

Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Estudios Superiores Iztacala

TESIS

ESTUDIO GEOQUÍMICO Y MAGNÉTICO DE LOS SEDIMENTOS HOLOCÉNICOS  
DEL PALEO-LAGO LAS CRUCES, ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Que para obtener el título de

Biólogo

P R E S E N T A

Rivero Navarrete Axel

TUTOR

Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy

Los Reyes Iztacala, Edo. de México, 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de formar parte de su orgullosa comunidad estudiantil.

Dr. Roy, gracias por su apoyo, paciencia, conocimiento y entrega a lo largo de esta travesía tan llena de enseñanzas. Siempre tendrá una enorme gratitud para con usted por permitirme formar parte de su proyecto.

A mis compañeros del *Laboratorio de Paleo-ambientes*: Ing. Marcela Charles Polo, Ing. Magali Chávez Lara y M. En C. David Quiroz Jiménez, que gracias a su ayuda durante éste proceso, el trabajo pudo darse sin mayores complicaciones.

Agradezco a mi comité Tutorial: Dra, Gloria Vilaclara Fatjo, Biol. Arnulfo Reyes Mata, M. en C. Jose Mario Miranda Herrera y a la Biol. Leticia Martínez López, por el tiempo que dedicaron a las revisiones, observaciones y recomendaciones para ésta Tesis de Licenciatura.

Y por último agradecer al proyecto “Registro espacio temporal de la variabilidad climática Holocénica en la zona árida al Norte de México DGAPA-PAPIIT clave IN100413” por el apoyo financiero y beca durante el proyecto de investigación.

## AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Agradecer antes que nada a mi familia, que sin su apoyo, impulso y cariño, durante todas las etapas de mi vida no me hubiera sido posible llegar a estas instancias.

En especial a Doña Evita y Don Sus, mis padres, que con su educación y soporte en todos los aspectos eh sido capaz de llegar a ser un profesionista. A Naomi, mi hermana, que con su particular forma, siempre me ha impulsado a superarme. A mis primos (Uriel, Alan, Chris, Sealtiel, Siikmine, Omar y Edson) y a el Tío Khar, que han sido los moldes que me han permitido llegar a ser la persona que soy.

Sin olvidar a mis amigos, que si alguno de ellos faltara el resultado hubiera sido completamente distinto. La confianza del cañalito Jorch, el impulso de mis comadritas Adelita y Flaquita, las enseñanzas de Rulo, Tronkis, Aisak y Odum alias el Famosísimo Cuarteto de la Muerte, al Sensei Fabs que me mostró que la única persona que vale la pena superar es a uno mismo, y por su puesto a toda esa Pandilla del Recreo. Pero sobre todo mencionar a esa persona que ha sido, es y será un pilar en mi vida, Laura Gualito.

Gracias a todas esas personas que mencione y las que no olvide, pero no cupieron, éste trabajo es de ustedes señores.

“Sólo como guerrero puede uno soportar el camino del conocimiento.  
Un guerrero no puede quejarse o lamentarse por nada. Su vida es un  
interminable desafío, y los desafíos no pueden ser buenos o malos. Los  
desafíos son simplemente desafíos.”

Carlos Castaneda

### Reconocimientos

Trabajo ganador en el Certamen de Trabajos Estudiantiles de la Carrera de Biología, llevado a cabo en el marco del XXXI Coloquio de Investigación.

Trabajo publicado en la revista *The Holocene* 28 (Roy et. al., 2013)

## CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS		I
RESUMEN		IV
ABSTRACT		V
CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2	OBJETIVOS Y METAS	4
	2.1 Objetivo principal	4
	2.2 Objetivos individuales	4
CAPÍTULO 3	ANTECEDENTES	5
	3.1 Holoceno	5
	3.2 Estudios previos y paleo-clima del Holoceno.	6
CAPÍTULO 4	MARCO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO	10
	4.1 Desierto de Chihuahua y paleo-lago Las Cruces	10
	4.2 Geología de la zona	12
	4.3 Clima de la zona	13
CAPÍTULO 5	MATERIAL Y MÉTODO	16
	5.1 Trabajo de campo	16
	5.2 Datación por radiocarbono AMS	17

	5.3 Mineralogía	18
	5.4 Susceptibilidad magnética	19
	5.5 Geoquímica multi-elemental	21
CAPÍTULO 6	RESULTADOS	22
	6.1 Estratigrafía	22
	6.2 Cronología y modelo de edad	24
	6.3 Mineralogía	28
	6.4 Susceptibilidad magnética	30
	6.5 Geoquímica multi-elemental	32
CAPÍTULO 7	DISCUSIÓN	35
	7.1 Reconstrucción paleo-hidrológica	35
	7.2 Posibles mecanismos de forzamiento	39
CAPÍTULO 8	CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA		43

## LISTADO DE FIGURAS

	Descripción	Página
Figura 1	Temperatura media durante los últimos 11 ka cal. aP., modificado de Dansgaard <i>et al.</i> , 1969 y Schönwiese, 1995.	6
Figura 2	Ubicación geográfica del desierto de Chihuahua.	10
Figura 3	Ubicación del paleo-lago Las Cruces, en el municipio de Salinas de Hidalgo, en San Luis Potosí, México. Modificado de Carta Geológico-Minera Salinas de Hidalgo F14-A61, Servicio Geológico Mexicano, 2011.	12
Figura 4	Variación en precipitación anual registrado en Salinas de Hidalgo entre 1976 a 2009.	14
Figura 5	Diagrama ombrotérmico de Gausson realizado para el municipio de Salinas de Hidalgo, en San Luis Potosí, México. Servicio Meteorológico Nacional, 1976-2009.	15
Figura 6	Trinchera cavada en la parte central del paleo-lago Las Cruces, ubicada en el estado de San Luis Potosí.	16



Figura 7	El equipo de Difractómetro de rayos X de marca Philips para identificar y estimar los minerales presentes.	19
Figura 8	Equipo de medición de la susceptibilidad magnética de marca Bartington utilizado para las muestras del paleolago Las Cruces.	20
Figura 9	Equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X portátil.	21
Figura 10	Estructuras lenticulares de yeso con morfología característica de "Rosa del Desierto".	22
Figura 11	Columna estratigráfica de la secuencia sedimentaria del paleo-lago Las Cruces, estado San Luis Potosí, desierto de Chihuahua.	23
Figura 12	Modelo de edad obtenido por medio de las fechas de radiocarbono $^{14}\text{C}$ AMS.	27
Figura 13	Comparación mineralógica a lo largo del perfil con respecto a las unidades estratigráficas.	29
Figura 14	La susceptibilidad magnética de los sedimentos del paleo-lago Las Cruces.	31
Figura 15	Se muestran los datos de geoquímica multielemental, en rectángulos azul se destacan	33

los eventos húmedos, aquellos de color amarillo como secos y por último en color verde el periodo con mayor actividad eólica.

Figura 16 <sup>a</sup>	Modelo de regresión lineal entre las concentraciones Ti (%) y Ca (%).	34
Figura 16 <sup>b</sup>	Modelo de regresión lineal entre la relación Zr/Ti y las concentraciones de Ca (%).	34
Figura 17	Los registros proxies estandarizados para la reconstrucción de condiciones paleo-hidrologías en el paleo-lago Las Cruces. La susceptibilidad magnética está considerada como un indicador de aporte clástico (terrigeno) por procesos pluvial y eólicos, Ti es indicador de descarga pluvial a la cuenca, Ca representa salinidad del cuerpo de agua y Zr/Ti es un proxy para estimar actividad eólica.	38
Figura 18	Comparación del registro de aporte pluvial a la cuenca de Las Cruces con los proxy registros de migración latitudinal en la posición de ITCZ y actividad de El Niño Oscilación del Sur (ENOS).	41

## Resumen

Los sedimentos del paleo-lago Las Cruces fueron estudiados con la finalidad de reconstruir la variabilidad climática y las distintas condiciones hidrológicas en la cuenca durante el Holoceno. La cuenca se localiza al oeste del estado de San Luis Potosí (22° 39' 20.2" Norte, 101° 53' 05.4" Oeste, 2106 m s.n.m.), en la parte sur del desierto de Chihuahua; actualmente ésta recibe ca. 400 mm de precipitación media anual, asociada principalmente a un régimen de lluvias de verano. Se presenta la columna estratigráfica, modelo de edad, características magnéticas (susceptibilidad magnética), geoquímica (concentración multi-elemental) y mineralogía de los sedimentos, con el objetivo de poder inferir las condiciones paleo-hidrológicas de la cuenca. Se colectaron muestras de sedimentos de una trinchera excavada con una profundidad de 250 cm en la parte central del paleo-lago. A partir de 4 fechas de radiocarbono AMS, se estimó una edad de 8,400 años calibrados antes del presente (8.4 ka cal aP.) a una profundidad de 226 cm. Las variaciones en los valores de susceptibilidad magnética, Ti, Ca y Zr/Ti se presentan como indicadores de variación en la precipitación (flujo de agua a la cuenca), salinidad de la columna de agua y actividad eólica en los alrededores de la cuenca. Además de los datos anteriores, se identificaron minerales autigénicos (yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; calcita,  $\text{CaCO}_3$ ) y detríticos (magnetita, kaolinita y feldespatos). Las fluctuaciones características de una resolución a escala milenaria muestran que entre ca. 8.4 y 5 ka cal aP. se dio el periodo de mayor aporte pluvial en la cuenca, intervalo que se correlaciona con el "Óptimo climático del Holoceno". Con excepción del evento húmedo registrado ca. 2.2-2 ka cal aP., la cuenca recibió menor precipitación durante los últimos 5 ka cal aP. Comparaciones de los registros proxies de precipitación, salinidad de la columna de agua y actividad eólica de Las Cruces con paleo-registros de la migración latitudinal de la Zona Inter Tropical de Convergencia (ITCZ, por sus siglas en inglés) y actividad del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), sugieren posibles mecanismos de forzamiento que condujeron los cambios hidrológicos durante el Holoceno en la región sur de desierto de Chihuahua. La cuenca recibió mayor precipitación durante los periodos en los que la ITCZ se encontraba localizada hacia el norte y la frecuencia de ENOS era menor. El incremento significativo en la actividad eólica y la salinidad del cuerpo de agua durante los últimos 2 ka cal aP. se corresponden con el intervalo de mayor frecuencia y fuerza de ENOS.

Palabras Clave: Holoceno, Geoquímica, mecanismos de forzamiento, paleo-hidrología.

## Abstract

The sediments of the paleo-lake "Las Cruces" were studied in order to reconstruct the climatic variability and the different hydrological conditions in the basin during the Holocene. The basin is located at the western part San Luis Potosi state (22° 39' 20.2" North, 101° 53' 05.4" West, 2106 m a.s.l.) in the southern edge of the Chihuahua desert: It currently receives an average annual rainfall of ca. 400 mm mainly associated to a rainy season in summer. A stratigraphic column is presented as well as age models, magnetic characteristics (magnetic susceptibility), geochemistry (multi-elemental concentration) and mineralogy of the sediments with the object of being able to infer the paleo-hydrological conditions of the basin. Samples of the sediments were collected from a 250 cm excavated trench in the center of the paleo-lake. From 4 AMS radiocarbon dates, an age of 8,400 years calibrated before the present (8.4 ky cal bP.) was estimated, at a depth of 226 cm. The variations of the values of magnetic susceptibility, Ti, Ca and Zr/Ti will be presented as rainfall variation indicators (water flow into the basin), salinity of the water column and aeolian activity in the surroundings of the basin. Besides of the data mentioned above, autigenic (gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) calcite ( $\text{CaCO}_3$ )) and detritic (magnetite, kaolinite, and feldspar) minerals were identified. Characteristic fluctuations of a millenary scale resolution show that during ca. 8.4 and 5 ky cal bP. there was a period of mayor rainfall contribution to the basin, interval that correlates with the "Holocene thermal maximum". With exception of the humid event registered ca. 2.2-2 ky cal bP. the basin received less than average precipitation during the last 5 ky cal bP. Comparison of the proxy records of precipitation, lake water salinity and aeolian activity at "Las Cruces" with paleo-registers indicating latitudinal shifts in the average position of the Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ) and activity of El Niño Southern Oscillation (ENSO), suggest possible forcing mechanisms that drove the hydrological changes during the Holocene in the southern region of the Chihuahua desert. The basin received more precipitation during the periods in which the ITCZ was located to the North and the ENSO frequency was lower. The significant increase in the aeolian activity and the salinity of the lake during the last 2 ky cal bP. correspond to the interval of highest frequency and strength of ENOS.

