



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA

**EVOLUCIÓN PALEOAMBIENTAL DEL
PLEISTOCENO-Holoceno EN EL VALLE
DE LOS ESPEJOS**

T E S I S

**Que para obtener el grado de:
MAESTRA EN CIENCIAS**

**Con especialidad en:
GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

**Presenta:
Ing. Ana Gabriela Carranza Rivera**

**Asesora:
Dra. Isabel Israde Alcántara**

**Coasesora:
Dra. Bertha Oliva Aguilar Reyes**



MORELIA, MICHOACÁN. FEBRERO 2013



RESUMEN
ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN.....	11
II.	JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS	
	II.1) JUSTIFICACIÓN.....	13
	II.2) HIPÓTESIS.....	13
III.	OBJETIVOS	
	III.1) Objetivo General.....	14
	III.2) Objetivos Específicos.....	14
IV.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	
	IV.1) Localización geográfica.....	15
	IV.2) Geología.....	17
	IV.3) Hidrografía.....	20
	IV.4) Edafología.....	21
V.	ANTECEDENTES.....	22
	V.1) Investigaciones paleoambientales realizadas en el Centro de México.....	24
	V.2) Investigaciones paleoambientales de la región Centro-Occidente de México..	25
	V.2.1) Lago de Cuitzeo.....	25
	V.2.2) Lago de Pátzcuaro.....	26
	V.2.3) Lago de Zacapu.....	27
	V.2.4) Lago de Zirahuén.....	29
	V.2.5) Lago Santa María del Oro.....	30
VI.	METODOLOGÍA	
	VI.1) Trabajo de Campo (Obtención del núcleo).....	31
	VI.2) Trabajo de Laboratorio.....	34
	VI.2.1) Estratigrafía y muestreo del núcleo ACA I-11.....	34
	VI.2.2) Análisis de contenido de carbono orgánico e inorgánico (COT-CIT).....	37
	VI.2.3) Análisis de Susceptibilidad Magnética.....	39
	VI.2.4) Análisis de Espectrometría de Masas (ICPMS).....	42
	VI.2.5) Análisis de Difracción de Rayos X (DRX).....	43
	VI.2.6) Análisis Granulométrico.....	45
	VI.2.7) Análisis de Diatomeas.....	46
	VI.3) Trabajo de Gabinete.....	50

VII. RESULTADOS	
VII.1) Estratigrafía	51
VII.2) Análisis de contenido de Carbono Orgánico e Inorgánico	63
VII.2.1) Contenido de Carbono Orgánico Total (COT).....	64
VII.2.2) Contenido de Carbono Inorgánico Total (CIT)	66
VII.3) Susceptibilidad Magnética	68
VII.4) Espectrometría de Masas (ICP-MS).....	71
VII.5) Difracción de Rayos X (DRx).....	80
VII.6) Análisis Granulométrico.....	86
VII.7) Identificación de Diatomeas	91
VIII.DISCUSIONES	
VIII.1) Descripción de la evolución de la sedimentación en el depocentro de la cuenca.	94
VIII.1.1) FASE 1.- Lago de aguas bajas a muy fluctuante con alta concentración iónica	95
VIII.1.2) Fase II.- Establecimiento de una ciénaga fluctuante que paulatinamente pasa a un cuerpo de agua cada vez más profundo	97
VIII.1.3) Fase III.- El más alto nivel lacustre y estabilidad.....	97
VIII.1.4) Fase IV.- Descenso rápido para dar paso a un lago turbio de cierta profundidad.....	99
VIII.1.5) Fase V.- Segundo y último nivel lacustre alto por un período de tiempo corto.....	99
VIII.1.6) Fase VI.- Último descenso del nivel lacustre-ciénaga de aguas bajas y alcalinas.....	100
VIII.1.7) Fase VII.- Conformación de la Ciénega de los Espejos	100
VIII.2) Correlación del Valle de los Espejos con otras cuencas	102
IX. CONCLUSIONES	106
X. LITERATURA CITADA.....	108
XI. ANEXOS	116
XI.1) Base de datos de los análisis geoquímicos en base a las zonas estratigráfica.	116
XI.2) Base de datos de las relaciones geoquímicas en base a las zonas estratigráfica.	120
XI.3) Base de datos de las Diatomeas.....	125

LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y GRÁFICAS

Figuras:

Figura 1.- Ubicación geográfica del Valle de los Espejos.....	15
Figura 2.- Panorámica del Valle de los Espejos.....	16
Figura 3.- Perfil esquemático S-N del graben de Acambay y sus relaciones estratigráficas y de fallamiento (Israde-Alcántara <i>et al.</i> , 2012).	19
Figura 4.- Mapa del sistema hidrológico del municipio de Acambay. Modificado de INEGI (2009). (1) Los Terreros, (2) Hondiga, (3) Boshi, (4) Tepozán, (5) Hondo, (6) Grande, (7) Los Laureles, (8) El Paile, (9) Grande, (10) Chuparrosa, (11) La Tinaja, (12) Cargadero, (13) El Gallo, (14) Arrollo El Tejocote, (15) El Rancho, (16) Buenavista, (17) Los Alamos y (18) El Salto.	20
Figura 5.- Imagen satelital del Valle de los Espejos, donde se indica el punto de extracción del núcleo ACA I-11.	32
Figura 6.- Fotografías de la perforación realizada en el Valle de los Espejos.....	33
Figura 7.- Fotografías que muestran los tramos que conforman al núcleo ACA I-11.....	33
Figura 8.-Fotografías que muestran cómo se realizó la estratigrafía en el laboratorio de cuencas lacustres del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (IIM).....	34
Figura 9.-En la fotografía se muestra la realización del muestreo.....	35
Figura 10.- Coulómetro (Marca: UIC, Modelo 5014).....	37
Figura 11.- Susceptibilómetro Kappabridge AGICO MFK1-B.....	41
Figura 12.- Equipo de Difracción de Rayos X (SIEMENS D5000).....	44
Figura 13.- Equipo de análisis granulométrico (Coulter LS-100 Q).	45
Figura 14.-Estratigrafía del núcleo ACA I-11 extraído del depocentro del Valle de los Espejos.....	52
Figura 15.- Estratigrafía de la zona 1, compuesta por arcilla limosa, arenas, limos, arcillas, limo arenoso y material retrabajado.	53
Figura 16.- Estratigrafía de la zona 2, compuesta por arenas, arcillas, limo arcilloso, limo, arcilla limosa y limo arenoso.	54
Figura 17.- Estratigrafía de la zona 3, compuesta por arena limosa, arcilla, limo arenoso, limo, limo arcilloso, arenas, arena limosa y arcilla limosa.	56
Figura 18.- Estratigrafía de la zona 4, constituida por limo, limo arcilloso, arcilla, limo arenoso, arena, con intercalaciones de ceniza volcánica.	58
Figura 19.- Estratigrafía de la zona 5, conformada por limo arenoso, arenas, arcilla limosa y turba.....	60
Figura 20.- Estratigrafía de la zona 6, constituida por arenas y arcilla.	61
Figura 21.- Estratigrafía de la zona 7, compuesta por limo arcilloso, arcilla, turba y limo arenoso. Con evidencia de material retrabajado y materia orgánica.....	62

Tablas:

Tabla 1.- Contiene las 160 muestras obtenidas del núcleo ACA I-11, indicando el tramo (Tr.) y su respectiva zona a la que pertenece, así como también la profundidad a la que corresponde.	36
Tabla 2.- Clasificación de la textura de los suelos de acuerdo a los diferentes tamaños de partícula.	46
Tabla 3.- Valores altos de COT de la Zona 2 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.	64
Tabla 4.- Valores altos de COT de la Zona 3 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.	65

Tabla 5.- Valores altos de COT de la Zona 7 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.	65
Tabla 6.- Valores altos de CIT de la Zona 1 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.	66
Tabla 7.- Valores altos de CIT de la Zona 2 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.	66
Tabla 8.- Valores altos de CIT de la Zona 3 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.	67
Tabla 9.- Valores altos de CIT de la Zona 4 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.	67
Tabla 10.- Muestra profundidades con sus respectivos valores moderados, pero relevantes, de la susceptibilidad magnética (χ), correlacionada con las texturas y diatomeas de los sedimentos del núcleo ACA I-11.	70
Tabla 11.- Muestra profundidades con sus respectivos valores altos de la susceptibilidad magnética (χ), correlacionada con las texturas y diatomeas de los sedimentos del núcleo ACA I-11.	70
Tabla 12.- Valores de la gráfica 3, donde se muestra las zonas con sus respectivos tramos, profundidad en metros, susceptibilidad magnética (χ), concentraciones altas de calcio (Ca) y bajas de titanio (Ti), finalizando con la textura de la muestra del núcleo ACA I-11.	74
Tabla 13.- Valores de la gráfica 4, donde se muestra las zonas con sus respectivos tramos, profundidad en metros, contenido de carbón orgánico (valores bajos) e inorgánico (valores altos), concentraciones altas de calcio (Ca) y magnesio (Mg), finalizando con la textura de la muestra del núcleo ACA I-11.	76
Tabla 14.- Valores de la gráfica 5, donde se muestra las zonas con sus respectivos tramos, profundidad en metros, valores altos de χ y porcentajes del contenido de Fe, Ti, Al y K de las muestras del núcleo ACA I-11.	78
Tabla 15.- Valores de las fases secas indicadas en la gráfica 8, donde se resaltan siete muestras seleccionadas para DRX (5.74, 7.69, 9.28, 12.45, 16.68, 17.09 y 17.82 m).	80
Tabla 16.- Resultados obtenidos en porcentajes del tamaño de partícula del análisis granulométrico.	90
Tabla 17.- Los hábitats preferentes en el ambiente lacustre (Gasse, 1980).	91
Tabla 18.- Variables ambientales en la región de estudio (según LOWE 1974).	92
Tabla 19.- Correlación del Valle de los Espejos con otras cuencas limítrofes.	105

Gráficas:

