Carreño, A.L., Ortega – Ramírez, J.R., Alvarado – Valdez, G. 2002. A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babícora, Chihuahua, Mexico based on ostracode paleoecology and trace element shell chemistry. *Journal of Paleolimnology*. 27: 185-206.
- Paz-Moreno, F.A., Demant, A., Cochemé, J., Dostal, J., y Montigny, R. 2003. The Quaternary Moctezuma volcanic field: A tholeiitic to alkali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, Mexico. *Geological Society of America*. 374: 439-455.
- Peñalba, M. C. y Van Devender, T. R. 1998. Cambios de vegetación y clima en Baja California, México, durante los últimos 20,000 años. *Geología del Noroeste*. 2: 21 – 23.
- Pinter, N., Scott, A. C., Daulton, T. L., Podoll, A., Koeberl, C., Anderson, R. S. y Ishman, S. E. 2011. The Younger Dryas impact hypothesis: A requiem. *Earth-Science Reviews*. 106(3-4): 247-264.
- Rasmussen, S.O., Andersen, K. K., Svensson, A. M., Steffensen, J. P., Vinther, B. M., Calusen, H. B., ... Ruth, U. 2006. A new Greenland ice core chronology for the glacial termination. *Journal of Geophysical Research*. 111(D06102). doi:10.1029/2005JD00679
- Reeder, L. A., Erlandson, J. M. y Rick, T. C. 2011. Younger Dryas environments and human adaptations on the West Coast of the United States and Baja California. *Quaternary International*. 242(2): 463-478.
- Retallack, G. J., Krull, E. S., y Bockheim, J. G. 2001. New grounds for reassessing palaeoclimate of the Sirius Group, Antarctica. *Journal of the Geological Society*. 158(6): 925-935.
- Roldán-Quintana, J. 1994. Geología del sur de la Sierra de Oposura, Moctezuma, Estado de Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 11(1): 1-10.

- Round, F.E., Crawford, R.M. y Mann D.G. 1990. The Diatoms Biology and Morphology of the Genera. Cambridge University Press. 747 p.
- Roy, P. D., Jonathan, M. P., Pérez-Cruz, L. L., Sánchez-Córdova, M. M., Quiroz-Jiménez, J. D., y Romero, F. M. 2012. A millennial-scale Late Pleistocene–Holocene palaeoclimatic record from the western Chihuahua Desert, Mexico. *Boreas*. 41(4): 707-718.
- Ruck, E. C., Nakov, T., Alverson, A. J., & Theriot, E. C. 2016. Phylogeny, ecology, morphological evolution, and reclassification of the diatom orders Surirellales and Rhopalodiales. *Molecular phylogenetics and evolution*. 103: 155-171.
- Serieyssol, K., Chatelard, S., y Cubizolle, H. 2010. Diatom fossils in mires: a protocol for extraction, preparation and analysis in palaeoenvironmental studies. *Mires and Peat*. 7(11): 1-11.
- Servicio Geológico Mexicano. 2013. Carta Geológico – Minera Tonibabi H12 – D15, a escala 1:50,000.
- Shackleton, N. J., Berger, A., y Peltier, W. R. 1990. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. 81(4): 251–256.
- Shemesh, A., Hodell, D., Crosta, X., Kanfoush, S., Charles, C., y Guilderson, T. 2002. Sequence of events during the last deglaciation in Southern Ocean sediments and Antarctic ice cores. *Paleoceanography*. 17(4).
- Shepard, W. D., Blinn, D. W., Hoffman, R. J. y Kantz, P. T. 2000. Algae of Devils Hole, Nevada, Death Valley National Park. *Western North American Naturalist*. 60(4): 7.
- Smol, J.P. 1990. Freshwater algae: in Methods in Quaternary Ecology. *Geoscience Canada, Reprint Series*, 5: 3-14.
- Stoermer, E. F., y Smol, J. P. 1999. Applications and uses of diatoms: prologue. The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences. 3-10.
- Tobón-Velázquez. 2015. Reconstrucción paleoclimática del Golfo de Tehuantepec determinado por el registro sedimentario de diatomeas durante el Pleistoceno tardío- Holoceno. Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, D.F, 71 p.
- Urrutia, J., Ortega-Ramírez, J. y Cruz, R. 1997 Rock magnetic study of late Pleistocene – Holocene sediments from the Babícora lacustrine basin, Chihuahua, northern Mexico. *Geofísica Internacional*. 10 (2): 77-86.