Key Words: Holocene, Geochemistry, Forcing mechanisms, paleo-hydrology, Chihuahuan Desert.

## CAPÍTULO 1

## Introducción

El estudio del clima anterior al periodo de las mediciones instrumentales se conoce como paleo-climatología. Es posible obtener una amplia perspectiva de la variación climática estudiando fenómenos naturales dependientes del clima, que incorporan en su estructura una medida de dicha dependencia. Éstos fenómenos proveen un registro “*proxy*” del clima y el estudio de éstos indicadores indirectos es precisamente el fundamento de la paleo-climatología (Bradley, 1999).

Para estudiar el clima del pasado se debe empezar por entender los diferentes tipos de datos “*proxy*” disponibles, además de saber las dificultades y limitaciones de cada uno. Existen diversos tipos de datos biológicos y geológicos que pueden proveer estimados cualitativos y cuantitativos de los eventos climáticos, como el polen fósil, plancton marino, ostrácodos, diatomeas, sedimentología de los depósitos lacustres y marinos, isótopos estables en espeleotemas y características magnéticas y geoquímicas de los sedimentos. En particular, las características geoquímicas de los sedimentos de las cuencas sedimentarias (e.g., lagos, lagunas y mares, etc.) aportan información sobre variaciones en humedad, actividad eólica, productividad de materia orgánica y su fuente (terrestre o lacustre), además de ser sensibles al balance entre precipitación y evaporación en una región; éstos eventos tienen una relación directa con la circulación atmosférica (Street-Perrott y Harrison, 1985).

Numerosos factores -como la composición química de las rocas que afloran alrededor de una cuenca sedimentaria, la interacción entre sedimento-agua (intemperismo químico), el ordenamiento hidráulico, la adsorción o diagénesis, la salinidad de la columna de agua, entre otros- afectan la mineralogía y geoquímica de los sedimentos depositado en la cuenca. Como la corteza superior está dominada por la presencia de feldspatos y vidrio volcánico (Nesbitt y Young, 1982, 1984), el intemperismo químico y los procesos formadores de suelo causan la degradación de feldspatos en minerales arcillosos secundarios. Durante el proceso, los cationes solubles ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) son lixiviados selectivamente, pero los componentes insolubles hidrolizados ( $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Ti}^{4+}$ ) se mantienen en los sedimentos (Smykatz-Kloss et al., 2004; Roy et al., 2006; Roy y Smykatz-Kloss, 2007). Con el aumento de temperatura y salinidad, los componentes solubles precipitan como evaporitas (sales) formando complejos con bicarbonatos, sulfatos y cloruros. Esta huella química eventualmente queda almacenada en los registros sedimentarios y provee de una herramienta sumamente útil para monitorear la composición original y las subsecuentes condiciones de intemperismo y salinidad (Roy et al., 2008). Al estudiar los depósitos sedimentarios, es posible realizar la reconstrucción de los procesos ambientales y climáticos del tiempo pasado en escalas decadales, centenales y milenarias, causados por procesos oceanográficos, cambio en la actividad solar y expansión/contracción de las capas de hielo.

En la zona árida del norte de México, algunos de los paleo-lagos (lagunas secas) permiten (debido a características como su morfología) la depositación de secuencias sedimentarias útiles para construir registros conceptuales de las

condiciones climáticas y ambientales. En particular, el desierto de Chihuahua es un ambiente ideal para recuperar este tipo de secuencias, porque se encuentra situado en un límite climático entre el subtropical y las latitudes medias, en la zona de divergencia de las celdas de Hadley, en la franja latitudinal alrededor de los 30°N (Winsatanley, 1973). En la actualidad el clima de la región está marcado por inviernos fríos y secos, mientras que los veranos son cálidos y húmedos (Castiglia, 2006). Sin embargo, el conocimiento de los procesos que dieron lugar a los cambios climáticos durante el Holoceno en esta región sigue siendo muy fragmentado.

El presente trabajo tiene como objetivo principal generar los datos geoquímicos y magnéticos de los sedimentos holocénicos del paleo-lago Las Cruces, para realizar una reconstrucción de la variación en las condiciones climáticas durante los últimos 10,000 años ocurridas en la parte sur del desierto de Chihuahua.

## CAPÍTULO 2

## Objetivos y Metas

## 2.1 Objetivo Principal

- Caracterizar los sedimentos holocénicos depositados en el paleo-lago Las Cruces mediante herramientas geoquímicas y magnéticas, para hacer una reconstrucción de los eventos hidrológicos ocurridos durante el Holoceno en la parte sur del desierto de Chihuahua.

## 2.2 Objetivos individuales

- Levantar una columna estratigráfica con base en el color, tipo de sedimentos y presencia/ausencia de evaporitas.
- Generar un modelo de edad para la secuencia sedimentaria a través de las fechas de radiocarbono.
- Identificar y (semi-)cuantificar los minerales (detriticos y evaporíticos) presentes en los sedimentos.
- Medir la susceptibilidad magnética de los depósitos lacustres así como las concentraciones de los elementos mayores y trazas en los sedimentos.
- Construir un modelo de variabilidad hidrológica durante el Holoceno utilizando los datos geoquímicos y magnéticos.



## CAPÍTULO 3

## Antecedentes

## 3.1 Holoceno

El Holoceno es el último periodo geológico, que abarca los últimos 11,784 años calendáricos (11.7 ka cal. aP.) (International Commission on Stratigraphy, 2013) y su comienzo está marcado por el fin del último periodo stadial del Pleistoceno (Younger Dryas) (Zecchin et al., 2008). A pesar de que el Holoceno es un periodo interglaciar, con un clima relativamente más estable (es decir, los cambios de temperatura no fueron tan drásticos como los que caracterizaron el periodo que lo precedió), se observaron variaciones suficientes para marcar una influencia en los ecosistemas (Dansgaard et al., 1969, Shönwiese, et al., 1995). Estudios paleoambientales anteriores para las zonas tropicales septentrionales, señalan que durante el Pleistoceno tardío y principios del Holoceno hubo una desviación de la corriente polar, lo que generó más tormentas y enfrió la temperatura. Se sabe que la distancia tierra-sol disminuyó en la parte Boreal y se incrementó la inclinación axial antes del 9 ka (figura 1), lo cual provocó una estacionalidad climática más marcada en el Hemisferio Norte, disminuyéndola en el Hemisferio Sur (COHMAP, 1988). El Holoceno medio (6 a 4 ka) se caracterizó por un notable incremento de las temperaturas durante los veranos a través de todo el Hemisferio Norte (Antevs, 1955) y se reportó para el 3 ka condiciones más húmedas, seguidas de condiciones algo más secas entre 3 y 2 ka (Bradbury, 2000). Las causas de estas variaciones climáticas durante el Holoceno todavía están claramente explicadas. La importancia

del presente estudio se justifica precisamente por las controversias que todavía hay relacionadas con las variaciones climáticas que ocurrieron durante el Holoceno; específicamente, podría ayudar a entender dichas variaciones y la relación entre los intervalos húmedos y secos con la circulación atmosférica regional (Metcalf et al., 2002).

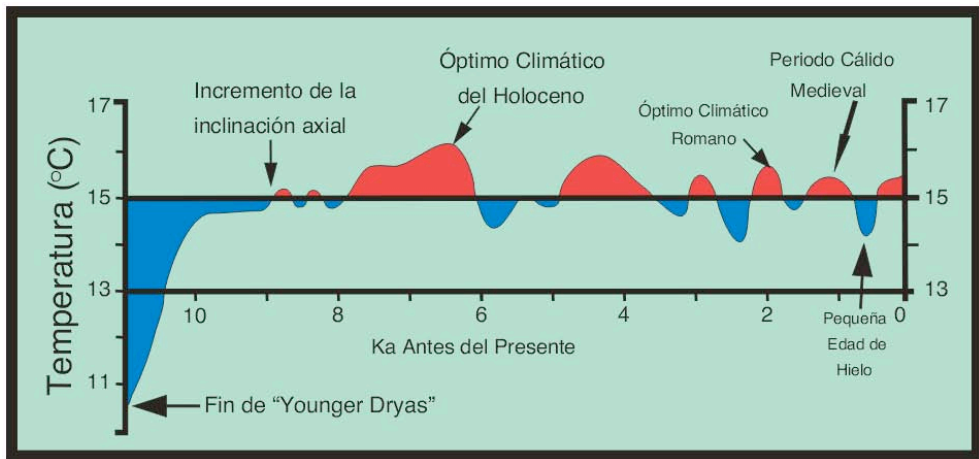


Figura 1. Temperatura media durante los últimos 11 ka cal. aP (modificado de Dansgaard et al., 1969 y Shönwiese, 1995).

### 3.2 Estudios previos y paleo-clima del Holoceno.

Las causas de la variabilidad climática durante el Holoceno no son conocidas con certeza; sin embargo han sido sugeridos tres mecanismos de retroalimentación: actividad volcánica, circulación oceánica y variabilidad solar (Bianchi y McCave, 1999; Bond et al., 2001; Crowley, 2000). Los cambios en la radiación solar derivan de los cambios en la orientación del eje terrestre y esto ha pronunciado los efectos

del Monzón tropical en los climas de las latitudes medias, así como la configuración de los casquetes polares durante los últimos 18 ka. Diversos autores señalan que en el intervalo entre 12 y 6 ka, conocido como el óptimo climático del Holoceno, un cambio en la órbita indujo un incremento en la radiación solar recibida durante el verano, lo que incrementó el contraste térmico entre la tierra y el océano (COHMAP, 1988). Las lluvias asociadas al monzón de verano aumentaron, lo que provocó un incremento en el nivel de los lagos, aun en regiones que hoy son áridas (Dansgaard *et al.*, 1969, y Shönwiese, 1995).

Diversos estudios paleo-climáticos previos para la zona árida del norte de México han descrito la variación de condiciones ambientales durante el Cuaternario tardío con base en el estudio de indicadores biológicos (e.g. polen, diatomeas y ostrácodos) y características geoquímicas de los depósitos lacustres (Metcalf *et al.*, 1997, 2002; Ortega-Guerreo *et al.*, 1999; Palacios-Fest *et al.*, 2002; Roy *et al.*, 2010, 2012; Chávez-Lara *et al.*, 2012). Ortega-Guerrero *et al.* (1999) documentaron cambios paleo-ambientales en el paleo-lago San Felipe (estado de Baja California) usando análisis sedimentológico, diatomeas y propiedades magnéticas; interpretaron en el 12 ka cal aP. un aumento en el escurrimiento de aguas superficiales; entre 7 y 6 ka cal aP. registró un periodo de aridez, a partir del cual se recuperaron las condiciones húmedas, y no fue si no hasta el 4 ka cal aP. que se establecieron las condiciones áridas actuales. Por su parte, Roy *et al.*, (2010, 2012) utilizaron un perfil sedimentario de la misma cuenca e hicieron una reconstrucción con base en la estratigrafía, mineralogía y geoquímica multi-elemental, con la finalidad de inferir los ambientes sedimentarios y condiciones paleo-hidrológicas de los últimos 50 ka cal aP; la mayor tasa de sedimentación y erosión fue utilizada

como un indicador del aumento de la descarga pluvial durante 3-14 ka aP, lo cual se correspondía con un régimen dominante de lluvias de verano asociado al Mozón Norteamericano (NAM, por sus siglas en inglés), en comparación con el Pleistoceno tardío. Castiglia y Fawcett (2006) realizaron una reconstrucción de la variabilidad climática en los lagos El Fresnal y Santa María, ubicados en la parte norte del desierto de Chihuahua; en base a las variaciones en el nivel del lago, infirieron que la máxima extensión lacustre tuvo lugar durante el Holoceno temprano; sin embargo, durante el Holoceno medio ocurrieron periodos puntuales lo suficientemente húmedos como para impulsar el crecimiento de los lagos; los autores atribuyen episodios un incremento en la precipitación, bajas temperaturas y una baja tasa de evaporación, condicionados por la migración al sur de los sistemas de tormentas invernales que, a su vez, se relacionan al fenómeno de El Niño durante el Holoceno.

Considerando los trabajos más cercanos a la zona del presente estudio, en el paleo-lago Babícora, ubicado en la parte norte del desierto de Chihuahua, Ortega-Ramírez *et al.* (1998) reportaron condiciones pantanosas con poca actividad eólica durante el Holoceno-medio (entre 8.9 ka y 4 ka aP.) y reestablecimiento de condiciones más húmedas entre 4 ka y 2.8 ka aP. De acuerdo con Metcalfe *et al.* (2002) y Chavez-Lara *et al.* (2012) el Holoceno fue un periodo en general seco con un lago de alta salinidad, de baja tasa de sedimentación y, tomando en cuenta el mal estado de preservación en polen, diatomeas y ostrácodos, es muy posible que en las secuencias holocénicas de Babícora existan hiatos en la depositación durante el Holoceno-medio, lo cual implica ahí mismo huecos importantes en el conocimiento de los paleo-ambientes de la secuencia.