Gráfica 1.- Muestra los porcentajes del análisis de contenido de carbón orgánico (COT) e inorgánico (CIT) en correlación con la estratigrafía del núcleo ACA I-11.	63
Gráfica 2.- Muestra los valores de susceptibilidad magnética correlacionada con la columna estratigráfica del núcleo de Acambay.	68
Gráfica 3.- Se muestra la correlación de la columna estratigráfica con los datos de la susceptibilidad magnética y las concentraciones de Ti y Ca. En barras de color con líneas punteadas se destacan los eventos de sequía más importantes de la secuencia.	73
Gráfica 4.- Se muestra la correlación de la columna estratigráfica con los valores de carbón orgánico e inorgánico y las concentraciones de Ca y Mg. En barras de color se destacan eventos de sequía más importantes de la secuencia.	75
Gráfica 5.- Se muestra la correlación de la columna estratigráfica con los datos de la susceptibilidad magnética y las concentraciones de Fe, Ti, Al y K. En barras de color se destacan los eventos de aporte clástico más importantes de la secuencia.	77
Gráfica 6.- Correlación de COT, CIT, χ , Fe, Ti, Al, K, Ca, Mg, Sr y Ba.	79
Gráfica 7.- Correlación de COT, CIT, χ , Ca/Al, Ca/Ti, Ca/Mg, Fe/Al, Sr/Ti, Fe/Ti, Mn/Ti, Sr/Ba y Zr/Al.	79
Gráfica 8.- Se muestra la correlación de la columna estratigráfica con los valores de carbón orgánico e inorgánico y las concentraciones de Ca, Mg y Ca/Mg. En barras de color se destacan eventos de sequía más importantes de la secuencia.	80
Gráfica 9.- Difactograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 17.82 m del núcleo ACA I-11.	81
Gráfica 10.- Difactograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 17.09 m del núcleo ACA I-11.	82
Gráfica 11.- Difactograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 16.68 m del núcleo ACA I-11.	83
Gráfica 12.- Difactograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 12.45 m del núcleo ACA I-11.	83
Gráfica 13.- Difactograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 9.28 m del núcleo ACA I-11.	84
Gráfica 14.- Difactograma que muestra las fase mineral presente a la profundidad de 7.69 m del núcleo ACA I-11.	84
Gráfica 15.- Difactograma que muestra las fase mineral presente a la profundidad de 5.74 m del núcleo ACA I-11.	85
Gráfica 16.- Comportamiento granulométrico de las facies pertenecientes al núcleo ACA I-11.	86
Gráfica 17.- Diagrama ternario de la textura de los sedimentos de acuerdo a los diferentes tamaños de partícula (Arcillas, Limos y Arenas) que conforman al núcleo ACA I-11.	88
Gráfica 19.- Comportamiento trimodal de la parte central (13.02 m) del núcleo ACA I-11.	89
Gráfica 20.- Comportamiento trimodal de la cima (0.13 m) del núcleo ACA I-11.	89
Gráfica 21.- Evolución sedimentológica del paleo-lago Espejos, mediante el análisis de diatomeas.	101

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, especialmente al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas en donde realicé mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (249577) durante el periodo de dos años 2010-2012.

A mi asesora de tesis la Dra. Isabel Israde Alcántara por ser una persona paciente, comprensiva y tolerante durante el proceso de mi formación en el posgrado. Le agradezco que haya compartido conmigo sus conocimientos adquiridos a lo largo de toda su experiencia laboral como investigadora y docente, por su apoyo y dirección tanto en lo académico como en lo personal y porque me ayudo a crecer como profesionista.

Le agradezco a mi coasesora la Dra. Bertha Oliva Aguilar Reyes por su apoyo con recursos para la perforación del núcleo ACA I-11, por el análisis de susceptibilidad magnética realizado en el Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) del Instituto de Geofísica, UNAM, Campus Morelia, Mich., y por su apoyo para sacar esta parte del trabajo adelante.

A mis sinodales Dra. Isabel Israde Alcántara, Dra. Bertha Oliva Aguilar Reyes, Dra. Gabriela Domínguez Vázquez, Dra. Erna López Granados, Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera y Dr. José Luis Macías Vázquez, que le dedicaron tiempo para enriquecer este estudio y se logrará concluir satisfactoriamente, por todos los comentarios y las correcciones que mejoraron sustancialmente este trabajo. A mis profesores de posgrado que contribuyeron a mi formación.

Quiero agradecer al apoyo de todo el personal que colaboró con este trabajo, al Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco), UNAM, Campus Morelia, Mich., en particular al Dr. Felipe García Oliva y al técnico M.C. Rodrigo Velázquez Durán, que nos permitieron realizar el estudio de contenido de carbón orgánico e inorgánico en el laboratorio de Biogeoquímica de Suelos. Al Dr. Avto Gogichiasvili por el fechamiento de C^{14} , al M.C Neftalí Razo Pérez por su colaboración y contribución en este proyecto.

Agradezco a la maravillosa mujer que me ha cuidado con dedicación. La cual se ha preocupado por mí, me ha apoyado en todo el trayecto de mi vida, ha sido mi fiel amiga y consejera incondicional, a ella que hizo a un lado a la mujer por ser madre, ella quien me ha amado desde que supo que me daría la vida, por ser mi inspiración e impulso para salir adelante en la vida, porque gracias a ella hoy soy una profesionalista y día con día me esmero porque se sienta orgullosa de mí.

A mi familia. En especial a mi papi Nicolás por quererme y procurarme como a una hija; a mi mami Carmen que siempre está en mi mente y si estuviera viva estaría orgullosa de mí, al igual que mi abuelita Dina y que mi tío Alejandro quienes creían en mí y me apoyaban para que yo siguiera adelante; a mis primos quienes son como mis hermanos Fabiola y Carlos les agradezco su apoyo, cariño y comprensión. A todos mis amigos que me han apoyado siempre y me han hecho sentir parte de su familia con el cariño y comprensión que me brindan. A mis compañeros del posgrado por todos los buenos y malos momentos que hemos compartido en este tiempo.

A todos muchas Gracias.

Ana Gabriela

RESUMEN

El Valle de los Espejos conforma el último remanente de lo que fue el paleolago de Acambay. Forma parte del sector central del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), situado en el límite sur del graben de Acambay, ocupando la porción septentrional de la falla Acambay-Tixmadejé. Se localiza en la zona montañosa del municipio de Acambay, al norte del estado de México. El Valle presenta una estructura circular de más de 90 km², cuya planicie denota de haber sido un lago, donde se documentó la variabilidad paleoambiental mediante el registro de los sedimentos lacustres de un núcleo de 21.48 m (es uno de los cinco núcleos más largos que se han realizado en México), a través del análisis de indicadores paleoclimáticos que incluyen Carbono Orgánico (COT), Carbono Inorgánico (CIT), susceptibilidad magnética, ICP-MS (Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo) y diatomeas.

El Valle de los Espejos siendo una cuenca cerrada, se considera que su registro abarca hasta el Último Interglacial que corresponde al Pleistoceno tardío-Holoceno, debido a que presentó alta sensibilidad a los cambios paleoambientales registrados en las facies sedimentarias que son generalmente limo-arcillosas. Los elementos mayores a lo largo de todo el núcleo indican que la roca madre fuente de aporte de la sedimentación lacustre corresponde a materiales volcánicos de composición andesítica. Se identificaron siete fases en la evolución sedimentaria en base a los distintos “proxies”, dos de ellas con alto nivel lacustre durante el Pleistoceno.

La base del núcleo de 21.48 a 13 m, se mantuvo como un cuerpo de agua más inestable con incrementos muy constantes en la salinidad, pasando a condiciones de ciénega, que paulatinamente se profundiza. De los 12 a los 5 m, continua la tendencia a valores altos de TOC asociados a *Stephanodiscus niagarae* y *Stephanodiscus sp.*, que sugieren un cuerpo de agua permanente con altos niveles lacustres que paulatinamente hacia la cima del núcleo fluctúan en su profundidad. De 5 a 2 m, el paleolago de Acambay se convierte en una ciénega siendo características las asociaciones *Eunotia-Navícula* y *Navícula-Epithemia*. En los últimos cientos de años Acambay se convierte en un cuerpo de agua estacional con condiciones de ciénegas fragmentadas que sucesivamente son drenadas para fines agrícolas.

Cabe señalar que el microfalloamiento y deformación sinsedimentaria a los 19.13 y a los 4.80 m de profundidad del núcleo acompañan a frústulas de diatomeas abriendo un campo para futura investigación sobre el potencial de las diatomeas ante eventos sísmicos en esta zona con un reconocido registro paleosismológico.

ABSTRACT

El Valle de los Espejos located in the central sector of the Transmexican Volcanic Belt conforms the northern portion Acambay graben bounded by the fault Acambay-Tixmadeje, which was an old lake basin were developed Acambay paleolake. Paleoenvironmental variability was documented through the record of a lake sediment core of 21.48 m, which corresponds to the Late Pleistocene-Holocene through the analysis of paleoclimatic proxies, that include Organic Carbon (TOC), inorganic carbon (TIC), magnetic susceptibility, ICP mass and diatoms.

It's considered that its register covers until the last interglacial and it is one of fifth long cores that exist in Mexico. Being a closed basin, showed high sensitivity to paleoenvironmental changes recorded in the sedimentary facies. The dominant sediments are generally silty-clay deposits. Major elements along the entire core indicate that the leaching deposits into the lake belong to andesitic volcanic materials from the bedrock. It was identified seven stages in the sedimentary evolution based on several proxies, two of them testimonies high lacustrine levels during the Pleistocene.

The base of the core, 22 to 13 m high, remained an unstable body of water with very constant increases in salinity, passing to marsh conditions with a gradual increase in deepness. From 12 m to 5 m, high TOC values associated with *Stephanodiscus niagarae* and *Stephanodiscus sp.*, suggests a permanent water body with high lake levels that fluctuate gradually towards the top in its depth (*Stephanodiscus-Aulacoseira*). From 5 to 2 m, the Acambay paleolake becomes a Ciénega, testified by the assemblages *Eunotia-Navicula* and *Navicula-Epithemia*.

In the last century, Acambay became a seasonal water body, with fragmented marsh conditions, that gradually were drained for agricultural purposes.