- Van Dam, H., Mertens, A. y Sinkeldam, J. 1994. A code checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*. 28(1):117-133.
- Van Devender, T. R. 1994. Holocene arthropods from the Sierra Bacha, Sonora, Mexico, with emphasis on beetles (Coleoptera). *The Coleopterists Bulletin*. 48 (1): 30-50.
- Van Devender, T. R., Burgess, T., Piper, J. y Turner, R. 1994. Paleoclimatic implications of Holocene Plant remains from the Sierra Bacha, Sonora, Mexico. *Quaternary Research*. 41: 99-108.
- Walker, M. J. C., Berkelhammer, M., Björck, S. Cwynar, L. C., Fisher, D. A., Long, A. J., ... Weiss, H. 2012. Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science*. 27(7): 649-659.
- Walker, M., Head, M. J., Berkelhammer, M., Björck, S., Cheng, H., Cwynar, L., ... Weiss, H. 2018. Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Journal of International Geoscience*. 41(4): 213-223.
- Walker, M., Johnsen, S., Rasmussen, S. O., Steffensen, J.-P., Popp, T., Gibbard, P., ... Schwander, J. 2008. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period) in the NGRIP ice core. *Journal of International Geosciences*. 31(2): 264-267.
- Whittington, G., Buckland, P., Edwards, K. J., Greenwood, M., Hall, A. M. y Robinson, M. 2003. Multiproxy Devensian Late-glacial and Holocene environmental records at an Atlantic coastal site in Shetland. *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association*. 18(2): 151-168.
- Wilson, G. S., Barron, J. A., Ashworth, A. C., Askin, R. A., Carter, J. A., Curren, M. G., ... Harper, M. A. 2002. The Mount Feather Diamicton of the Sirius Group: an accumulation of indicators of Neogene Antarctic glacial and climatic history. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 182(1-2): 117-131.
- WoRMS Editorial Board. 2019. World Register of Marine Species. <http://www.marinespecies.org>.

*Registro paleohidrológico y micropaleontológico de la transición Norgripiano-Megalayano en la ciénega Tonibabi, Sonora, México*

---

Zafra-Otero, D. 2017. El Periodo Cuaternario, Glaciaciones y Humanos. Escuela de Geología, Facultad de ingenierías Físico Químicas, Universidad Industrial de Santander. Colombia.

## APÉNDICE I. Listado taxonómico.

Dominio Eukaryota Chatton

Reino Chromista Cavalier-Smith

División Bacillariophyta Engler & Gilg (1924)

Clase Fragilariophyceae Round (1990)

Orden Fragilariales Silva, 1962

Familia Fragilariaceae Greville, 1833

Género *Ulnaria* (Nitzsch.) Compère in Jahn et al., 2001

*Ulnaria ulna* (Nitzsch.) Compère in Jahn et al., 2001

Clase Bacillariophyceae Haeckel, 1878

Orden Eunotiales Silva, 1962

Familia Eunotiaceae Kützing, 1844

Género *Eunotia* Ehrenberg, 1837

*Eunotia minor* (Kützing) Grunow in Van Heurck, 1881

Orden Mastogloiales Mann (1990)

Familia Mastogloiaceae Maresch (1903)

Género *Mastogloia* Thwaites (1856)