Ya directamente en el paleo-lago Las Cruces, Pérez-Crespo *et al.* (2012) realizaron una reconstrucción de hábitat. Utilizando como herramienta los datos isotópicos en la dentadura de la fauna Pleistocénica encontrada en dicho lago; la variación en los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  durante el Máximo Glaciar se atribuyen a diferencias en la cantidad de precipitación, pero también a patrones de migración (MacFadden, 2005). El hábitat para la zona debió haber sido una zona abierta, un pastizal con pocos árboles (Perez-Crespo *et al.*, 2012). Estos datos fueron corroborados por Metcalfe (2006) y Caballero *et al.* (2010), cuyos registros palinológicos indicaron la presencia de bosques templados con pastizales, los cuales se desarrollaron en la parte central del país durante el Pleistoceno tardío.

## CAPÍTULO 4

## Marco geológico y geográfico

## 4.1 Desierto de Chihuahua y paleo-lago Las Cruces



Figura 2. Ubicación geográfica del desierto de Chihuahua (Modificado de Roy et al., 2012)

El desierto Chihuahuense es el más grande de Norteamérica (Figura 2), extendiéndose sobre los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí en el norte de México, e incluye áreas de los estados de Arizona, Nuevo México y Texas en los Estados Unidos (Digital Desert Library, 1999). El desierto de Chihuahua se encuentra en la región conocida como el altiplano septentrional, el cual se encuentra localizado entre los dos macizos montañosos más grandes de México: al este de la Sierra Madre Oriental y al oeste de la Sierra Madre Occidental. La humedad, que viene tanto del Golfo de México como del Pacífico, es bloqueada por ambas montañas, fenómeno que dio origen a este desierto (SEMARNAP, 1996). El paleo-lago Las Cruces se encuentra en la parte sur del desierto de Chihuahua (22° 39´ 20.2" Norte, 101° 53´ 05.4" Oeste, 2106 m s.n.m.) y está ubicado en una cuenca sedimentaria efímera y endorreica localizada dentro del municipio Salinas de Hidalgo, al oeste del estado de San Luis Potosí.

4.2 Geología de la zona

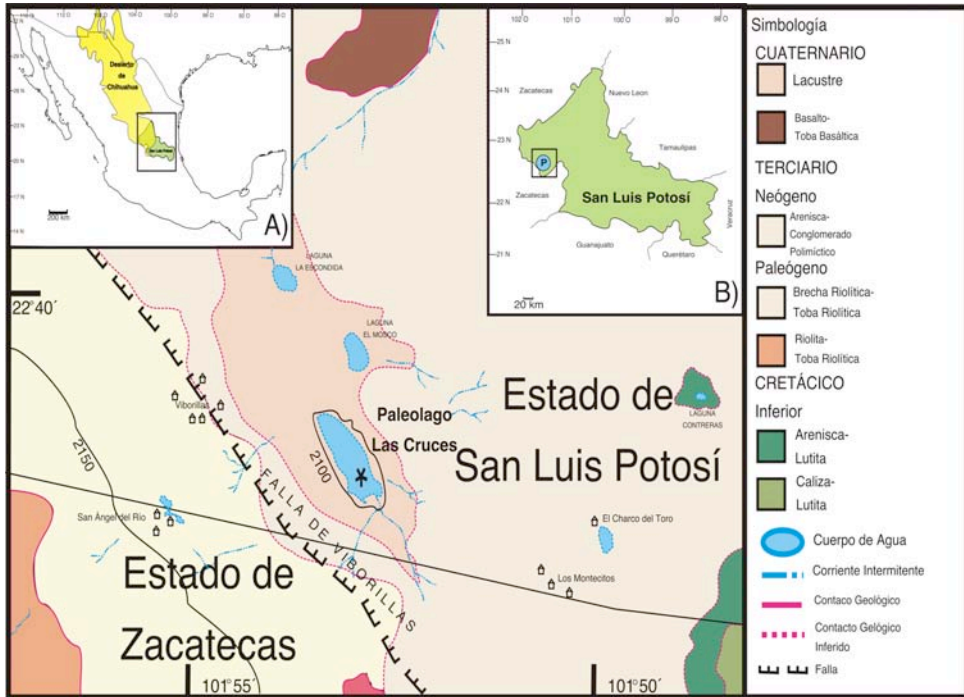


Figura 3. Ubicación del paleolago Las Cruces, en el municipio de Salinas de Hidalgo, en San Luis Potosí, México (Modificado del Servicio Geológico Mexicano, 2011; International Commission on Strathigraphy, 2013).

El paleo-lago Las Cruces está localizado en un sitio con presencia de falla extensional (Figura 3), lo cual indica que la cuenca pudiera tener un origen tectónico. La falla viborillas tiene una orientación noroeste-sureste. El paleo-lago está rodeado principalmente por areniscas del Neógeno, delimitada al norte por toba-basáltica del periodo Cuaternario, al suroeste por toba-riolítica del Paleógeno y



al sureste por lutitas del Cretácico (fuente: Carta Geológico-Minera Salinas de Hidalgo F14-A61, Servicio Geológico Mexicano, <http://www.sgm.gob.mx/> e International Commission on Strathigraphy, 2013).

#### 4.3 Clima actual de la zona

El clima predominante de la región, según la clasificación climática de Köppen (1943) modificada por García (1978), corresponde a seco semi-frío con lluvias en verano y precipitación invernal (BS1(k')w). Los datos meteorológicos de los años 1976 a 2009 de Salinas de Hidalgo (fuente: Servicio Meteorológico Nacional de México, <http://smn.cna.gob.mx>) indican que la región del paleo-lago recibe casi 400 mm de precipitación media anual y muestra una variación entre 131 mm (1991) y 1278 mm (1990) (Figura 4). Aproximadamente un 76% de la precipitación la percibe durante los meses de verano (mayo a septiembre), por lo que la fuente dominante de humedad esta relacionada con el NAM. Durante los meses de verano, el NAM acarrea humedad desde el Golfo de California en el mes de mayo y desde el Golfo de México durante los meses de junio a septiembre (Douglas *et al.*, 1993; Xu *et al.*, 2004).

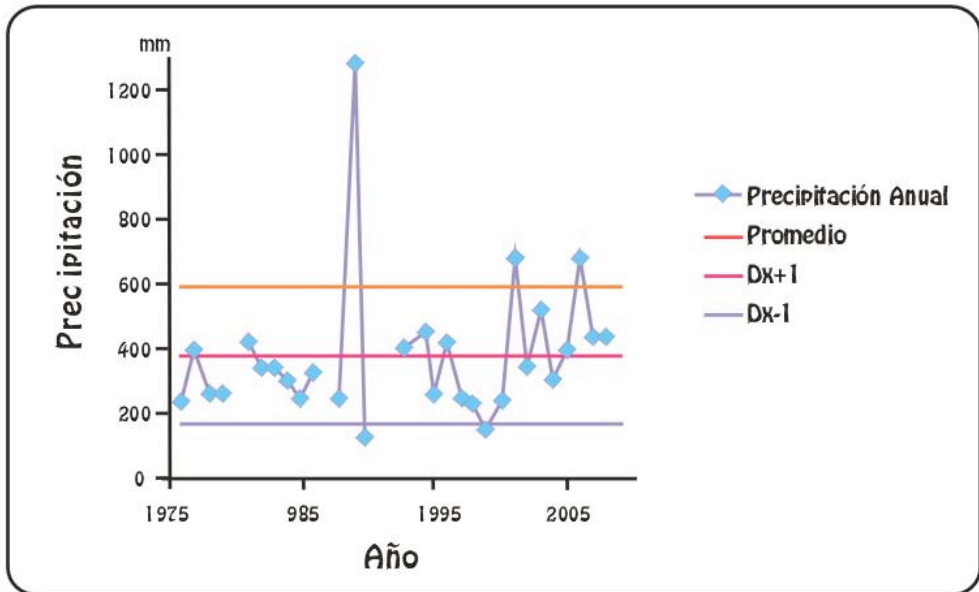


Figura 4. Variación en precipitación anual registrado en Salinas de Hidalgo entre 1976 a 2009 (Dx+1 y Dx-1 señalan  $\pm$  una desviación estándar).

La otra fuente de humedad durante los meses de verano son los ciclones tropicales que se desarrollan en el Pacífico. Durante los meses de invierno (noviembre a Marzo), la zona recibe poco más del 12% de la precipitación media anual, asociada principalmente con el desplazamiento al sur de la corriente en chorro subtropical (Carvazos y Riva, 2004) (Figura 2). La temperatura promedio varía entre 11-21°C. En los meses de verano, la temperatura aumenta hasta 21°C (junio) y durante los meses de invierno la zona tiene una temperatura de 11°C (enero). La temperatura anual promedio del sitio es de 17°C; según el diagrama ombrotérmico de Gausson (Figura 5), las condiciones secas se mantienen durante todo el año, con excepción del mes de agosto.

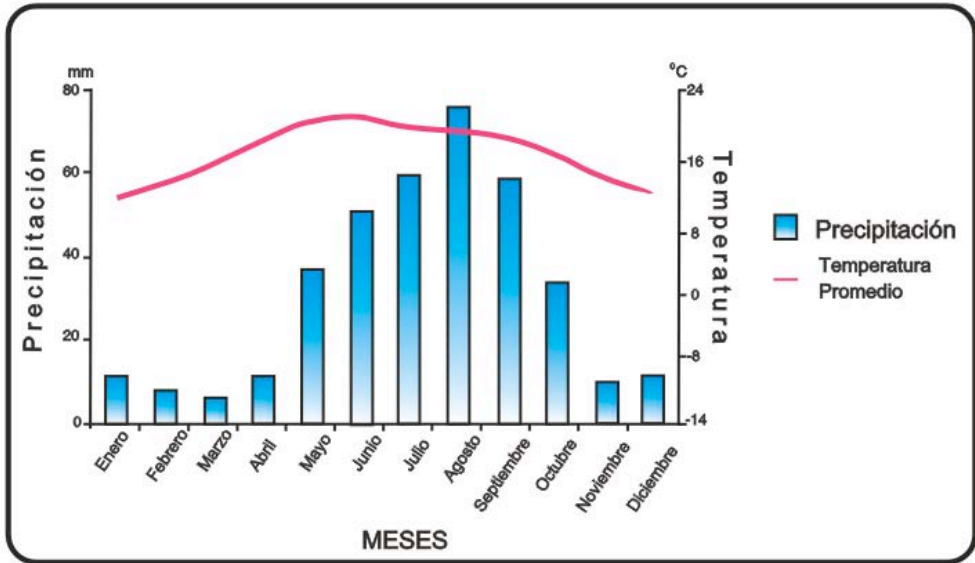


Figura 5. Diagrama ombrotérmico de Gausson realizado para el municipio de Salinas de Hidalgo, en San Luis Potosí, México (Servicio Meteorológico Nacional, 1976-2009).

## CAPÍTULO 5

### Materiales y Métodos

#### 5.1 Trabajo de Campo

En el mes de mayo del 2011, se colectaron las muestras de sedimentos después de hacer una trinchera con longitud de 250 cm en la parte central del paleo-lago Las Cruces (Figura 6). Se colectaron un total de 113 muestras en el perfil (con un intervalo de 2 cm), que corresponden a una profundidad de 226 cm. Debido a la presencia de agua en la parte inferior de la trinchera, no fue posible recuperar muestras entre las profundidades de 226 cm a 250 cm.



Figura 6. Trinchera cavada en la parte central del paleo-lago Las Cruces, ubicada en el estado de San Luis Potosí.

Cada muestra fue separada y rotulada en bolsas de plástico individuales, con el fin de evitar la contaminación. Las muestras fueron almacenadas en un refrigerador a 4 °C en el laboratorio de Paleoambientes del Instituto de Geología de la UNAM, para su posterior datación por radio carbono AMS (“Accelerator Mass Spectrometry”), análisis de susceptibilidad magnética, mineralogía y geoquímica multi-elemental. Para los análisis de elementos mayores, elementos traza, mineralogía y susceptibilidad magnética, las muestras fueron secadas a 50° C y molidas usando un mortero manual de ágata hasta su completa homogeneización.