It is important to mention that microfaulting and another synsedimentary deformations are present in the depths of 19.13 and 4.80 m, in which diatoms shows a very high fragmentation. This fact open a field for future research about the potential of diatoms as another *proxie* to record seismic events in this zone that testimonies a recognized seismological activity along the time.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las características sobresalientes del período Cuaternario (últimos 2 Ma.), es la presencia de variaciones climáticas globales que se manifiestan con diferente intensidad y en diferentes escalas de tiempo, esta variabilidad climática se vio determinada por una sucesión de épocas donde destacan sus fluctuaciones climáticas extremas que generaron ciclos glaciares e interglaciares. Estos ciclos ocurrieron en intervalos de entre 23,000 y 100,000 años afectando de diferentes formas los sistemas terrestres (Shackleton, 1969). Las evidencias de estos cambios ocurridos provienen de una amplia variedad de registros geológicos, terrestres y marinos, que comprenden: sedimentos lacustres, fluviales y oceánicos; suelos, glaciares, depósitos eólicos y evaporíticos, espelotemas, corales, anillos de crecimiento en árboles, etc.

En la reconstrucción de los ambientes y clima del período Cuaternario, las depresiones lacustres son unas de las zonas de estudio más atractivas, ya que frecuentemente conservan evidencias de la historia de los procesos ambientales y climáticos ocurridos en períodos de varios cientos o miles de años. Estos sistemas sedimentarios, son capaces de registrar tanto las modificaciones ocurridas dentro de la cuenca de depósito, como aquellas de su entorno. Además, las algas son de los principales componentes biogénicos, indican en general la calidad del agua, gracias a que presentan sensibilidad ante los cambios del medio en el que viven, por lo tanto, se convierten en un indicador del estado ecológico de los sistemas acuáticos. Las algas en conjunto con otros indicadores paleoambientales (“proxies”) como: geoquímica de los sedimentos, contenido de materia orgánica y carbonatos, propiedades magnéticas y composición isotópica, permiten inferir cambios ambientales o climáticos para reconstruir la evolución de una cuenca (Caballero y Ortega, 2011).

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) de edad Neógeno-Holoceno, atraviesa el país por más de 1000 km desde el Océano Pacífico al Atlántico, es el

elemento más característico de la tectónica de México, con una orientación distintiva E-O diferente a las demás provincias geológicas del país. En el CVTM paralelamente con los procesos volcánicos y tectónicos, se han formado importantes y numerosas depresiones de origen lacustres, remanentes de un pasado más favorable para la formación de lagos que el presente. En estas depresiones han quedado registrados los eventos geológicos más importantes que han sucedido en su entorno. Cabe mencionar que uno de los componentes que dominan en el sector central del CVTM son las fallas geológicas regionales, que en conjunto con el vulcanismo, también han formado y mantenido la serie de lagos del centro de México (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

Los estudios de variabilidad climática o ambiental se realizan en lagos, ya que son ecosistemas sensibles a cualquier cambio en su entorno, lo que los convierte en sitios ideales. Cabe mencionar que los lagos más extensos en México se localizan en la cuenca del río Lerma (Chapala, Cuitzeo y Pátzcuaro, y algunas subcuencas como Zacapu) y los de menor extensión se localizan en la cuenca de México (Texcoco y Chalco). Además, son escasas las cuencas en las que se han obtenido núcleos que contengan las tres características necesarias para poder realizar una investigación paleoclimática detallada: a) ser profundos (Pátzcuaro de 15 m, Chalco de 26 m, Cuitzeo de 27 m y Chapala de 40 m); b) obtener registros paleolimnológicos completos y c) que abarquen hasta el Último Máximo Glacial (UMG) (Caballero y Ortega, 2011). Como por ejemplo las cuencas de Cuitzeo, Zirahuén, Texcoco y Tecocomulco donde su registro paleoambiental no es continuo, debido a la presencia de *hiatus* en la sedimentación.

La extracción de núcleos profundos resulta costosa y se tuvo la oportunidad de recuperar una secuencia continua en el Valle de los Espejos, Acambay. Por lo anterior constituye un excelente laboratorio para conocer la dinámica paleoambiental en el centro de México. Siendo una cuenca cerrada, las concentraciones de solutos y los niveles lacustres fluctúan en respuesta a la relación de precipitación/evaporación por lo que se pueden encontrar cambios en el régimen del balance hidrológico debido a que son registrados en las facies sedimentarias y en la composición multi-elemental (Valero-Garcés *et al.*, 1997).

II. JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS

II.1) JUSTIFICACIÓN

En el Valle de los Espejos se observa una sucesión lacustre del Pleistoceno superior-Holoceno donde no se han realizado investigaciones paleoambientales que contribuirían a conocer su dinámica climática y paleoambiental en el centro de México. Los cambios en los niveles lacustres que han ocurrido en el Valle están registrados en las facies sedimentarias, lo que permite que se puedan relacionar con eventos climáticos del pasado. El núcleo extraído del depocentro de esta zona, es uno de los pocos núcleos profundos que existen en el centro de México y que abarca hasta el último interglaciar.

II.2) HIPÓTESIS

En el Paleolago de los Espejos es posible que se registre la evolución Paleoambiental del Pleistoceno-Holoceno con un registro continuo de sedimentación por lo que se considera será posible obtener una señal paleoclimática muy clara durante el Cuaternario tardío, que permita ser comparada con otros registros de regiones limítrofes.

III. OBJETIVOS

III.1) Objetivo General

Determinar la evolución paleoambiental del Valle de los Espejos a través del estudio de distintos indicadores paleoambientales que registren las variaciones climáticas observadas en los sedimentos del núcleo ACA I-11, para establecer la correspondencia de los ciclos de sequía-humedad con el registro observado en otras cuencas al E-O del centro de México.

III.2) Objetivos Específicos

- i. Caracterizar y detallar la estratigrafía de los sedimentos del núcleo.
- ii. Identificar los procesos sedimentológicos y geoquímicos que permitan asociarlos a fases de humedad, sequía y vulcanismo.
- iii. Realizar la magnetoestratigrafía del núcleo ACA I-11, para determinar las fases de aporte en la cuenca.
- iv. Identificar las diatomeas fósiles a lo largo del registro que constituyan un apoyo para caracterizar las condiciones físico-químicas en las que se encontraba la cuenca de los Espejos.

IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

IV.1) Localización geográfica

El Valle de los Espejos se localiza en la zona montañosa del Municipio de Acambay, formando parte del sector central del Cinturón Volcánico Transmexicano. Se ubica en la zona Norte del Estado de México, entre los paralelos $19^{\circ} 55'$ y $20^{\circ} 0'$ de latitud norte; los meridianos $99^{\circ} 50'$ y $99^{\circ} 55'$ de longitud oeste; con una altitud aproximada de 2, 500 msnm; colinda al norte con el estado de Querétaro y el municipio de Aculco; al este con los municipios de Aculco y Timilpan; al sur con los municipios de Timilpan, Atlacomulco y Temascalcingo; al oeste con el municipio de Temascalcingo y el estado de Querétaro.

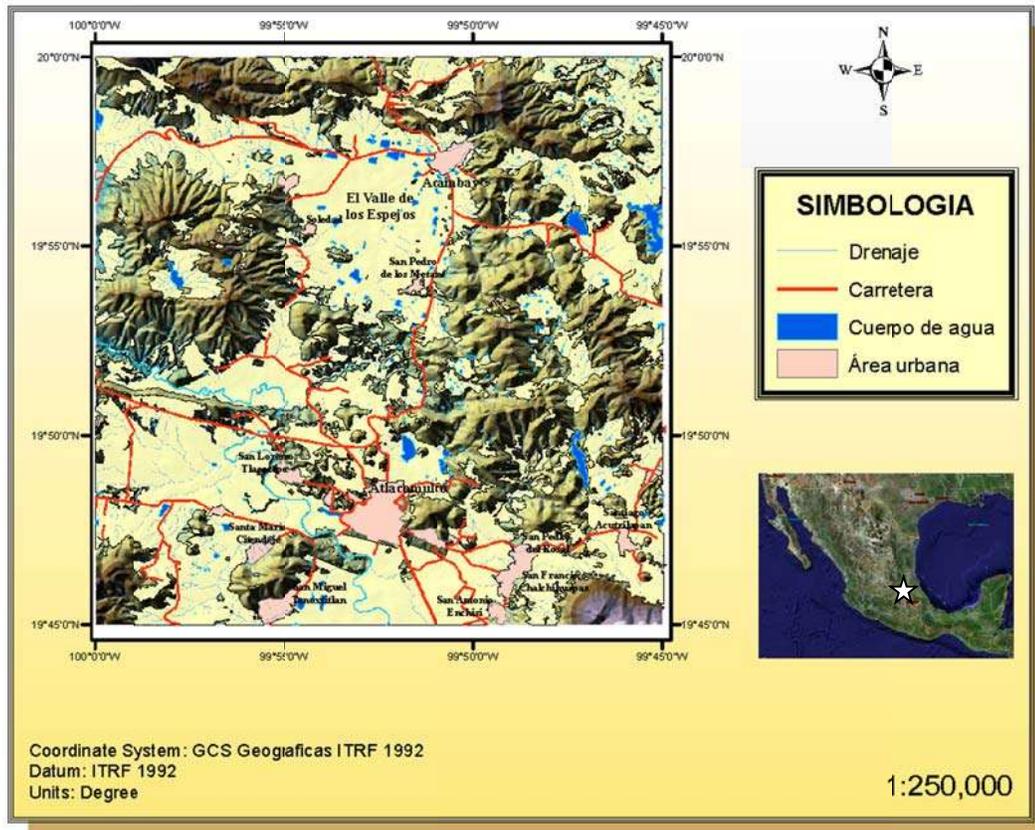


Figura 1.- Ubicación geográfica del Valle de los Espejos.

El Valle de los Espejos está situado en el límite Sur del Graben de Acambay, en donde se han desarrollado importantes sucesiones volcánicas de composición andesítica, basáltica y riolítica, sobresaliendo las morfologías asociadas a ignimbritas que emergieron a partir de las fallas. Además, ocupa la porción septentrional de la falla Acambay-Tixmadejé; presenta una estructura circular de más de 90 km², cuya planicie denota haber sido un lago. Cuando la cuenca aun almacenaba una serie de charcas de agua, se decía que con el resplandor del sol se reflejaban los rayos solares como si fueran espejos: de ahí su nombre (Serrano, 1988).