*Mastogloia elliptica* Cleve in Schmidt, 1893

Orden Cymbellales Mann en Round et al., 1990

Familia Anomoeoneidaceae Mann en Round et al., 1990

Género *Anomoeoneis* Pfitzer, 1871

*Anomoeoneis sphaerophora* (Ehrenberg) Pfitzer, 1871

Familia Cymbellaceae Grevilla, 1833

Género *Encyonema* Kützing, 1833

*Encyonema caespitosum* Kützing, 1849

Familia Gomphonemataceae Kützing, 1844

Género *Gomphonema* Ehrenberg, 1832

*Gomphonema pumilum* (Grunow) Reichardt & Lange-Bertalot, 1991

Orden Achnanthes Silva, 1962

Familia Achnanthesaceae Kützing, 1844

Género *Planothidium* Round & Bukhtiyarova, 1996

*Planothidium lanceolatum* Round & Bukhtiyarova, 1996

Familia Cocconeidaceae Kützing, 1844

Género *Cocconeis* Ehrenber, 1838

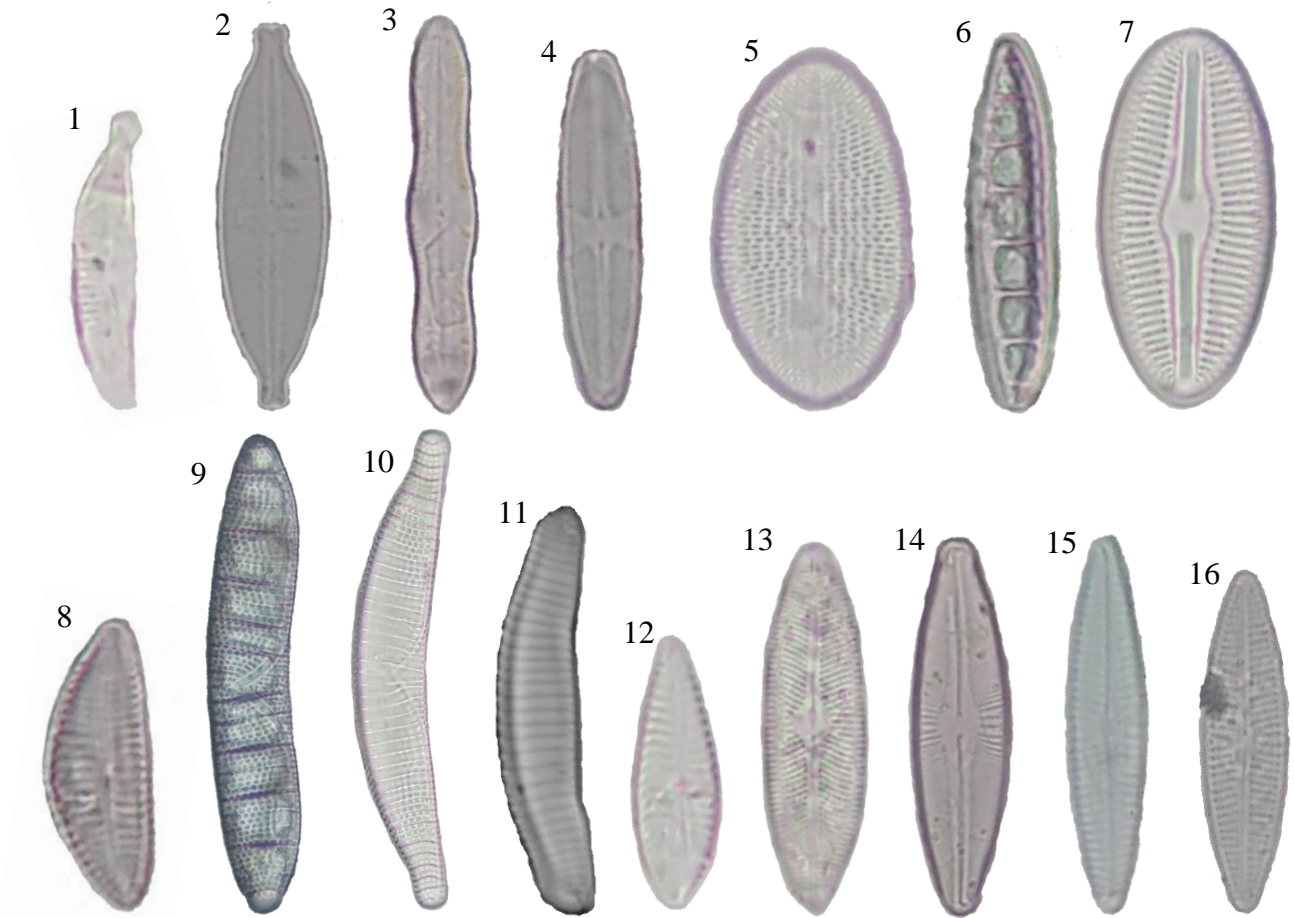
*Cocconeis placentula* Ehrenberg, 1838



- Orden Naviculales Bessey, 1907  
Familia Diploneidaceae Mann en Round et al., 1990  
    Género *Diploneis* Ehrenberg, 1845  
        *Diploneis elliptica* (Kützing) Cleve, 1891  
Familia Naviculaceae Kützing, 1844  
    Género *Caloneis* Cleve, 1894  
        *Caloneis limosa* (Kützing) Patrick en Patrick & Reimer, 1966  
    Género *Navicula* Bory de Saint-Vincent, 1822  
        *Navicula brasiliensis* Grunow, 1863  
        *Navicula radiosa* Kützing, 1844  
        *Navicula splendicula* Van Landingham, 1975  
Familia Pinnulariaceae Mann en Round et al., 1990  
    Género *Pinnularia* Ehrenberg, 1843  
        *Pinnularia viridis* (Nitzsch.) Ehrenberg, 1843  
Orden Thalassiophysales Mann en Round et al., 1990  
Familia Catenulaceae Mereschkowsky, 1902  
    Género *Amphora* Ehrenberg, 1840  
        *Amphora veneta* Kützing, 1844  
Orden Bacillariales Hendey, 1937  
Familia Bacillariaceae Ehrenberg, 1831  
    Género *Denticula* Kützing, 1844  
        *Denticula elegans* Kützing, 1844  
    Género *Nitzschia* Hassall, 1845  
        *Nitzschia amphibia* Grunow, 1862  
        *Nitzschia palea* (Kützing) Smith, 1856  
Orden Rhopalodiales Mann en Round et al., 1990  
Familia Rhopalodiaceae (Karsten) Topachevs'ky & Oksiyuk, 1960  