## 5.2 Datación por radiocarbono AMS

Se realizó un control cronológico de la secuencia sedimentaria a través de 4 fechas de radiocarbono AMS en la materia orgánica de las muestras totales obtenidas en el laboratorio comercial “BETA ANALYTIC Inc.”, en Miami, E.U.A. Para su datación las muestras fueron elegidas –por ser representativas de cada unidad estratigráfica– en las profundidades de 17, 49, 81 y 221 cm. Las fechas fueron calibradas a fechas calendario mediante el programa CALIB 6.0 (Reimer *et al.*, 2009).

El radiocarbono AMS es un procedimiento de datación radiométrica que se basa en el conocimiento del tiempo necesario para desintegrar la mitad de los núcleos del radioisótopo padre carbono-14 en el isótopo hijo estable, nitrógeno-14; al determinarse esta proporción, puede calcularse la edad de la muestra. Dado que la vida media del carbono-14 es sólo de 5,730 años, este método se utiliza para datar acontecimientos en la historia geológica reciente (<50 mil años) (Bard, 1988).

Puesto que este isótopo se produce continuamente en la atmósfera superior, por efecto del bombardeo de partículas de alta energía ó rayos cósmicos, como consecuencia los núcleos de los átomos gaseosos se ven afectados, liberando neutrones. Algunos de los neutrones son absorbidos por átomos de nitrógeno haciendo que emitan un protón, disminuyendo así su número atómico y creando el carbono-14. Dado que el isótopo del carbono se incorpora con facilidad a la materia viva y en el entendido de que este proceso no ha sido constante en la escala temporal, es necesaria la calibración de las fechas obtenidas mediante el método de radiocarbono AMS (Bard *et al.*, 1990).

### 5.3 Mineralogía

Se determinó la identificación de los minerales presentes en los sedimentos mediante un difractómetro de rayos X de marca Phillips 1130/96 (Figura 7) del Laboratorio de Difracción de Rayos X, en el Instituto de Geología, UNAM. Se eligió una muestra representativa de cada unidad estratigráfica para el análisis mineralógico; para la unidad I se eligió la muestra LC 10-12, que corresponde a la profundidad de 11cm; para la unidad II se escogió la muestra LC 30-32 (31 cm), y para la unidad III y IV se tomaron las muestras LC 70-72 (71 cm) y LC 170-172 (171 cm), respectivamente. Los minerales fueron identificados por sus picos característicos y semi-cuantificados usando la integral de los picos de mayor intensidad (Roy *et al.*, 2010).

La difracción de rayos X (DRX) es un método de análisis no destructivo, que requiere sólo pequeñas cantidades de muestra. Se basa principalmente en el conocimiento de la ley de Bragg, que establece cómo cada estructura cristalina

interactúa con longitudes de onda y ángulos específicos, para así poder analizar el patrón de onda resultante e identificar los sólidos cristalinos (Klug y Alexander, 1974).



Figura 7. El equipo de Difractómetro de rayos X de marca Philips para identificar y estimar los minerales presentes

#### 5.4 Susceptibilidad magnética

Se analizó la susceptibilidad magnética de las muestras mediante un sensor contador de susceptibilidad magnética de marca Bartington (Figura 8) del Laboratorio de Paleo-ambientes en el Instituto de Geología, UNAM. La susceptibilidad magnética se trata de un coeficiente adimensional (parámetro geológico) que representa la capacidad de un cuerpo para ser magnetizado. Todas las sustancias son magnéticas a escala atómica. Existen dos movimientos de electrones (spin o giro propio, y camino orbital entorno al núcleo), que intervienen para generar el campo electromagnético. De ésta forma, dependiendo la configuración y su señal electromagnética se clasifican distintos tipos de materiales (Vannete et al., 2007):

- Diamagnéticos: Susceptibilidad magnética muy pequeña y negativa. Los electrones están apareados, por lo que sólo se produce campo magnético externo (e. g., yeso, halita, cuarzo).
- Paramagnéticos: Susceptibilidad magnética débil y positiva. No todos los electrones están apareados, por lo que se produce un mayor campo magnético (e. g., anfíboles, piroxenos, biotita).
- Ferromagnéticos: Susceptibilidad magnética muy fuerte y positiva, ya que todos los campos magnéticos generados se acoplan en la misma dirección y se suman (e. g., hierro, cobalto, níquel).
- Ferrimagnéticos: Susceptibilidad magnética fuerte y positiva, pero no tanto como los anteriores, ya que no se acoplan todos los campos magnéticos generados en la misma dirección (e. g., magnetita, pirrotina)
- Antiferromagnéticos: Baja susceptibilidad, casi 0, aunque de signo positivo (e. g., hematita).



Figura 8. Equipo de medición de la susceptibilidad magnética de marca Bartington utilizado para las muestras del paleolago Las Cruces.



### 5.5 Geoquímica multi-elemental

Se analizaron las concentraciones de Ti, Ca y Zr mediante un equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X (FRX) de la marca Thermo Scientific Niton (Figura 9) del Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, en el Instituto de Geología, UNAM. La fluorescencia de rayos X es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de las capas interiores del átomo. Los electrones de las capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra (McCrary y Edmonds, 1973).



Figura 9. Equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X portátil

## CAPÍTULO 6

## Resultados.

## 6.1 Estratigrafía

Los sedimentos a lo largo del perfil, que cuenta con una profundidad de 226cm, están divididos en 4 diferentes unidades estratigráficas con base en el tipo de sedimentos, color y presencia o ausencia de minerales (e.g., lentes de yeso) (Figura 10).



Figura 10. Estructuras lenticulares de yeso con morfología característica de “Rosa del Desierto”.

La unidad IV (80-226 cm) es masiva y consiste en sedimentos de tamaño limo de color rojo (Figura 11). Esta unidad esta caracterizada por la presencia de lentes de yeso con un diámetro de 5 a 10 cm. Los lentes de yeso tiene la morfología de rosas de desierto (Figura 10).

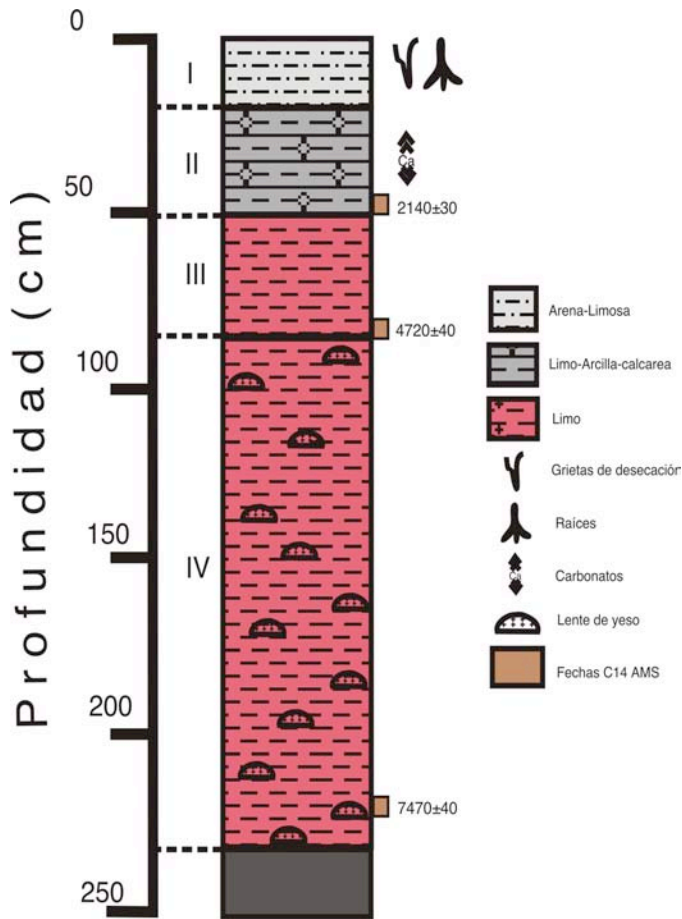


Figura 11. Columna estratigráfica de la secuencia sedimentaria del paleo-lago Las Cruces, estado San Luis Potosí, desierto de Chihuahua.

La unidad III (50-80 cm) esta compuesta de limo masivo, presenta una coloración parda rojiza. A simple vista se distingue la presencia de pequeños (milimétricos) cristales de yeso lenticulares.

La unidad II (18-50 cm) consta de limo-arcilla-calcárea masiva, con una coloración gris oscura. Los nódulos de carbonatos son de distintos tamaños y se observa una disposición dispersa. Los carbonatos tienen un diámetro de pocos mm a 1-2 cm de largo.

La unidad superior I (0-18 cm) tiene una textura arena-limosa masiva de color gris claro. Se observa en ella grietas de desecación verticales y remanentes de raíces.

## 6.2 Cronología y Modelo de edad

La Tabla 1 presenta las fechas obtenidas mediante radio carbono AMS de las 4 muestras de la columna, así como las respectivas fechas calibradas; para la posterior construcción del modelo de edad. La primer muestra a profundidad de 17cm (LC 16-18) muestra una edad de  $1780 \pm 30$  años aP. La edad calibrada mediante el programa Calib 6.0 es  $1705 \pm 60$  años cal aP. La muestra de la profundidad de 49 cm (LC 48-50) muestra una edad radiocarbono AMS de  $2140 \pm 30$  años aP. (antes del Presente). La edad calibrada es  $2153 \pm 149$  cal años aP. La muestra de la profundidad de 81cm (LC 80-82) tiene una edad de  $4720 \pm 40$  años a.P y  $5453 \pm 130$  cal años aP. La última muestra tomada para el control cronológico fue la profundidad de 221cm (LC 220-222). Tiene la edad de radiocarbono de  $7470 \pm 40$  años aP. y calibrada de  $8284 \pm 88$  cal años aP.

Para generar el modelo de edad de la secuencia sedimentaria, se graficó profundidad (cm) vs. edades (calibradas) (Figura 12). El modelo tiene una incertidumbre de 88 a 130 años. Las tasas de sedimentación fueron calculadas entre dos fechas consecutivas de radiocarbono. Para calcular la tasa de la parte superior de la secuencia (unidad I y II), se consideró a los sedimentos superficiales (profundidad 0 cm) como representativos del presente. En la secuencia la tasa de sedimentación varía entre 0.009 y 0.073 cm/año. Para la base de la secuencia sedimentaria (226cm), se asignó una edad de 8400 cal años AP se extrapoló la tasa de sedimentación calculada entre las profundidades de 81 y 221 cm de 0.0495 cm/año. Debido a que la cuenca permanece seca durante periodos prolongados durante el año, procesos eólicos causan la erosión de los sedimentos superficiales, por lo que la muestra al techo de la columna no representa el presente. A pesar de las limitaciones del modelo de edad, consideramos que los sedimentos de la unidad estratigráfica I representan los últimos 1.7 ka cal. aP.

Los sedimentos de la unidad II fueron depositados entre 2200 y 1700 años cal aP. Los sedimentos de la unidad III proporcionan el registro de información paleohidrológica e paleoclimática durante 5300 - 2200 cal años aP y por último en los sedimentos de la unidad IV fueron depositados entre 8400 y 5300 cal años a.P.