Figura 2.- Panorámica del Valle de los Espejos.

IV.2) Geología

La estructura del graben de Acambay presenta una orientación E-O, formada por un proceso de extensión intra-arco, se localiza en la porción central del Cinturón Volcánico Transmexicano. Está limitado al norte por las fallas de Acambay-Tixmadejé y Epitacio Huerta y al sur por las de Pastores y Venta de Bravo (Suter *et al.*, 1995, 2001). En el segmento más oriental del graben presenta una anchura de 15 km, haciéndose más amplio (18 km) hacia el oeste en el estado de Michoacán hasta una longitud de 80 km (Suter *et al.*, 1995; Aguirre-Díaz *et al.*, 2000).

Aguirre-Díaz *et al.*, (2000); describen la estratigrafía de los escarpes norte y sur del graben de Acambay, que está dominado por rocas del Plioceno-Pleistoceno, compuesta en la base por rocas metasedimentarias y diques, cubierta por depósitos piroclásticos, a su vez cubiertos por la Toba Amealco (4.7 Ma), que se encuentra cubierta por depósitos lacustres y lavas andesíticas-basálticas (Aguirre-Díaz, 1995, 1996).

Cabe mencionar que los sedimentos fluviales, aluviales y lacustres del Plioceno-Pleistoceno que se encuentran dentro del graben de Acambay, no han sido estudiados en detalle. Los depósitos lacustres se han atribuido a depresiones tectónicas (sag ponds) que se formaron a lo largo de la falla Pastores (Suter *et al.*, 1995; Aguirre-Díaz *et al.*, 2000) y las ignimbritas de la Caldera Amealco se han identificado en ambos lados del graben de Acambay por lo que han servido como horizontes índice del CVTM (Aguirre-Díaz *et al.*, 2000).

Suter *et al.*, (1995); determinaron una edad de 0,4 Ma para un flujo de lava "basáltica" (identificada después como andesítica) asociado con conos de escoria al noroeste de Atlacomulco. Este flujo de lava cubre la falla Pastores y se extiende hacia el norte de Tierras Blancas. Además, reportaron un afloramiento que expone la falla

Pastores y cortar los flujos de lava, pero esta relación se oculta en la mayoría de lugares, debido a la exposición de escasos escarpes de falla. Varios estratovolcanes, domos de lava y conos de ceniza con flujos de lava asociados se formaron dentro del graben (Norato-Cortés, 1998; Ramírez-Herrera, 1998).

Dentro del graben de Acambay, en su porción oriental, se han identificado dos edificios volcánicos de dimensiones importantes: el volcán Temascalcingo localizado en el poblado del mismo nombre en el sector más oriental del graben, y el volcán Altamirano que está aproximadamente a 20 km al oeste de Temascalcingo, es de composición dacítica-andesítica y se encuentra localizado en los límites de los estados de México y Michoacán, justo al sur de la caldera de Amealco (Aguirre-Díaz, 1996).

Además, los sedimentos del lago dentro del graben de Acambay contienen fósiles de vertebrados del Plioceno y Pleistoceno temprano pertenecientes al Blancano. La identificación de las faunas de vertebrados incluyen caballos, mastodontes, camellos, bisontes y antilocaprinidos, que se han recuperado de sedimentos cuaternarios del graben (Mercer *et al.*, 2002).

Una capa de ceniza volcánica se ha encontrado intercalada con los sedimentos del lago en la parte superior de la columna. Circones separados de esta capa de ceniza fueron fechados por trazas de fisión, arrojando una edad de 1.20 ± 0.13 Ma (Mercer *et al.*, 2002) por lo que la edad corresponde al último episodio de actividad lacustre en el límite sur del lago de los Espejos donde se desarrolla el lago durante el Pleistoceno superior-Holoceno.

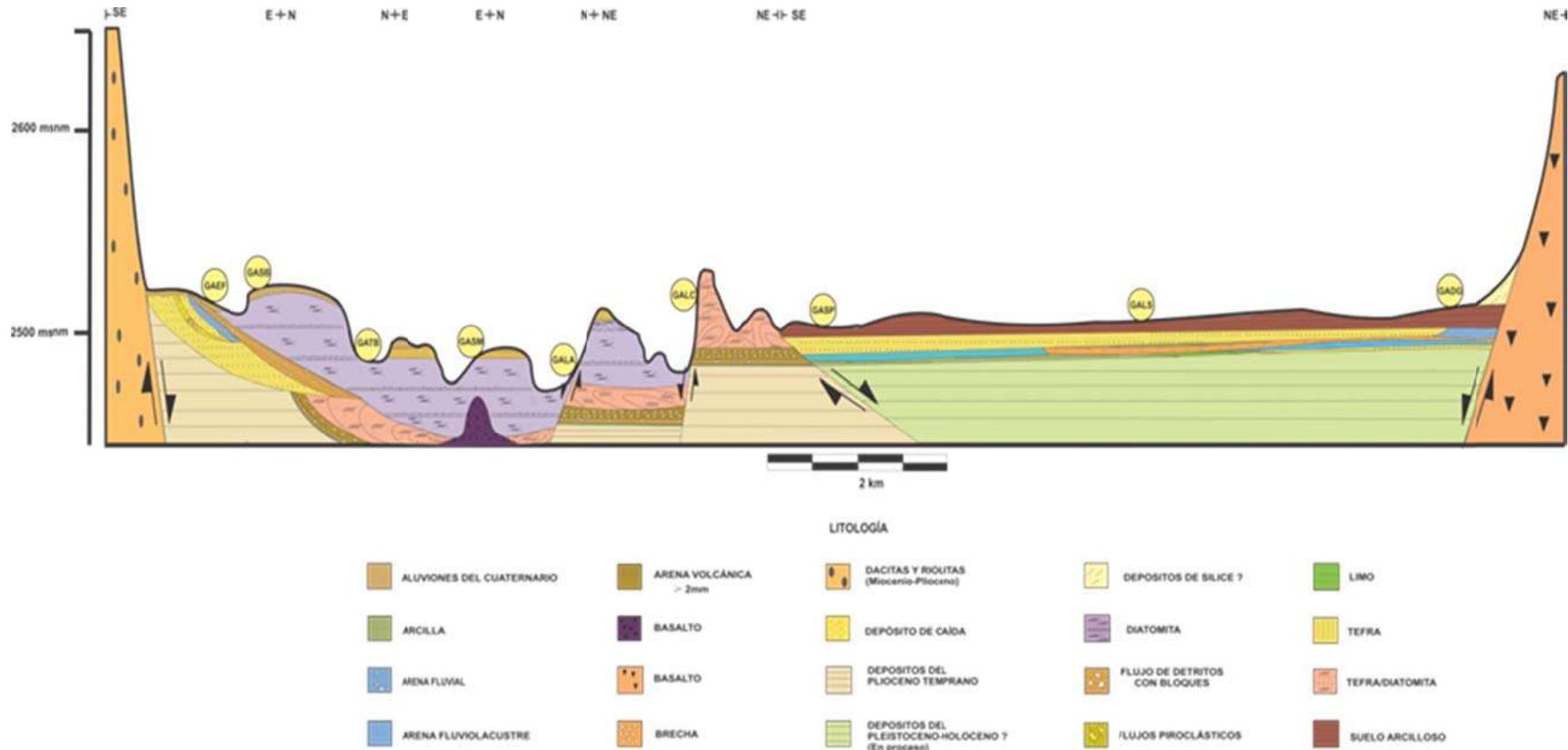


Figura 3.- Perfil esquemático S-N del graben de Acambay y sus relaciones estratigráficas y de fallamiento (Israde-Alcántara *et al.*, 2012).

IV.3) Hidrografía

La zona de estudio se localiza en la región hidrológica Lerma-Santiago, dentro de la cual se encuentran las cuencas de Río Lerma-Toluca y Río Moctezuma, y que a su vez consta de las Subcuencas de Río Atlacomulco-Paso de Ovejas, Río Prieto, Río Arroyo Zarco y Río Otzolotepec-Río Atlacomulco (INEGI, 2009).

Además, consta de corrientes de agua perennes como el río Las Adjuntas, Arroyo El Tejocote y El Rancho; también presenta zonas hidráulicas intermitentes como La Toma, Cargadero, La Tinaja, Arroyo Las Tinajas, Chuparrosa, Grande, El Campamento, El Paile, Buenavista, Los Laureles, El Gallo, Los Álamos, Tepozán, El Salto, Boshi, El Tinajal, Agua Limpia, Hondiga, Hondo, Tierra Blanca y Los Terreros.

Los cuerpos de agua que comprende esta zona, están conformados por la Laguna Huapango y la Laguna San Lucas (San Juanico), así como depósitos de agua o bordos de aquí el nombre del Valle de los Espejos.

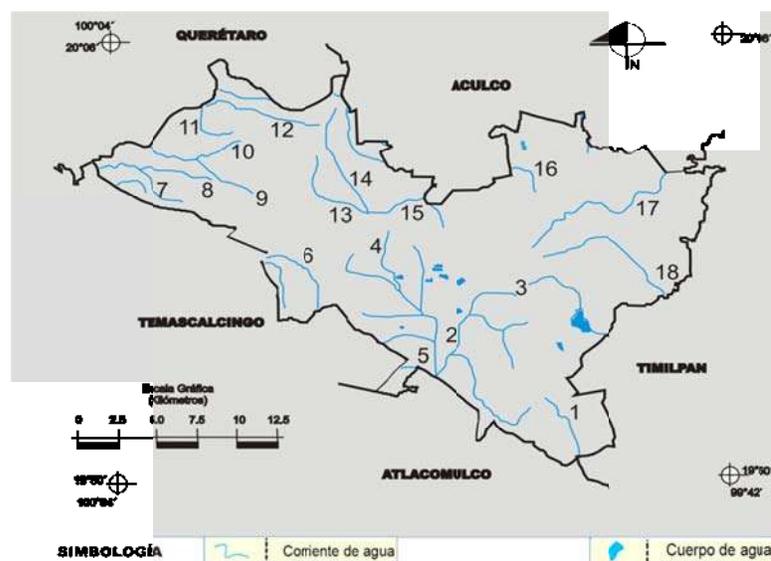


Figura 4.- Mapa del sistema hidrológico del municipio de Acambay. Modificado de INEGI (2009). (1) Los Terreros, (2) Hondiga, (3) Boshi, (4) Tepozán, (5) Hondo, (6) Grande, (7) Los Laureles, (8) El Paile, (9) Grande, (10) Chuparrosa, (11) La Tinaja, (12) Cargadero, (13) El Gallo, (14) Arrollo El Tejocote, (15) El Rancho, (16) Buenavista, (17) Los Alamos y (18) El Salto. (INEGI, 2009)

IV.4) Edafología

El manejo de sus suelos se caracteriza por el uso agrícola, pecuario y para asentamientos urbanos (INEGI, 2009). Cabe mencionar que por ser una zona con degradación edafológica, se requiere de estrategias para su conservación y uso. Los suelos con menor susceptibilidad a la erosión se encuentran en las zonas boscosas.