    Género *Epithemia* Brébisson ex Kützing, 1844  
        *Epithemia adnata* (Kützing) Brébisson, 1838  
        *Epithemia turgida* (Ehrenberg) Kützing, 1844  
    Género *Rhopalodia* Müll, 1895  
        *Rhopalodia gibba* (Ehrenberg) Müll, 1895  
        *Rhopalodia gibberula* (Ehrenberg) Müll, 1895  
Orden Surirellales Mann en Round et al., 1990  
Familia Surirellaceae Kützing, 1844  
    Género *Surirella* Turpin, 1828

**APÉNDICE II. Láminas de diatomeas fósiles de Tonibabi.**

- Figura 1. *Amphora veneta* (longitud: 13  $\mu\text{m}$ )  
Figura 2. *Anomoeoneis sphaerophora* (longitud 38  $\mu\text{m}$ )  
Figura 3. *Caloneis limosa* (longitud: 36  $\mu\text{m}$ )  
Figura 4. *Caloneis* sp. (longitud: 28  $\mu\text{m}$ )  
Figura 5. *Cocconeis placentula* (longitud: 29  $\mu\text{m}$ )  
Figura 6. *Denticula elegans* (longitud: 32  $\mu\text{m}$ )  
Figura 7. *Diploneis elliptica* (longitud: 31  $\mu\text{m}$ )  
Figura 8. *Encyonema caespitosum* (longitud: 24  $\mu\text{m}$ )  
Figura 9. *Epithemia adnata* (longitud: 92  $\mu\text{m}$ )  
Figura 10. *Epithemia túrgida* (longitud: 97  $\mu\text{m}$ )  
Figura 11. *Eunotia minor* (longitud: 41  $\mu\text{m}$ )  
Figura 12. *Gomphonema pumilum* (21  $\mu\text{m}$ )  
Figura 13. *Mastogloia elliptica* (longitud: 37  $\mu\text{m}$ )  
Figura 14. *Navicula brasiliensis* (longitud: 37  $\mu\text{m}$ )  
Figura 15. *Navicula radiosa* (longitud: (36  $\mu\text{m}$ )  
Figura 16. *Navicula splendidula* (longitud: 33  $\mu\text{m}$ )



- Figura 17. *Nitzschia amphibia* (longitud: 23  $\mu\text{m}$ )  
Figura 18. *Nitzschia palea* (longitud 58  $\mu\text{m}$ )  
Figura 19. *Pinnularia viridis* (longitud: 120  $\mu\text{m}$ )  
Figura 20. *Planotidium lanceolatum* (longitud: 13 $\mu\text{m}$ )  
Figura 21. *Rhopalodia gibba* (longitud: 87  $\mu\text{m}$ )  
Figura 22. *Rhopalodia gibberula* (longitud: 53  $\mu\text{m}$ )  
Figura 23. *Surirella* sp. (longitud: 45  $\mu\text{m}$ )  
Figura 24. *Ulnaria ulna* (longitud: 128  $\mu\text{m}$ )