Tabla 1. Fechas de radio-carbono AMS en sedimento total del paleo-lago Las Cruces, estado de San Luis Potosí

Muestra	Profundidad (cm)	Código del Laboratorio	Edad AMS <sup>14</sup> C	Edad Calibrada (AP)
LC 16-18	17	Beta-321660	1780±30	1714±60
LC 48-50	49	Beta-307213	2140±30	2153±149
LC 80-82	81	Beta-301167	4720±40	5453±130
LC 220-222	221	Beta-301168	7470±40	8284±88

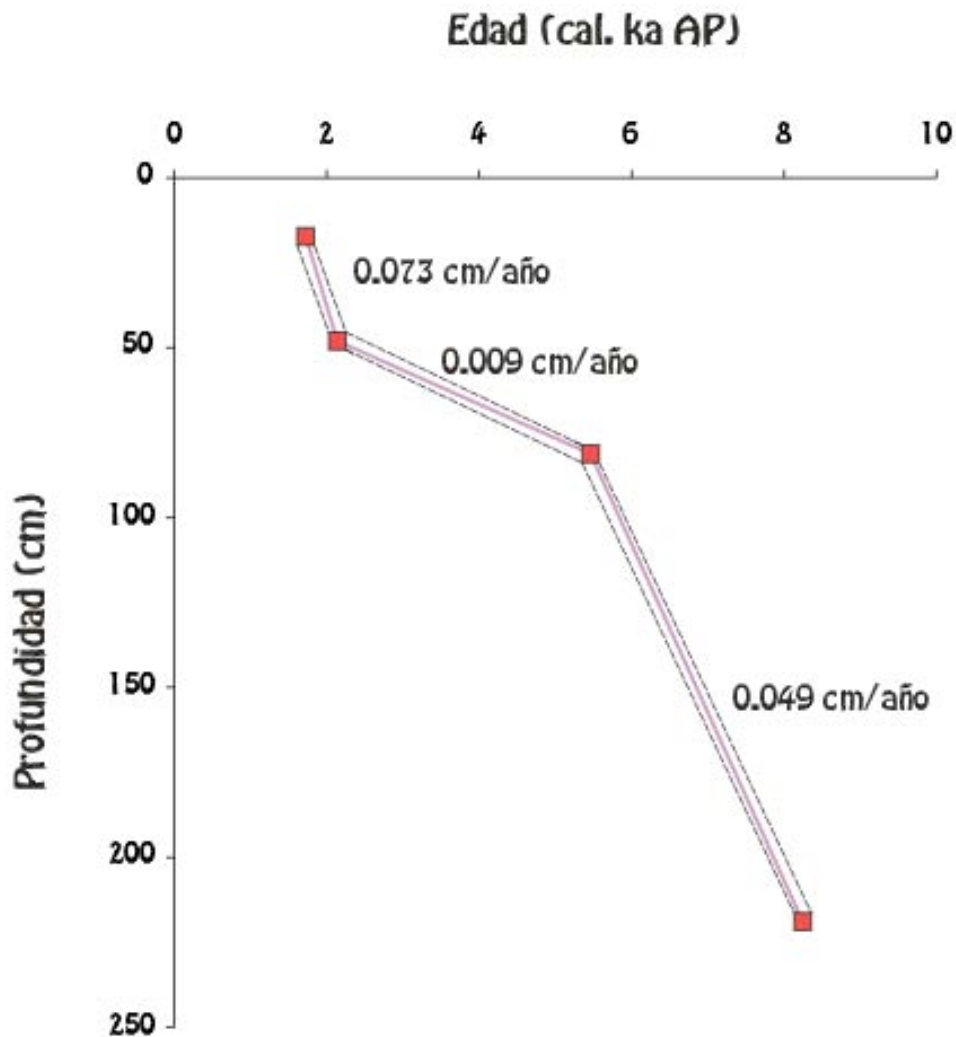


Figura 12. Modelo de edad obtenido por medio de las fechas de radiocarbono <sup>14</sup>C AMS

### 6.3 Mineralogía

Los sedimentos están compuestos tanto de minerales autigénicos como detríticos (Figura 13). El conjunto de minerales detríticos están representados por cuarzo, caolinita, feldspatos y óxidos de hierro (magnetita). El cuarzo es el mineral más abundante a lo largo del perfil y aparece en las cuatro muestras con una abundancia entre 30 y 40%. La caolinita es el segundo mineral detrítico más abundante y también está presente en todas las muestras aunque en concentraciones menores (entre 10 y 20%). Por su parte, la magnetita y los feldspatos se encuentran en muy bajas concentraciones y no están presentes en todas las muestras. La magnetita es evidente sólo en las 3 unidades superiores y esta ausente en la unidad IV.

Los minerales autigénicos quedan representados por carbonato de calcio (calcita) y sulfatos de calcio (yeso). Los minerales no-detríticos se encuentran distribuidos a lo largo del perfil en concentraciones variables. La calcita esta presente en cantidades importantes (20-30%) en los sedimentos de las tres primeras unidades estratigráficas, y en la unidad IV su concentración es menor a 10%. Por su parte, el yeso se distribuye mayoritariamente en la última unidad (IV) con una abundancia casi de 30%, mientras que en los sedimentos de primeras unidades (I a III) su presencia varía de entre 10 y 20%.



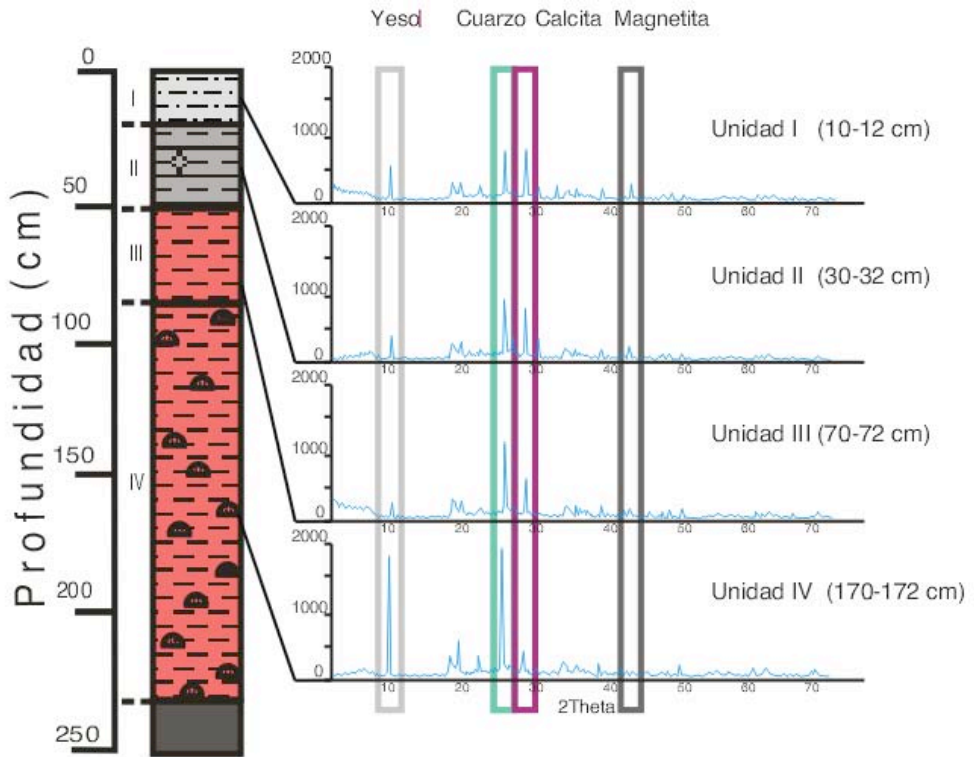


Figura 13. Comparación mineralógica a lo largo del perfil con respecto a las unidades estratigráficas.

#### 6.4 Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética de los sedimentos del paleo-lago Las Cruces varia entre 10.1 y 26.3  $10^{-5}$  SI (Figura 14). Las primeras unidades del perfil estratigráfico (unidades I y II), muestran los valores de susceptibilidad magnética (16.7 - 26.3  $10^{-5}$ ) más altos, la unidad III es la que muestra un valor significativamente menor a la de las tres unidades restantes (10.1 – 16.5  $10^{-5}$ ). En la unidad basal podemos observar que existe un decremento en la susceptibilidad hacia el techo. Los datos obtenidos a lo largo de toda la columna, podemos considerarlos como valores bajos, señalando características de minerales con propiedades paramagnéticas (anfíboles, piroxenos, biotita) y/o diamagnéticas (yeso, halita, cuarzo). En los sedimentos con un incremento en los valores de susceptibilidad magnética puede deberse a la presencia de minerales ferromagnéticas (hematita, magnetita y titanomagnetita).

La unidad I presenta valores que varían entre 17 y  $22 \times 10^{-5}$  SI con un promedio de  $20.3 \times 10^{-5}$  SI teniendo los picos mas altos a los 5 cm ( $21.89 \times 10^{-5}$  SI) y a los 11cm ( $21.58 \times 10^{-5}$  SI) de profundidad. Los valores varían entre 19.37 y  $26.27 \times 10^{-5}$  SI en la unidad II con un promedio de  $22.99 \times 10^{-5}$  SI, encontrando los valores más altos a 33 cm ( $26.27 \times 10^{-5}$  SI). Los valores en la unidad III fluctúan entre 10.11 y  $16.45 \times 10^{-5}$  SI con un promedio de  $12.85 \times 10^{-5}$  SI y el mayor valor se encuentra localizado en la profundidad de 51cm ( $16.45 \times 10^{-5}$  SI). Por último, los sedimentos de la unidad IV tienen susceptibilidad magnética de  $12.12 \times 10^{-5}$  SI a  $19.81 \times 10^{-5}$  SI con un promedio calculado de  $15.47 \times 10^{-5}$  SI, y el valor máximo se ubica en los sedimentos de la profundidad de 219cm ( $19.81 \times 10^{-5}$  SI).

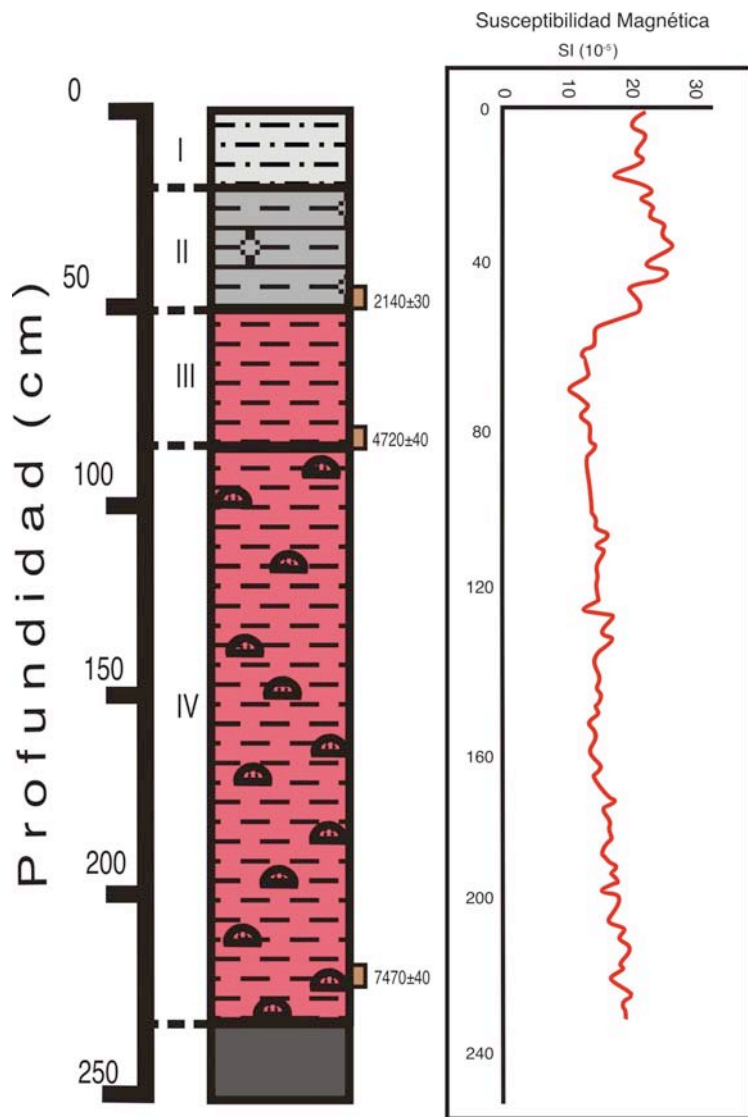


Figura 14. La susceptibilidad magnética de los sedimentos del paleo-lago Las Cruces.

### 6.5 Geoquímica multi-elemental

La Figura 15 presenta la variación en las concentraciones de Titanio (Ti), Calcio (Ca) y Circonio (Zr) en los sedimentos. La concentración de Ti varía entre 0.18 y 0.30 %, Ca varía entre 1.32 y 5.99 % y Zr entre 65 y 108 ppm.

En la unidad I, las concentraciones de Ti varían entre 0.18 y 0.23 %, el Ca de 4.28 a 5.99 % y Zr entre 69 y 92 ppm. En la unidad II, las concentraciones de Ti varían de 0.21 a 0.3 %, Ca entre 1.54 y 4.56 % y el Zr entre 65.05 y 105.97 ppm. Los sedimentos de la unidad III presentan valores de Ti en un rango de 0.22 y 0.27 %, concentraciones de Ca entre 2.26 y 3.85 % y Zr entre 70 y 107 ppm. Por último, los sedimentos de la unidad IV presentan concentraciones de Ti entre 0.23 y 0.3 %, Ca entre 1.32 y 3.65 % y el Zr entre 65.54 y 107.65 ppm. Además, se muestra la relación de Zr/Ti para identificar los sedimentos con mayor concentración de Zr en comparación con del Ti. La Figura 16a presenta la relación entre las concentraciones de Ti y Ca, el alto coeficiente de correlación negativa ( $r = -0.82$ ) muestran que Ti y Ca están asociados con diferentes minerales: Ti está presente en los minerales detríticos máficos y Ca está presente en los autigénicos (calcita y yeso). La relación positiva ( $r=0.8$ ) entre Ca y Zr/Ti (Figura 16b) indican que hubo depositación de minerales que contiene Zr durante los intervalos de mayor precipitación de autigénicos.