Los suelos más dominantes de la región corresponden al phaeozem; estos se caracterizan por tener una acumulación de materia orgánica y fácil manejo, lo que permite la práctica de la agricultura. Estos suelos son susceptibles a la erosión moderada y alta, se encuentran en zonas de acumulación de materiales en áreas de poca pendiente (Hernández, 2012). Los vertisoles presentan alto contenido de arcilla, con grietas anchas y profundas en la época de secas, se muestran pegajosos con la humedad, son poco adecuados para la agricultura de temporal, pero aptos para la agricultura de riego y tecnificada. Se encuentran en zonas bajas y de lomeríos; presentan problemas de inundación a consecuencia de su baja permeabilidad, así mismo, se destacan por ser expansivos. Esta característica es evidente al saturarse de agua ya que provocan fuertes presiones de empuje o alzamiento, y al secarse se contraen y agrietan (González y Orozco, 2006).

En menor proporción se encuentran presentes en la región los luvisoles, planosoles, durisoles y leptosoles.

V. ANTECEDENTES

El Cuaternario es el último de los períodos de la escala temporal geológica, que comprende a partir de dos millones de años hasta el presente. Durante este período ocurrieron cambios ambientales significativos, debido a la alternancia rápida de eventos climáticos extremos conocidos como episodios glaciares e interglaciares.

Las fluctuaciones climáticas en dicho período han traído algunas consecuencias como la migración de la flora y fauna hacia latitudes bajas, la extinción de la mega fauna, cambios en el nivel del mar y alteraciones en las corrientes oceánicas. Además de que es en este período cuando acontece el proceso de la evolución del hombre y su dispersión, asentándose en todos los continentes (Caballero y Ortega, 2011).

El período Cuaternario se divide en dos épocas Pleistoceno y Holoceno. El Pleistoceno se encuentra comprendido entre 1.8 millones de años hasta los 11.500 años antes del presente (AP). Abarca la mayor parte de las últimas glaciaciones, hasta el período frío denominado *Younger Dryas* que interrumpió el final de la última glaciación. Durante las glaciaciones grandes extensiones de tierra se cubrieron con una inmensa capa de hielo. En algunos períodos se redujo el tamaño de las capas de hielo y el clima se hizo más cálido. Estos períodos se denominaron interglaciares. Debido a estas condiciones climáticas, los casquetes polares crecieron y los hielos avanzaron hacia la línea del ecuador. El nivel de los mares se redujo y tanto la flora y la fauna se desarrollaron de acuerdo al clima (Broecker, 1989; Lehman y Keigwin, 1992).

El Holoceno es la última y actual época geológica del Cuaternario, que comenzó hace aproximadamente 11.500 años AP. El comienzo estuvo precedido por el *Younger Dryas* que corresponde al período de tiempo comprendido entre 13.500 y 11.500 años AP. Este evento es importante ya que marcó el fin de la transición entre el último período glacial y el interglacial cálido. Durante el *Younger Dryas* el hemisferio norte

mostró un retorno parcial a las condiciones climáticas frías similares a las del último glacial. (Broecker, 1989; Lehman y Keigwin, 1992).

Los estudios paleoclimáticos (variaciones climáticas globales que han ocurrido a lo largo de la historia geológica de un sitio) (Eugster y Hardie, 1978), ya sea en un ambiente acuático o bien terrestre se lleva a cabo a través de diversas técnicas geológicas.

En México destacan los estudios estratigráficos de glaciares (glaciología) (White *et al.*, 1990; Heine, 1994; Vázquez-Selem, 2000; Vázquez-Selem *et al.*, 2004), de sedimentología lacustre (Bradbury, 1989, 2000; Caballero *et al.*, 2001, 2002; Caballero, 2010; Israde *et al.*, 2002, 2005, 2010; Velázquez-Duran, 2003; Lozano-García *et al.*, 2005; Metcalfe *et al.*, 2000; Metcalfe and Davies, 2007; Ortega *et al.*, 2002, 2010; Roy *et al.*, 2009; Torres-Rodríguez, 2010) y marina (Kessler, 2006; Pérez-Cruz, 2006; Tenorio-Peña, 2011), la composición isotópica en fósiles (Ferrusquía-Villafranca *et al.*, 2010), el estudio de la memoria del suelo en edafología (Sedov *et al.*, 2009a), espeleotemas (Harmon *et al.*, 1978; Bernal *et al.*, 2006; Endsley *et al.*, 2007; Pérez-Enriquez *et al.* 2007; Ramírez-Izquierdo *et al.* 2007; Hernández-Mendiola, 2008), de los anillos de los árboles (dendrocronología) (Heinrich *et al.*, 2006), entre otros.

Los estudios llevados a cabo en la región central de México, han sido de interés debido a que existen numerosas cuencas lacustres cerradas que se comportan como cápsulas de tiempo que proporcionan información de la historia biológica y geológica de la Tierra. Estas cuencas destacan por su amplitud y su registro paleoambiental, además, se caracterizan por haberse formado por tectonismo y procesos volcánicos asociados. Resaltan por lo completo de sus registros las Cuencas de: Chalco (Bradbury, 1986; Lozano-García *et al.*, 1993, 1994; Caballero y Ortega, 1998; Ortega *et al.*, 2000), Texcoco (Bradbury, 1971; Lozano-García y Ortega, 1998; Ramírez-Nava, 2002), Zacapu (Metcalfe, 1992, 1995; Ortega *et al.*, 2002), Cuitzeo (Israde, 1997; Israde-Alcántara *et al.*, 2002, 2010) y Pátzcuaro (Bradbury, 2000; Fisher *et al.*, 2003; Israde-Alcántara *et al.*, 2005;

Metcalfé, 2007). A continuación se hace una breve reseña de las aportaciones de estos estudios.

V.1) Investigaciones paleoambientales realizadas en el Centro de México.

En el lago de Texcoco hay varias evidencias analizadas desde la zona litoral hacia la zona central del lago. En Tepexpan, localizado en la orilla NE del lago se determinó que el ambiente lacustre dominante entre los 25,000 y 18,000 años A.P era somero y salobre con la presencia de *Ruppia marítima* (Sedov *et al.*, 2009b). Hacia la zona central del lago de Texcoco las diatomeas indicaron condiciones someras y salobres, con un posible incremento en la salinidad a partir de 28,000 años A.P (Bradbury, 1971, 1989; Ramírez-Nava, 2002). Además, la presencia de taxa de pantano como *Isoëtes* indicó niveles lacustres bajos (Lozano-García y Ortega, 1998; Sandoval-Montaño, 2000). Durante el Último Máximo Glacial (UMG: 22,000-18,000 cal A.P) los registros del centro del lago de Texcoco presentan una mayor diversidad de diatomeas, sugiriendo ambientes someros, pero levemente menos salobres (Ramírez-Nava, 2002); al mismo tiempo hay un aumento de ciperáceas, indicando que la zona pasó a ser un ambiente litoral. Por lo que se infieren que en el UMG las condiciones fueron menos húmedas mediante la disminución del nivel lacustre y el aumento de los elementos herbáceos. Mientras que en las épocas del Glacial Tardío (GTA: 18,000-15,000 cal A.P) y Glacial Terminal (GTE: 15,000-12,000 cal A.P) reflejan eventos de marcada sequía con *hiatus* sedimentarios. La secuencia litoral de Tepexpan muestra la transición de una sedimentación lacustre a una subaérea con la formación de paleosuelos, lo que reflejó la disminución del nivel lacustre antes de los 11,500 años A.P (Sedov *et al.*, 2009b). Sin embargo en la secuencia del centro del lago de Texcoco, la preservación de diatomeas es pobre y existe un *hiatus* sedimentario entre los 17,500 y 7,000 años A.P.

Los estudios realizados en Chalco corresponden a la zona central del lago, donde se detectó una tendencia hacia una reducción en el nivel lacustre con condiciones someras y salobres desde los 31,000 años A.P, mientras que durante el Glacial Temprano (GTM: 25,000-22,000 cal A.P) surge un cambio brusco de condiciones salobres a agua dulce a los 26,500 años A.P que sugieren un incremento en el aporte de agua al lago (Caballero y Ortega, 1998). El lago experimentó un cambio importante a los 22,000 años A.P, con un aumento en las ciperáceas y un conjunto de diatomeas (*Cocconeis* y *Eunotia*) que indicaron una reducción en el nivel lacustre; el ambiente somero fue muy variable y alternó entre condiciones de pantano ácido a neutral (Lozano-García *et al.*, 1993; Lozano-García y Ortega, 1994; Lozano-García, 1996; Sosa-Nájera, 2001). Entre los 16,800 y 15,000 años el lago registró un leve incremento en el nivel lacustre, con la dominancia de diatomeas (pequeñas Fragilariales) que indican condiciones someras de agua dulce. Chalco presenta una capa de diatomita con una tasa de sedimentación baja entre los 15,000 y 14,000 años A.P, cuyas diatomeas sugieren una leve reducción del nivel lacustre con respecto a la etapa del Glacial Tardío (Caballero, 2010).