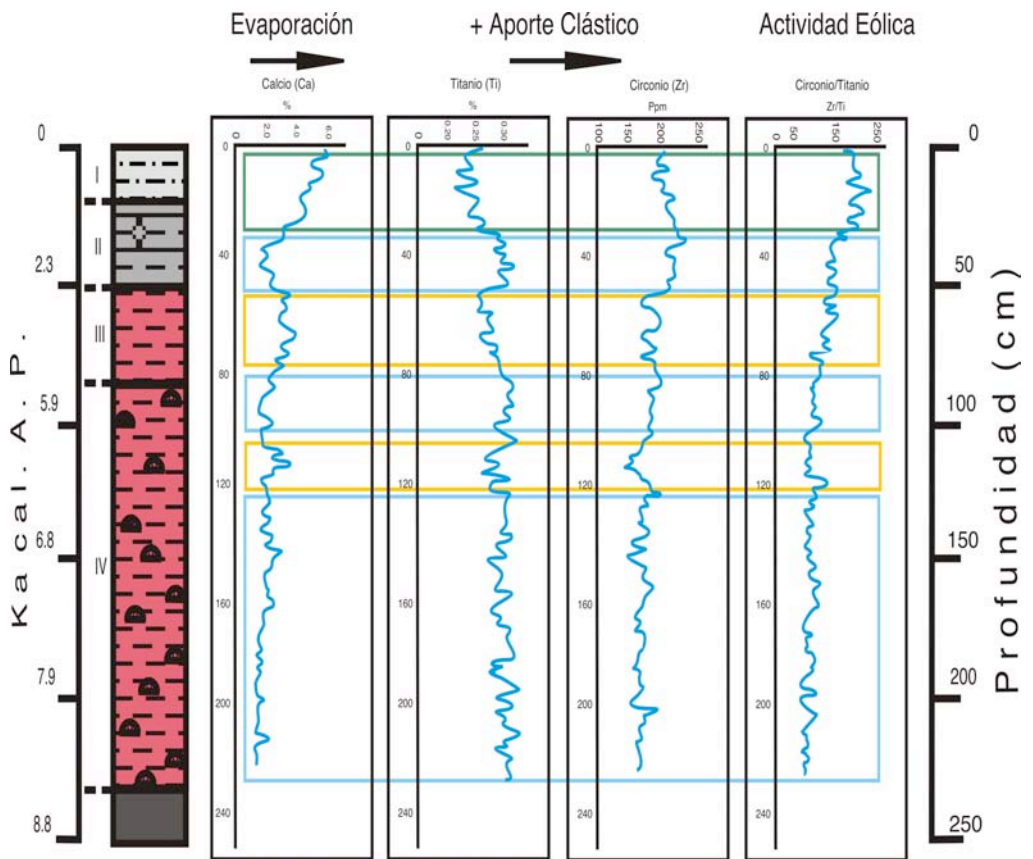


Figura 15. Se muestran los datos de geoquímica multielemental, en rectángulos azul se destacan los eventos húmedos, aquellos de color amarillo como secos y por último en color verde el periodo con mayor actividad eólica.

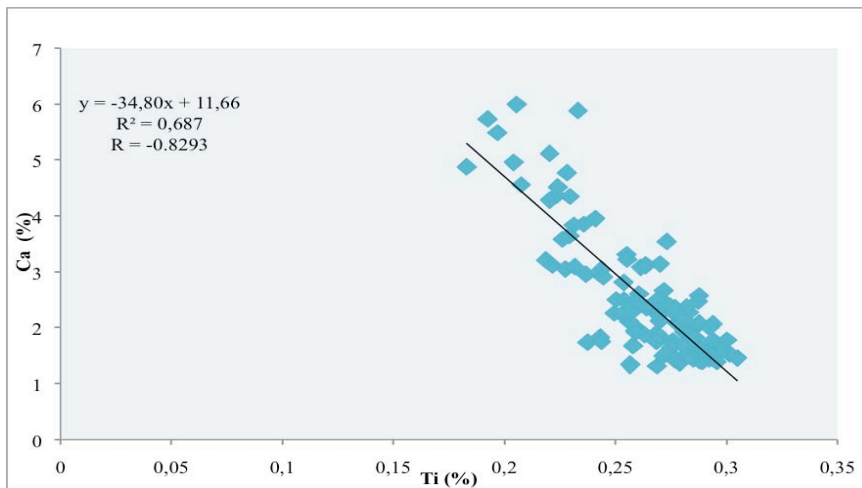


Figura 16<sup>a</sup>. Modelo de regresión lineal entre las concentraciones Ti (%) y Ca (%).

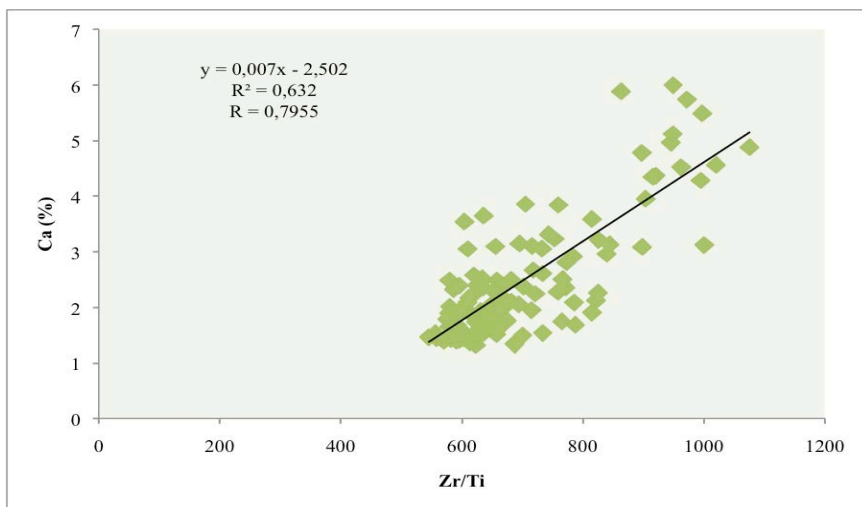


Figura 16<sup>b</sup>. Modelo de regresión lineal entre la relación Zr/Ti y las concentraciones de Ca (%).

## CAPÍTULO 7

## Discusión

## 7.1 Reconstrucción paleo-hidrológica

El perfil sedimentario de longitud 226 cm en el paleo-lago Las Cruces representa las condiciones de depositación de los últimos 8.4 ka cal aP. Algunas características geológicas de las secuencias sedimentarias son sensibles a las condiciones climáticas (e.g., descarga pluvial y sedimentación, precipitación de sales etc.) y esto permite que sean fuentes importantes de información paleo-climática. Es posible observar en la secuencia la variación en las condiciones hidrológicas de la cuenca ubicada en el margen sur del desierto de Chihuahua. Los registros proxy de aporte pluvial, salinidad del agua y la actividad eólica en los alrededores de paleolago, están reconstruidos con base en los datos geoquímicos y mineralógicos.

En décadas recientes, los estudios de reconstrucción climática continental se basan en sedimentos lacustres. Smykatz-Kloss et al. (2004) describieron como el intemperismo químico y los factores formadores de suelo afectan la mineralogía y geoquímica de los sedimentos depositados en la cuenca. La abundancia de minerales ricos en Ti (máficas) se estima por la concentración de éste elemento en los sedimentos de Las Cruces, esto es considerado como un proxy para medir el flujo de materiales detríticos a la cuenca por vía de descarga pluvial y así estimar la precipitación regional. De tal manera se asocian los intervalos con valores altos de Ti con periodos más húmedos y viceversa (Haug et al., 2001; Metcalfe et al., 2010;

Roy *et al.*, 2012). De manera similar, se relacionan mayores concentraciones de Ca con intervalos de mayor salinidad en el lago debido que los altos valores de Ca representa intervalos de mayor precipitación de evaporitas. Los valores altos de Zr/Ti (minerales abundantes en Zr) fueron depositados durante periodos áridos y por lo tanto esta usado como un proxy de alta actividad eólica.

La susceptibilidad magnética se consideró como un proxy para identificar intervalos con alto aporte clástico a la cuenca, tanto por procesos pluviales como eólicos. Métodos magnéticos en las rocas han sido usados de manera exitosa para evaluar una variedad de cambios ambientales en secuencias sedimentarias de lagos (Snowball y Tompson, 1992; Thouveny *et al.*, 1994); combinando análisis en la concentración dependiente de parámetros magnéticos junto con parámetros de mineralogía, esto puede proveernos de proxies del cambio climático, como efectos del clima por alteración atmosférica y procesos de sedimentación (Bloemendal y DcMenocal, 1989; Snowball, 1993).

Los registros proxy fueron estandarizados (Kirby *et al.*, 2010) mediante la función  $Z = [(x - \mu) / \sigma]$  donde al valor ( $x$ ) se le resta el promedio ( $\mu$ ) y se divide por la desviación estándar ( $\sigma$ ) de la variable. (Davis, 1987; Swanson *et al.*, 2001). Con la finalidad de diferenciar los intervalos con condiciones hidrológicas diferentes a las del promedio por los últimos 8.4 ka cal aP. Es decir, a los sedimentos con valores proxy positivos (e.g. Ca) representaran condiciones hidrológicas (salinidad) mayores del promedio y viceversa (Figura 17).

De manera general, se observa que la concentración de Ti es superior al promedio



en los sedimentos entre las profundidades de 226cm y 75cm, lo que representa un intervalo con mayor aporte pluvial entre 8.5 ka cal aP. y 5 ka cal aP. (Figura 17). Dicho intervalo húmedo es contemporáneo al periodo conocido como el “Óptimo climático de Holoceno” (Haug *et al.*, 2001). Durante ca. 7.5, 7 y 6 ka cal aP, los valores positivos de Ca (mayor al promedio) indicaría el aumento en la salinidad del cuerpo de agua. La baja precipitación y aumento de la salinidad durante estos episodios llevarían a la precipitación de yeso (sulfato de calcio). Las condiciones hidrológicas durante éste periodo se ven reflejadas con la presencia de éstas estructuras lenticulares de yeso, también conocidas como “Rosas del Desierto”, éste tipo de depósitos se ha observado que en los ambientes submareales interiores están fuertemente influenciados por las condiciones climáticas y circulación atmosférica. Ya que durante el curso de la cristalización el viento transporta partículas de arena media a muy fina lo que proporciona a las rosas del desierto su aspecto tan particular (Twenhofel, 1950).

Excepto por el evento ca.2.2-2 ka cal aP, los sedimentos depositados en las profundidades entre 75 y 0 cm que cuentan con valores de Ti inferiores al promedio. Se infiere un intervalo con menor precipitación a la promedio durante los últimos 5 ka cal aP. en el margen sur del Desierto de Chihuahua. También, se observa un incremento en el transporte de minerales ricos en Zr (Zircón) a la cuenca debido a un incremento en los procesos eólicos después de 5 ka cal aP. El incremento abrupto en las concentraciones de Ti en las profundidades entre 50 y 33 cm representa un intervalo húmedo durante ca.2.2-2 ka cal aP. Donde se incrementó el transporte de minerales magnéticos (magnetita) durante éste intervalo húmedo. Los valores más altos de Zr/Ti representan el periodo de actividad eólica dominante

que se estableció a partir del 2 ka cal aP (Figura 17). Éste intervalo corresponde al periodo de menor aporte pluvial (i.g. valores bajos de Ti) y aumento de la precipitación de sales (i.g. valores de más altos de Ca). Resultados que se relacionan a los datos obtenidos por Metcalfe et al., 2002, para el paleo-lago de Babicora; donde observo una pobre preservación de polen, elevadas concentraciones de Ca y altos porcentajes de calcita, consistentes con altos rangos de evaporación, lo que sugeriría una conexión a nivel regional.

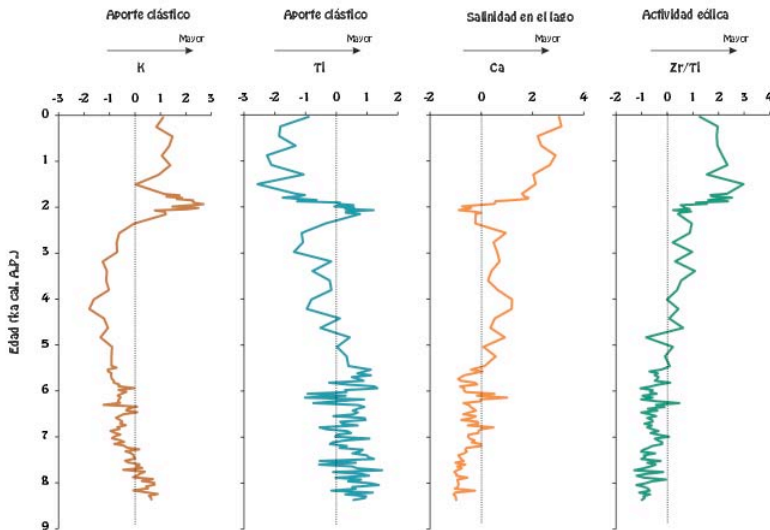


Figura 17. Los registros proxies estandarizados para la reconstrucción de condiciones paleo-hidrológicas en el paleo-lago Las Cruces. La susceptibilidad magnética está considerada como un indicador de aporte clástico (terrigeno) por procesos pluvial y eólicos, Ti es indicador de descarga pluvial a la cuenca, Ca representa salinidad del cuerpo de agua y Zr/Ti es un proxy para estimar actividad eólica.

## 7.2 Posibles mecanismos de forzamiento

El intervalo húmedo registrado durante 8.4-5 ka cal. aP. es ampliamente similar a los resultados obtenidos por Montero-Serrano (2010) donde se encontró un reacomodo en las dinámicas atmosféricas, relacionado con la drástica reducción en la extensión del manto Laurentino. Este evento posiblemente jugó un papel importante en el cambio climático del Hemisferio Norte entre 10-5 ka cal. aP. Como resultado hubo un incremento rápido en las temperaturas del Hemisferio Norte. Por lo tanto la posición latitudinal de la Zona Intertropical de Convergencia (ITCZ, por sus siglas en ingles) cambió hacia el norte sobre el Atlántico (Figura 18). De acuerdo a concentraciones de Ti en los sedimentos de la cuenca Basin, Haug et al. (2001) y Peterson y Haug (2006) reportan una migración al norte en la posición de la ITCZ durante 10.5 – 5.4 ka cal. aP. Lo que intensificó las lluvias de verano en el Hemisferio Norte. Haug et al. (2001) también reporta una gradual disminución en la precipitación a partir del 5.4 ka cal. aP, un intervalo en el cual la ITCZ comienza su desplazamiento en dirección Sur. Los registros obtenidos de Las Cruces indican mayor aporte pluvial durante el intervalo de un ITCZ hacia norte y mayor salinidad (evaporación) durante un ITCZ hacia sur. Sosa-Najera (2010) observó una relación similar para la zona central de México; en el lago Santa María del Oro, identificó eventos de sequía, correlacionandolos con un desplazamiento al sur de ITZC, mientras que otros años secos se correlacionan con un índice positivo de ENOS. Diversos autores (Cane and Clement, 1999, Clement et al., 1999, 2001, Kershaw et al., 2003) relacionan la migración latitudinal de la ITCZ durante el Holoceno como un resultado en el cambio de la estacionalidad en la insolación, asociado al ciclo de ~21 ka de precesión de acuerdo a los mecanismos sugeridos por Milankovitch.

En la época moderna, la actividad del El Niño Oscilacion Sur (ENOS) controla la temperatura del Oceano Pacifico y la variaciones interanuales de la precipitación (Leduc *et al.*, 2009). Durante los años con mayor actividad de ENOS, inusuales condiciones de sequía ocurren en la parte oeste del Pacifico (Dai y Wigley, 2000). Puesto que la variabilidad de ENOS tiene repercusiones a nivel mundial a través de diferentes modos de teleconexiones, entre ellos el desplazamiento al sur de la ITCZ (Cane y Clement, 1999; Clement *et al.*, 2001). En el presente trabajo, se compara el registro de aporte pluvial obtenido del paleo-lago Las Cruces con los datos proxy de paleo-ENOS (Moy *et al.* 2002) con la finalidad de observar la influencia de ENOS sobre la variación en la precipitación en la parte sur del Desierto de Chihuahua (Figura 18). El registro de paleo-ENOS fue obtenido de depositos sedimentarios de la laguna Pallcacocha (sureste de Ecuador) y documenta la frecuencia de eventos ENOS a escala milenaria (Moy *et al.*, 2002). El registro de descarga pluvial en Las Cruces muestra una correlación negativa con la frecuencia de los eventos ENOS. Los eventos húmedos registrados durante 8.4 – 5 ka cal. aP. y entre 2.2 - 2 corresponden a los intervalos con una menor frecuencia de ENOS. El intervalo seco registrado entre el 5 – 2.3 ka cal. aP. ocurre durante el intervalo donde se incrementa gradualmente la frecuencia de la fase calida El Niño. Las condiciones áridas establecidas a partir del 2 ka cal. aP. coincide con una intervalo de mayor intensidad y frecuencia de ENOS. Estudios actuales sugieren que las condiciones atmosféricas de México son afectadas de manera importante por la Oscilación Decadal del Pacífico (Magaña *et al.*, 2003). Durante los eventos cálidos (i.e. El Niño) cuando los vientos alisios se debilitan y se da la migración al sur de la ITCZ la intensidad del Monzón Norte Americano disminuye, lo que causa condiciones áridas

sobre la República Mexicana (Magaña y Quintanar, 1997). Por otra parte durante los eventos fríos (i. e. La Niña) resultado de la migración al norte de la ITCZ, se observa una intensificación en el régimen de lluvias de verano. Asumiendo el principio fundamental del uniformismo y que la actual modulación del régimen de lluvias de verano efecto de ENOS estuviera presente durante el Holoceno, para explicar las fluctuaciones en el registro de Las Cruces y la variación en la precipitación en el margen sur del Desierto de Chihuahua.

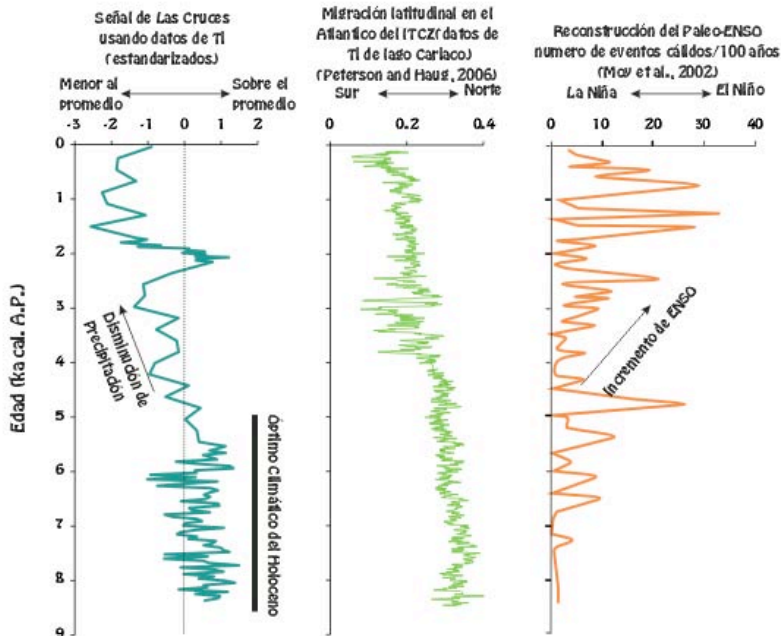


Figura 18. Comparación del registro de aporte pluvial a la cuenca de Las Cruces con los proxy registros de migración latitudinal en el posición de ITCZ y actividad de El Niño Oscilación del Sur (ENOS).

## CAPÍTULO 8

## Conclusiones

Las conclusiones de la presente investigación se resumen en los siguientes puntos:

-La secuencia sedimentaria con una longitud de 226 cm obtenida del Paleolago Las Cruces, ubicada en el margen sur del desierto de Chihuahua (estado de San Luis Potosí) abarca los últimos 8.4 ka cal aP.

-La concentración multi-elemental (Ti, Ca y Zr/Ti), valor de susceptibilidad magnética y abundancia de minerales evaporíticas reconstruyeron las condiciones hidrológicas de la cuenca, así como la variabilidad climática durante el Holoceno.

-Los valores de Ti indican mayor aporte pluvial durante 8.4-5 ka cal aP. Las variaciones en aporte pluvial se relacionan con el desplazamiento al norte ITCZ, al Óptimo climático del Holoceno y una menor actividad de ENOS.

-Excepto por el intervalo húmedo durante 2.2-2 ka cal aP, la cuenca recibió menor precipitación durante los últimos 5 ka cal. aP., periodo correlacionado con la migración al sur de ITCZ y mayor frecuencia de ENSO.

-El abrupto incremento en la precipitación durante 2.2-2 ka cal aP. se correlaciona con un estado con menor actividad de ENOS.

**BIBLIOGRAFÍA**

-Antevs, E., 1955 Geologic-climatic dating in the West: *American Antiquity*, Vol. 20, p. 317-335.

-Asmerom Y., Polyak V., Burns S., Rasmussen J., 2007, Solar forcing of Holocene climate: New insights from a speleothem record, Southwestern United States, *Geology*, Vol. 3, no.1, p. 1-4.

-Bard, E., 1988. Correction of accelerator mass spectrometry  $^{14}\text{C}$  ages measured in planktonic foraminifera: Paleoceanographic implications. *Paleoceanography* 3, p. 635-645-

Bard, E., Hamelin, B., Fairbanks, R.G., and Zindler, A., 1990, Calibration of the  $^{14}\text{C}$  timescale over the past 30,000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals. *Nature* 345, p. 405-410.

-Bianchi, G.G., and McCave, I.N., 1999, Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. *Nature*, v. 397, p. 515-517.

-Bloemendal, J., and Demenocal, P., 1989. Evidence for a change in the periodicity of tropical climate cycles at 2.4 Myr from whole-core magnetic susceptibility measurements. *Nature* 342, p. 897-900.

-Bond, G.C., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., and Bonani, G., 2001, Persistent solar

influence on North Atlantic climate during Holocene, *Science*, v. 294, p. 2130-2136.

-Bradbury J. P. 2000, Limnologic history of Lago Pátzcuaro, Michoacan, México for the past 48,000 years: Impacts of climate and man. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 163, p. 69-95.

-Bradley, R. S. 1999. *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*, 2nd ed. International Geophysics Series, Volume 64. San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press.

-Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., Ortega, B., 2010, Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del Centro de México durante el ultimo máximo glacial, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, p. 359-377.

-Cane, M., Clement, A. C., 1999, A role for the tropical Pacific coupled ocean-atmosphere system on Milankovitch and millennial time-scales: Part II. Global impacts. In: Clak PU, Webb RS, Keigwin LD (eds) *Mechanism of Global Climate Change at Millennial Time Scales*, vol. 112. Washinton DC: American Geophysical Union, p. 373-383.

-Castiglia J. P., Fawcett J.P., 2006, Large Holocene lakes and climate change in the Chihuahuan Desert, *Geology*, vol. 34, no. 2, p. 113-116.



- Cavazos, T., Rivas, D., 2004. Variability of extreme precipitation events in Tijuana, México. *Climate Research* 25, 229-243.
- Chavez-Lara, C.M., Roy, P.D., Caballero, M.M., Carreño, A.L., Lakshumanan, C., 2012, Lacustrine ostracodes from the Chihuahuan Desert of México and inferred Late Quaternary paleoecological conditions, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 29, p. 422-431.
- Clement, A.C., Seager, R., Cane, M.A., 1999, Orbital controls on the El Niño/Southern Oscillation and the tropical climate, *Paleoceanography* 14, p. 441-456.
- Clement, A.C., Cane, M.A., Seager, R., 2001, An orbitally driven tropical source for abrupt climate change, *J. Climate* 14, p. 2369-2375.
- COHMAP members, 1988, Climatic change of the last 18,000 years: Observation and Model Simulations, *Science* vol. 241, p. 1043-1052.
- Crowley, T., 2000, Causes of climate change over the past 1000 years, *Science*, v. 289, p. 270-277.
- Dai, A., Wigley, T.M.L., 2000, Global patterns of ENSO-induced precipitation, *Geophysical Research Letter* 27(9), p. 1283-1286.
- Dansgaard, W., Johansen, S., Moller, J., 1969, One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland Ice Sheet., *Science* v. 166, pp. 377-381.