V.2) Investigaciones paleoambientales de la región Centro-Occidente de México

V.2.1) Lago de Cuitzeo

En el lago de Cuitzeo se extrajo un núcleo de 27 m de longitud, donde se documenta la evolución paleoambiental con base al estudio del contenido de diatomeas. Determinando por la abundancia de la especie *Staurosira spp.* que el centro del lago presentó tendencia a aguas dulces, alcalinas y con cierta profundidad entre los 120,000 a 17,600 años A.P. La presencia de *Stephanodiscus spp.* y *Aulacoseira spp.* como dominantes indicaron dos fases húmedas, la primera 44,000 a 42,000 años A.P y

la segunda entre los 19,000 a 17,000 años A.P. Sin embargo la dominancia de *Cyclotella meneghiniana* evidenció aguas bajas y turbias a los 8,000 años. Cabe mencionar el registro de tres depósitos de ceniza volcánica con edades aproximadas de 25,000, 35,000 y 120,000 años A.P, así como también se observó un *hiatus* entre los 8,000 y 17,000 años, indicando que el lago presentó condiciones fluctuantes con tendencia a bajas y con fases más húmedas en el Pleistoceno que durante el Holoceno (Israde-Alcántara *et al.*, 2002 y 2010).

Mientras que Velázquez-Durán (2003) reporta una intensa actividad volcánica que interrumpió el registro lacustre hacia los 30,000 A.P. Además, determinó que hacia los 24,000 años A.P el lago fue somero levemente salobre y que a los 22,000 años A.P el registro de *Stephanodiscus niagarae* le permitió inferir un evento corto de mayor nivel lacustre. El lago de Cuitzeo entre los 22,000 y 21,000 años A.P fue un lago somero y salobre, observándose en la estratigrafía una sedimentación sumamente baja entre los 21,000 y 10,000 años A.P, infiriéndose un *hiatus* en la secuencia, asociado a ambientes lacustres muy someros indicativos de condiciones secas (Caballero, 2010).

V.2.2) Lago de Pátzcuaro

Watts y Bradbury (1982) obtuvieron una columna estratigráfica de 44,000 años A.P y determinaron nueve episodios volcánicos. Sus resultados sugieren que la actividad agrícola actual alteró las características del lago, resultando en aguas cenagosas y aumento del contenido de material orgánico.

Bradbury *et al.*, (1983) determinaron que el nivel del lago descendió en varias ocasiones en los últimos 5,000 años, disminuyendo bruscamente hace 3,600 años. Por lo que concluyeron que en los últimos 3,000 años se registraron dos períodos de erosión y eutrofización en el lago, posiblemente por la intensa actividad agrícola.

Metcalfe *et al.*, (1994) determinaron condiciones secas, tres fases de erosión a los 3,500, 2,500, y 1,300 años A.P., donde el lago se fue eutrofizando más. O'Hara y Metcalfe (1995) sugieren que el lago fue fluctuante debido a que durante el período inmediato a la Conquista el lago presentó un nivel estable, después de 1620 presentó un descenso en el nivel, alcanzando su punto más bajo en 1750, correspondiente a una sequía severa generalizada en el centro de México, asociada con la pequeña edad de hielo. Entre los 1755 y 1765 se incrementó el nivel del lago y después de 1765 y hasta 1850 disminuyó el nivel por las condiciones de sequía en la región durante esta época.

Sin embargo Bradbury (2000) mediante las diatomeas determinó que durante el GTM el lago era profundo, y turbio por un mayor aporte de sedimentos a la cuenca y que dominaba un patrón de lluvias en invierno con verano cálido; mientras que para el UMG y el GTA determinó un lago profundo y frío; sin embargo para el GTE indicó una disminución en el nivel lacustre y condiciones secas. Pero Fisher *et al.*, (2003), identificaron unidades litoestratificadas con facies emergentes, pantanosas y de aguas profundas.

Metcalfe y Davies, (2007) por la persistencia de *S. oregonicus* interpretaron lluvias en invierno, con una tendencia a ambientes más secos que indican que la lluvia en verano todavía no se activaba totalmente, aunque el lago mantuvo niveles más altos que los actuales.

V.2.3) Lago de Zacapu

Metcalfe *et al.*, (1989) determinó mediante la química de sedimentos y la susceptibilidad magnética que fue un cuerpo de agua somero y químicamente concentrado, con mayor aporte de material alóctono. Posteriormente Metcalfe (1992 y 1995) infirió una tasa de sedimentación muy baja para los períodos GTM y UMG ya que no había evidencias que le permitieran suponer la presencia de un cuerpo de agua

entre 30,000 y 18,500 años A.P; para los períodos GTA y GTE mencionó la existencia de evidencias de actividad volcánica, determinó mediante el registro de diatomeas bajos niveles lacustres, con el decremento de carbono orgánico y la susceptibilidad magnética sugiere condiciones particularmente secas, después de los 16,700 y hasta los 5,500 años A.P.

Nuevamente Metcalfe *et al.*, (1994), determinaron entrada de material alóctono, erosión acelerada e impacto humano; sin embargo el registro de diatomeas fue complejo ya que en el año 2,230 A.P indicaron un lago profundo y frío. El nivel más bajo del lago se registró hace 960 años A.P, ubicado en el período de sequía en el Clásico Tardío o Postclásico Temprano; las diatomeas indicaron eutrofización y los sedimentos aumentaron en la erosión de las pendientes del valle. Concluyeron que el clima en el Holoceno Tardío fue un periodo seco en el Clásico Tardío, entre los 1,100 años A.P.

Arnauld *et al.*, (1997), concluyeron que han predominado condiciones de ciénega y no un lago profundo durante los últimos 8,000 años, con dos episodios marcados de bajo nivel del lago: a 2,800 – 2,400 años A.P y 1,100 años A.P.

Ortega *et al.*, (2002), infirieron condiciones más húmedas de 52,000-39,000 años A.P con un posterior descenso en la humedad; a los 35,000 años A.P la susceptibilidad registra una baja productividad y condiciones más secas, que persistieron en el UMG y el Holoceno Medio, siendo particularmente secas entre 14,000 y 4,800 años A.P. Sugirieron modificaciones en el piso de la cuenca por actividad volcánica o tectónica después de 25,000 años A.P, reflejadas por discontinuidad en la sedimentación y un *hiatus*. Las condiciones someras estuvieron presentes al menos desde 15,000 años A.P. En general, concluyen que en el registro del Pleistoceno Tardío Zacapu sigue la tendencia de los registros de Cuitzeo y Chalco, con condiciones más húmedas y altos niveles del lago antes de 40,000 años y una posterior declinación con condiciones secas persistentes y fluctuantes durante el resto del Pleistoceno y Holoceno, cuando se dan los niveles más bajos. El registro de polen y diatomeas sugieren una sequía para

4,500 años A.P y un retorno a condiciones más húmedas a 2,800 años A.P, comenzando el impacto humano después de 4,000 años A.P.

V.2.4) Lago de Zirahuén

Davies *et al.*, (2004), analizaron dos núcleos que cubren una edad de 950 – 750 años AP, en estos encontraron dos niveles de tefras negras y gruesas, la superior producida por el Parícutin y la inferior por la erupción del Jorullo; una tercera tefra de composición andesítica-dacítica altamente vesicular, probablemente de un estratovolcán. La susceptibilidad magnética indicó dos períodos de erosión, poco después de las tefras, mientras que las diatomeas marcaron condiciones climáticas más secas alrededor de 900 – 700 años A.P, sugiriendo erosión de la cuenca hasta 400 años A.P, con mínimo impacto antropogénico. En los últimos 20 años el lago comenzó a eutrofizarse por la intensificación de la agricultura y turismo. Concluyeron que las condiciones del lago han respondido a la intensificación del uso de suelo, por lo que se ha deteriorado por las inadecuadas prácticas de manejo.

Vázquez *et al.*, (2010), analizaron los últimos 17,000 años A.P basado en el análisis que realizaron en dos núcleos de sedimentos que colectaron en el centro y norte del lago. Donde reconocieron dos tefras pertenecientes de los volcanes Jorullo y Parícutin, y determinaron cuatro etapas de variaciones climáticas (entre los 17,000 a 14,000 años A.P. bajos niveles lacustres; de 14,000 a 8,180 años A.P: aumento en el nivel lacustre y expansión litoral bajo condiciones relativamente estables; de 8,180 a 3,900 años A.P. se observa un ascenso del nivel lacustre; para los últimos 3,900 años obtuvieron el registro de un intenso aporte terrígeno. Cabe mencionar que de los 8,180 y 7,200 años A.P que produjo un evento erosivo que originó un *hiatus* en la secuencia norte y reconocieron además, un periodo de baja erosión entre los 1,400 y 880 años, lo que les permitió sugerir la existencia de las condiciones secas inferidas en otros sitios de Mesoamérica al final del período Clásico.

V.2.5) Lago Santa María del Oro

Sosa-Najera *et al.*, 2010. Identificaron en el registro de Titanio 21 eventos de sequía, destacando seis por su intensidad y/o duración (1365-1384, 1526, 1655-1670, 1818, 1900 y 1930-2000) este resultado indica la existencia de sequías recurrentes en periodicidades de 25, 39, 50, 70 y 117 años y las asocian a la actividad solar y/o a factores climáticos como El Niño. Se identificaron eventos mayores de sequía (1448-1435, 1485-1474, 1605-1601, 1673-1655 y 1770-1773) que se correlacionan con el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el sur durante el verano, mientras que otros años secos (1818, 1832, 1866, 1900, 1939-1929 y 1958-2000) se correlacionan con un índice positivo de El Niño. Además, obtuvieron registros de otros eventos de sequía donde se combinan el índice positivo del El Niño con la posición meridional de la ZCIT (1386-1354, 1536-1510, 1579-1585 y 1780-1808).

VI. METODOLOGÍA

El método de investigación, se integró en tres fases importantes:

1) Trabajo de campo: consistió en la perforación del depocentro de la cuenca con la finalidad de obtener un núcleo continuo de 21.48 m de profundidad, para generar una estratigrafía y sucesivamente muestrearlo a cada 10 cm aproximadamente o cuando se observaran cambios en la sedimentación.

2) Trabajo de laboratorio: se describió la estratigrafía detallada, paralelamente al muestreo y fotografiado de los tramos que conforman el núcleo. Se determinó el contenido de carbono orgánico e inorgánico, se realizó el análisis de Susceptibilidad Magnética, Espectrometría de Masas (ICPMS), Difracción de Rayos X (DRX), análisis granulométrico y por último la taxonomía e identificación de diatomeas.

3) Trabajo de gabinete, consistió en analizar e interpretar los resultados obtenidos por las técnicas ya antes mencionadas, con la finalidad de reconstruir los paleoambientes del Valle de los Espejos a lo largo del Pleistoceno tardío-Holoceno.

VI.1) Trabajo de Campo (Obtención del núcleo)

En junio del 2011 se perforó el depocentro del Valle de los Espejos en las coordenadas geográficas (19° 56'17.42" N y 99°52'46.90" O), donde se obtuvo el núcleo ACA I-11 de una longitud de 21.48 m. La finalidad de extraer este núcleo largo del centro del paleo-lago recae en el hecho de que es posible inferir de manera más acertada los eventos sucedidos en el interior del lago al presentar menor interferencia en la sedimentación por procesos alóctonos en el depocentro del lago, lo que permite obtener un registro sedimentario continuo.

El equipo de perforación es un muestreador de suelos marca Hacker Long Year, donde su funcionamiento se basa en la inserción de tubos de aluminio (tramos) en el subsuelo a partir de la aplicación de una presión neumática que evita el rotar la muestra, permitiendo la recuperación intacta del material a intervalos de 70 cm a 1 m. En la bitácora de la perforación fueron registrados los tramos del núcleo y sus litologías observables en los extremos; estos fueron sucesivamente etiquetados con el nombre del núcleo, número de tramo, profundidad, cima (C) y base (B) en dirección a la profundidad. Posteriormente los tramos fueron cortados en sentido longitudinal para pasarlos a tubos de PVC y proceder a la descripción estratigráfica y el muestreo para distintos análisis mencionados anteriormente. Finalizando con la conservación de los tramos que conforman al núcleo ACA I-11, envueltos con un plástico y refrigerados, quedando como testigos de esta investigación y para futuros estudios.

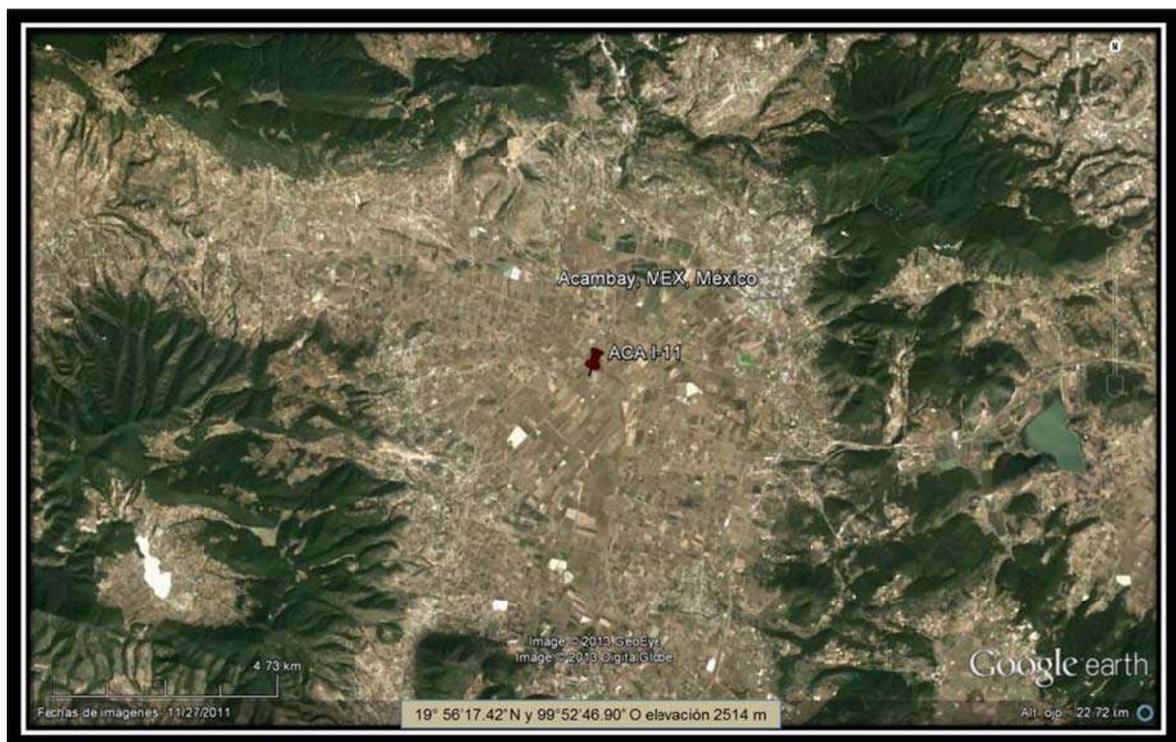


Figura 5.- Imagen satelital del Valle de los Espejos, donde se indica el punto de extracción del núcleo ACA I-11.



Figura 6.- Fotografías de la perforación realizada en el Valle de los Espejos.



Figura 7.- Fotografías que muestran los tramos que conforman al núcleo ACA I-11.

VI.2) Trabajo de Laboratorio

VI.2.1) Estratigrafía y muestreo del núcleo ACA I-11

VI.2.1.1) Estratigrafía

La descripción de la columna sedimentaria, se realizó considerando las características texturales, sedimentológicas y su composición. Para lo cual fue fundamental observar la distribución de cenizas volcánicas, nódulos, así como también el tipo de estratificación (capas, láminas), y estructuras secundarias tales como turbiditas, estructuras ligadas a paleosismos, inclusiones, etc. Cabe mencionar que se tomó en cuenta el color de los sedimentos con base al código de la Tabla Munsell 2000.



Figura 8.-Descripción estratigráfica del núcleo en el laboratorio de cuencas lacustres del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (IIM).

VI.2.1.2) Muestreo

El muestreo se realizó a cada 10 cm aproximadamente o cuando se observaban cambios en la sedimentación, obteniendo un total de 160 muestras (Tabla 1) y a las cuales se le realizaron análisis de: contenido de carbono orgánico e inorgánico, susceptibilidad magnética, espectrometría de masas e identificación de diatomeas. Para el análisis de granulometría solo se procesaron 42 muestras representativas de todo el núcleo y en el análisis de difracción de rayos x solo se procesaron 7 muestras, debido a sus altos valores en CIT, Ca y Mg.



Figura 9.-Imagen de la apertura de los tramos y posterior muestreo y descripción.

Zona	Tr.	Prof. (m)	Zona	Tr.	Prof. (m)	Zona	Tr.	Prof. (m)	Zona	Tr.	Prof. (m)
7	1	0	5	11	4.8	4	20	10.23	3	30	15.32
		0.13			4.94			10.37			15.46
		0.26			5.08			10.51			15.6
	0.40	5.22			10.57			15.7			
	0.54	5.34			10.64			15.88			
	0.68	5.48			10.69			16.02			
	2	0.80	5.62	12	5.74	21	10.82	31	16.4		
		0.94	5.88		10.95		16.54				
		1.08	6.00		11.09		16.68				
	3	1.18	6.14	13	6.14	22	11.23	33	16.81		
		1.32	6.28		11.37		16.95				
		1.46	6.42		11.51		17.09				
	4	4	1.63	14	6.42	3	23	11.77	2	34	17.22
			1.77		6.57			11.91			17.36
			1.91		6.71			12.05			17.54
2.03		6.85	12.17	17.68							
2.17		6.99	12.31	17.82							
2.31		7.13	12.45	17.96							
5	5	2.45	15	7.27	4	24	12.58	35	35	18.1	
		2.58		7.41			12.72			18.24	
		2.68		7.55			12.88			18.38	
	2.78	7.69	13.02	18.52							
	2.88	7.85	13.16	18.66							
	2.98	7.99	13.3	18.8							
6	6	3.08	16	8.13	3	25	13.44	36	36	18.94	
		3.18		8.3			13.58			19.13	
		3.28		8.44			13.72			19.27	
	3.42	8.58	13.86	19.41							
	3.56	8.72	14.00	19.55							
	3.7	8.86	14.14	19.69							
7	7	3.85	17	9.00	4	26	14.28	37	37	19.83	
		4.00		9.14			14.42			19.97	
		4.1		9.28			14.56			20.11	
	4.2	9.42	14.7	20.25							
	4.29	9.56	14.84	20.35							
	4.39	9.7	14.98	20.49							
8	8	4.49	18	9.84	3	27	15.12	38	38	20.63	
		4.59		9.98			15.26			20.77	
		4.68		10.12			15.4			20.91	
	4.82	10.26	15.54	21.05							
	4.96	10.4	15.68	21.19							
	5.1	10.54	15.82	21.33							

Tabla 1.- Contiene las 160 muestras obtenidas del núcleo ACA I-11, indicando el tramo (Tr.) y su respectiva zona a la que pertenece, así como también la profundidad a la que corresponde.

VI.2.2) Análisis de contenido de carbono orgánico e inorgánico (COT-CIT)

Esta técnica permite obtener el contenido de carbono en los sedimentos para poder identificar fases secas (alto contenido en CIT) y fases húmedas (alto contenido en COT) en cuencas lacustres.

El análisis se realizó mediante el uso de un “Coulómetro” modelo 5014 de la marca UIC (Fig. 10). El principio de su funcionamiento se basa en la titulación de una solución en donde se ha absorbido CO₂ como producto de la calcinación del material analizado, o por la descomposición de los carbonatos de la muestra al ser atacados con un ácido (Donald, 1974). Cabe mencionar que esta es una técnica destructiva debido a que no es recuperable la muestra para reutilizarla en otro análisis.



Figura 10.- Coulómetro (Marca: UIC, Modelo 5014).

VI.2.2.1) Determinación del porcentaje de Carbono Total (CT)

El contenido de Carbono Total corresponde a la sumatoria del carbono inorgánico y orgánico contenido en las muestras.