- Dansgaard, W., Johansen, S., Reeh, N., Cundestrup, N., Clausen, H.B., and Hammer, C.U., 1975. Climatic changes, Norsemen and modern man. *Nature*, 255: p. 24-28.
- Davis, O.K., Anderson, R. S., 1987. Pollen in packrat (Neotoma) middens: pollen transport and the relationship of pollen to vegetation. *Palynology* 11, 185-198.
- Digital Desert Library (1999, January 8), The Chihuahuan Desert (On Line). Disponible: Internet: <http://horizon.nmsu.edu/ddl3/chihuahua/html>
- Douglas, M. W., Maddox, R. A., Howard, K., Reyes, S., 1993, The Mexican Monsoon. *Journal of Climate* 6, 1665-1677.
- García M.E., 1987, Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Cuarta edición. Eriqueta García de Miranda. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. pp. 217
- García, E. 1989, *Apuntes de Climatología*, sexta edición, Mexico D.F. pp 155.
- Haug, G.H., Hughen, K.A., Sigman, D.M., Peterson, L.C., Röhl, U., 2001, Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocen. *Science* 293: p. 1304-1308.
- Internacional Commission on Stratigraphy, 2013, *Internacional Stratigraphic Chart*, Retrieved 2013-01.

- Kershaw, P., vande Kaars, S., and Moss, P., 2003, Late Quaternary Milankovich-scale climatic change and variability and its impact on monsoonal Australasia, *Marine Geology* 201, p.81-95.
- Kirby, M.E., Lund, S.P., Patterson, W.P., Anderson, M.A., Bird, B.W., Ivanovici, L., Monarrez, P., Nielsen, S., 2010, A Holocene record of Pacific decadal oscillation (PDO)-related hydrologic variability in southern California (Lake Elsinore, CA). *Journal of Paleolimnology* 44, p. 819-839.
- Klug, H.P., Alexander L.E., 1974, X-ray difracction procedures for Polycrystalline and amorphous materials, Ed. John Wiley and Sons, 2<sup>nd</sup> ed. New York.974
- Köppen, W.,Geiger, R., (1930-1943), *Handbuch der Klimatologie in fünf Bänden*. Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Lambeck, K., Esat, T.M., Potter, E.K., 2002, Links between climate and sea levels for the past three million years, *Nature* 419, p. 199-206.
- Leduc, G., Vidal, L., Tachikawa, K., Bard, E., 2009. ITCZ rather than ENSO signature for abrupt climate changes across the tropical Pacific?, *Quaternary Research* 72, p. 123-131.
- Lozano, R., Bernal, J. P., 2005, Characterization of a new set of eighth geochemical referente material for XRF major and trace element analysis, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 22, p. 329-344.

- MacFadden, B.J., 2005, Diet and habitat of toxodon megaherbivores (Mammalian, Notoungulata) from the late Quaternary of South and Central America, *Quaternary Research*, 64, p. 113-124.
- Magaña, V., Quintanar, A.L., 1997, On the use of General Circulation Models to study regional climate. Proceeding of the second UNAM-CRAY Supercomputing Conference. Cambridge University Press, p. 39-48.
- Magaña, V., Vázquez, J.L., Pérez, J.L., Pérez J.B., 2003, Impact of El Niño on precipitation of México. *Geofísica Internacional* 42, p. 313-330.
- McCrary, J.H., Edmonds, C.M., 1973, Portable X-ray fluorescence single element analyzer, *Nuclear Instruments and Methods*, Volume 109, Issue 2, p. 389-391.
- Menking M. K., Anderson Y. R., 2003, Contributions of La Niña and El Niño to the middle Holocene drought and late Holocene moisture in the American Southwest, *Geology*, Vol. 33, no. 11, p. 937-940.
- Metcalf, S., Bimpson, A., Courtice, A.J., O'Hara, S.L., Taylor, D.M., 1997, Climate change at the Monsoon/Westerly boundary in Northern México. *Journal of Paleolimnology*, 17, p. 155-171.
- Metcalf S., Say A., Black S., McCulloch R., O'hara S., 2002, Wet Conditions during the last Glaciation in the Chihuahuan Desert, Alta Babicora basin, México, *Quaternary Research*, Vol. 57, p. 91-101.

- Metcalf, S.E., 2006, Late quaternary environments of the Northern deserts and central transvolcanic belt of México, *Annals of Missouri Botanical Garden*, 92, p. 258-273.
- Montero-Serrano, J.C., Bout-Roumazelles, V., Sionneau, T., Tribovillard, N., Bory, A., Flowe, B.P., Riboulleau, A., Martinez, P., Billy, I., 2010. Changes in precipitation regimes over North America during the Holocene as recorded by mineralogy and geochemistry of Gulf of México sediments, *Global and Planetary Changes* 74, p. 132-143.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T., Anderson, D.M., 2002, Variability of El Niño/ Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch, *Nature* 420, p. 162-165.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715-717.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, 1523-1534.
- Ortega-Guerrero, B., Caballero-Miranda, M., Lozano-Garcia, S., De la O Villanueva, M., 1999. Palaeoenvironmental record of the last 70,000 yr un San Felipe Basin, Sonora desert Mexico: preliminary results. *Geofísica Internacional* 38, 153-163.
- Ortega-Ramírez, J.R., Valentine-Banuet, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Mortera-Gutiérrez, C.A., Alvarado-Valdez, G., 1998, Paleoclimatic changes during the

Late Pleistocene-Holocene in Laguna de Babícora, near the Chihuahua Desert, México, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35, p. 1168-1179.

-Palacios-Fest, M.R., Carreño, A.L., Ortega-Ramirez, J.R., Alvarado-Valdez, G., 2002, A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babicora, Chihuahua, México based on ostracode paleoecology and trace element shell chemistry. *Journal of Paleolimnology*, 27, p. 185-206.

-Perez-Crespo, V.A., Arroyo-Cabrales, J., Alva-Valdivia, L.M., Morales-Puente, P. y Cienfuegos-Alvarado, E., 2012, Datos isotópicos ( $\delta^{12}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) de la fauna pleistocénica de la Laguna de las Cruces, San Luis Potosí, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 29, núm 2, p. 299-307.

-Peterson, L.C., Haug, G.H., 2006, Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 234, p. 97-113.

-Polyak J. V., Rasmussen B. T. J., Asmeron J., 2004, Prolonged wet period in the Southwestern United States through the Yungler Dryas, *Geology*, Vol. 32, no. 1, p. 5-8.

-Poore R. Z., Pavich M. J., Grissino-Mayer H. D., 2005, Record of North American southwest monsoon from Gulf of México sediment cores, *Geology*, Vol. 33, no. 3, p. 209-212.

- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hadjas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S.R., Turney, C.S.M., Van Der Plicht, J., Wayhenmeyer C.E., 2009, IntCal 09 and Marine 09 radiocarbon age calibration curves, 0 – 50,000 years cal BP, *Radiocarbon*, 51, p. 1111-1150.
- Roy, P. D., Smykatz-Kloss, W., Sinha, R., 2006. Late Holocene geochemical history inferred from Sambhar and Didwana playa sediments, Thar Desert, India: comparison and synthesis. *Quarter. Int.* 144, 84-98
- Roy, P. D., Smykatz-Kloss, W., 2007. REE geochemistry of the recent playa sediments from the Thar Desert, India: an implication to playa sediment provenance. *Chem. Erde-Geochem.* 67, 55-68.
- Roy P. D., Caballero M., Lozano R., Smykatz-Kloss, W., 2008, Geochemistry of late Quaternary sediments from Tecomulco lake, central México: Implication to chemical weathering and provenance. *Chemie der Erde.* 68, 383-393.
- Roy P. D., Caballero M., Lozano R., Pi T., Morton O., 2009, Late Pleistocene-Holocene geochemical history inferred from Lake Tecomulco sediments, Basin of México, México, *Geochemical Journal*, Vol. 43, p. 49-64.
- Roy P. D., Caballero M., Lozano R., Ortega B., Lozano S., Pi T., Israde L., Morton O., 2010, Geochemical record of Late Quaternary paleoclimate from lacustrine

sediments of paleo-lake San Felipe, western Sonora Desert, México, *Journal of South American Earth sciences*, Vol. 29, p. 586-596.

-Roy, P.D., Caballero, M., Lozano, S., Morton, O., Lozano, R., Jonathan, M.P., Sánchez, J.L., Macías, M.C., 2012, Provenance of sediments deposited at paleolake Sna Felipe, western Sonora Desert: Implications of regimes of summer and winter precipitation during last 50 cal kyr BP. *Journal of Arid Environments*, 81, p. 47-58.

-Roy, P.D., Rivero-Navarrete, A., Lopez-Balbiaux, N., Pérez-Cruz, L.L., Metcalfe, S.E., Muthu Sankar, G., Sánchez-Zavala, J.L., 2013. A record of Holocene summer-season paleohydrological changes from the southern margin of Chihuahua Desert (México) and possible forcings. *The Holocene* 28 (3), 1105-1114.

-Schönwiese, C., 1993, Globale Klimaänderungen in Vergangenheit und Zukunft. *Geographische Rundschau* 2, p. 74-80.

-Schönwiese, C., 1995, *Klimaänderungen: Daten, Analysen, Prognosen*. Springer, Heidelberg.

-SEMARNAP, 1996. Programa de Áreas Naturales Protegidas de México 1995-2000. Instituto Nacional de Ecología. México.

-Servicio Geológico Mexicano, 2007, Carta Geológico-Minera Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí-Zacatecas, scale 1:100,000, 14Q-a(7).



- Snowball, I., and Thompson, R., 1992, A mineral magnetic study of Holocene sediment yields and deposition patterns in the Llyn Geirionydd catchment, north Wales. *The Holocene*, 2, p. 258-268.
- Snowball, I., 1993. Mineral magnetic properties of Holocene lake sediments and soils from the Karsa Valley, Lapland, Sweden, and their relevance to paleoenvironmental reconstructions. *Terra Nova*, 5, p. 258-270.
- Sosa-Najera S., Lozano G. S., Priyadarsi D. R., Caballero M., 2010, Registro de sequías históricas en el occidente de México con base en el análisis elemental de sedimentos lacustres: el caso del lago Santa María del Oro. *Boletín de la sociedad geológica mexicana*, Vol. 62, no. 3, p. 437 -45.
- Smykatz-Kloss, W., Smykatz-Kloss, B., Naguib, N., Zoeller, L., 2004. The reconstruction of paleoclimatological changes from mineralogical and geochemical compositions of loess and alluvial loess profiles. In: Smykatz-Kloss, W., Felix-Henningsen P. (Eds.), *Paleoecology of Quaternary Drylands*. Springer, pp. 101-119.
- Street-Perrott F. A., and Harrison, S. P., 1985, Temporal variations in lake levels since 30,000 14C yr B.P.: An index of the global hydrological cycle, in Hansen J.E., and Takahashi T., eds., *Climate processes and sensitivity*: Washinton D.C., American Geophysical Union, p. 118-129.
- Swanson, S.K., Bahr, J.M., Schwar, M.T, Potter, K.W., 2001. Two-way cluster analysis of geochemical data to constrain spring waters. *Chemical Geology* 179, 73-91.

- Thouveny, N., Beaulieu, J.L., Bonifay, E., Creer, K.M., Gulot, J., Icole, M., Johnsen, S., Jouzel, J., Reille, M., Williams, T., Williamson, D., 1994. Climate variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism, *Nature*, 371, p. 503-506.
- Twenhofel, W. H., 1950, Principles of sedimentation. Ed. McGraw-Hill, New York.
- Vannete, M.D., Sefat, A.S., Jia, S., Law, S.A., Lapertot, G., Bud'ko, S.L., Canfield P.C., Schamalian, J., Prozorov, R., 2007, Precise measurements of radio-frequency magnetic susceptibility ferromagnetic and antiferromagnetic materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, p. 354-363.
- Verma, S. P., Lozano Santa Cruz, R., Girón P., Velasco, F., 1996. Calibración preliminar de Fluorescencia de Rayos X para análisis cuantitativo de elementos traza en rocas ígneas. *Actas INAGEQ 2*, p.231.242.
- Winstanley, D., 1973, Rainfall patterns and general atmospheric circulation. *Nature*, 245, 190-194.
- Xu, J., Gao, X., Shuttleworth, J., Sorooshian, S., Small, E., 2004. Model climatology of the North American Monsoon Honest period during 1980-2001. *Journal of Climate* 17, 3892-3906.
- Zecchin, M., Baradello, L., Brancolini, G., Donda, F., Rizzetto, F., Tosi, L., 2008, Sequence stratigraphy base don high-resolution seismic profiles in the late

Pleistocene and Holocene deposits of the Venice area, *Marine Geology* 253, p. 185-198.