Se da inicio al procedimiento con la calibración del coulómetro, que consiste en encender el horno sin muestra para que el equipo determine la cantidad de carbono en el aire, posteriormente se pesan 0.020 gr de la muestra estándar (CaCO₃, carbonato de

calcio) por duplicado, colocando uno por uno los estándares dentro del horno a 900°C hasta su total calcinación y lectura final del porcentaje de Carbono Total. El resultado debe de comprender entre el 12 y 14 % para que puedan procesarse las muestras a analizar en el coulómetro (Razo, 2007).

Una vez calibrado el equipo, se esterilizan las charolas de cerámica a través de un calentamiento a temperaturas mayores a 900 °C para eliminar cualquier impureza orgánica, ya que en las charolas de cerámica se colocarán una a una las muestras de sedimentos que previamente se han secado, molido y homogenizado para una corrida de sedimentos continuos de una columna estratigráfica. Se deben de pesar 0.020 gr de muestra y colocarla en la charola de cerámica para que sea procesada en el coulómetro hasta que arroje el resultado final que es registrado por una impresora conectada a la computadora central del equipo.

VI.2.2.2) Determinación del porcentaje de Carbono Inorgánico (CIT)

El análisis se realiza a través del Módulo de Acidificación (Marca: UIC, Modelo CM5130) y consta de un tubo con Hidróxido de Potasio (KOH), otro con Nitrato de Plata (AgNO₃), un inyector de Ácido Perclórico y un tubo que contiene la muestra diluida en agua y a la que se le agregará el ácido. Este aparato está conectado a la computadora central del coulómetro y a la impresora. Para calibrar el módulo se procede de manera similar que para determinar el nivel de Carbono Total; primero se procesa un blanco (un tubo solo con agua y ácido) y posteriormente los dos estándares de carbonato de calcio (0.020g) (Razo, 2007). Se pesan 0.020 gr de sedimentos en una balanza analítica, previamente secados, molidos y homogenizados, que se colocaron en el tubo con agua destilada (aprox. 5 ml).

VI.2.2.3) Determinación del porcentaje de Carbono Orgánico (COT)

Se obtuvo mediante la diferencia entre el porcentaje del Carbono total y el resultado del porcentaje de Carbono Inorgánico para cada muestra.

$$\text{COT} = \text{CT} - \text{CIT}$$

VI.2.3) Análisis de Susceptibilidad Magnética

Los análisis de magnetismo de rocas establecen la caracterización de los componentes magnéticos de los sedimentos en términos de la mineralogía, la distribución de tamaño de partícula y la abundancia de las mismas. La medición de las propiedades magnéticas de los sedimentos proporciona datos importantes acerca de la sedimentación actual, así como de posibles cambios en las condiciones paleoclimáticas y paleoambientales durante los últimos cientos de miles de años (Rey *et al.*, 2000).

Estas técnicas, propias del magnetismo ambiental y del paleomagnetismo, se basan en la medición de la susceptibilidad magnética y de otros parámetros asociados, a través de los que se determina su remanencia y el tipo de respuesta de los minerales cuando se exponen a un campo magnético. La utilidad de este tipo de medidas reside en que son rápidas y aportan información acerca de la composición, concentración y tamaño de grano de los minerales magnéticos presentes en el sedimento (Thompson y Oldfield, 1986; Verosub y Roberts, 1995; Dekkers, 1997; Maher, 1999). Además de que la medición de la susceptibilidad magnética es simple y puede realizarse sobre todos los materiales. Es ideal en estudios de reconocimiento donde se necesita un conjunto numeroso de muestras, para encontrar muestras “típicas” o “promedio”, ya que es una medición rápida, segura y no destructiva que puede efectuarse en laboratorio o en campo; puede complementarse con otras técnicas ambientales como: análisis químicos, radioisótopos, microfósiles y propiedades de remanencia magnética (Butler, 1998; Chaparro *et al.*, 2003; Tauxe, 2005).

La susceptibilidad magnética es la medida del grado de magnetización de un material, es decir, la facilidad para magnetizarse. Teniendo en cuenta que los materiales ambientales son una mezcla de minerales, la *susceptibilidad magnética de un material ambiental* es la suma de todas las susceptibilidades de los minerales ferrimagnéticos, antiferromagnéticos y paramagnéticos, así como de los componentes diamagnéticos presentes (Butler, 1998; Chaparro *et al.* 2003; Tauxe, 2005). Lo anterior permite hacer consideraciones con estos datos que constituyen un elemento útil en estudios paleoambientales, ya que facilitan establecer correlaciones entre secuencias sedimentarias provenientes de una misma cuenca, esto permite determinar el origen de los minerales magnéticos del sedimento y establecer así su procedencia. Además proporciona una buena base para correlacionar y comparar testigos extraídos en sondeos, fecharlos, y en numerosas ocasiones, reconstruir la evolución de los cambios climáticos. Además es posible determinar en ocasiones en núcleos largos la relación que se observa entre las variaciones paleoclimáticas y la ciclicidad de los cambios magnetomineralógicos (Chan *et al.*, 1998; Rey *et al.*, 2000).

Cabe mencionar que los valores de la susceptibilidad magnética son altos y positivos para los materiales ferromagnéticos (Fe puro, Ni, Cr) y ferrimagnéticos (magnetita, maghemita, pirrotita, greigita). Los minerales antiferromagnéticos (hematita, goethita) registran valores medios y positivos, mientras que los minerales paramagnéticos presentan valores bajos, también positivos. Los materiales diamagnéticos (materia orgánica, plásticos, cuarzo, feldespatos, calcita) dan valores bajos y negativos (Butler, 1998; Chaparro *et al.* 2003; Tauxe, 2005).

En general, se sabe que cambios en la susceptibilidad de los sedimentos lacustres están correlacionados positivamente con variaciones en la cantidad de material alóctono presente en las muestras (Thompson *et al.* 1975, Barendregt, 1984; Ortega *et al.*, 2000 en Rodríguez, 2002). Así mismo, debido a que gran parte de la fracción magnética presente en sedimentos lacustres ha sido transportada por corrientes que drenan la cuenca, el tipo y la cantidad de minerales magnéticos

presentes en una muestra pueden variar y están relacionados con los procesos de intemperismo y erosión en la región (Rodríguez, 2002).

Para procesar las muestras de sedimentos se secan al aire libre, sin exposición a corrientes fuertes de aire, ni a la luz del sol. Posteriormente, se toman muestras discretas en cubos de plástico de 11 cm³ adecuados para mediciones magnéticas. En el caso de las mediciones de susceptibilidad de baja frecuencia (χ_{lf}) se utiliza un susceptibilómetro Kappabridge AGICO MFK1-B.

El modelo MFK1-B mide la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (AMS) de una muestra estática. La susceptibilidad se mide en 15 posiciones diferentes utilizando un soporte especial con posiciones de las muestras que corresponden con el diseño de medición rotativo. Las posiciones se cambian manualmente y, mediante un software especial, el tensor de susceptibilidad se calcula teniendo en cuenta los errores estadísticos en su determinación.

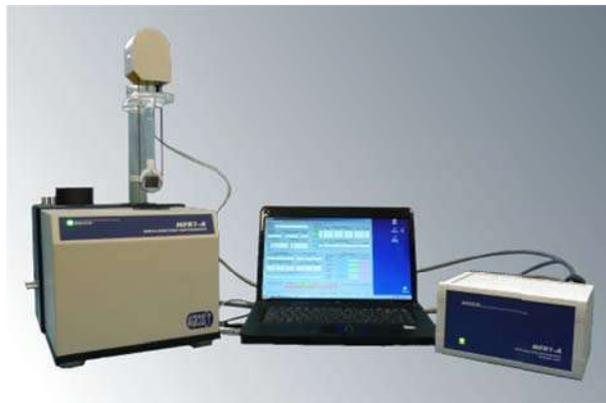


Figura 11.- Susceptibilómetro Kappabridge AGICO MFK1-B.

VI.2.4) Análisis de Espectrometría de Masas (ICPMS)

Con esta técnica se determinó la química elemental de los sedimentos con la finalidad de obtener el contenido en porcentaje o partes por millón de elementos básicos para la interpretación paleoambiental tales como Fe, Ti, Al, K, Ca, Mg, Sr, Ba, entre otros y para poder determinar la procedencia de minerales que componen el sedimento de la cuenca. Este estudio se complementa con la correlación de los “proxies” de susceptibilidad y CIT-COT que integrados permiten determinar si el material depositado en la cuenca es alogénico o autigénico.

La técnica empleada necesita de muestras en estado líquido, por lo tanto, hay que secar, pesar y preparar la muestra para digerirla con ácidos (ácido nítrico, clorhídrico, fluorhídrico y perclórico, y en algunos casos peróxido de hidrogeno). Una vez digerida la muestra hay que diluirla con agua desionizada, tridestilada y ácido nítrico al 2 %.

El principio del funcionamiento del equipo consiste en colocar la muestra líquida en el nebulizador en donde se forma un spray que se mezcla con el gas Argón para ingresar al plasma con una temperatura 3500 °K aprox., donde se ionizan la solución, posteriormente entran a una cámara de alto vacío donde se encuentran bobinas de radio frecuencia que seleccionan de acuerdo a la masa atómica el elemento a analizar. Este equipo tiene sensibilidad de detección mínima de ppb (partes por billón) y máxima de ppm (partes por millón). Cabe destacar que esta técnica es cuantitativa y destructiva.

VI.2.5) Análisis de Difracción de Rayos X (DRX)

El análisis de DRX se realizó con la finalidad de obtener las fases minerales presentes en los sedimentos, debido a que el análisis permite detectar los estados cristalinos y amorfos, así como los límites de una serie de estados intermedios en los cuales puede encontrarse un sólido y conocer la composición mineralógica de los sedimentos lacustres.

El uso de esta técnica nos permite identificar la presencia de fases minerales características de materiales depositados en la cuenca, provenientes de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que son arrastrados y sucesivamente lixiviados en la cuenca, por lo que está compuesta de material autigénico o alogénico.

En base a las anomalías de los valores altos en los porcentajes de Ca, Mg y CIT, aunado a las características homogéneas del depósito y texturales a lo largo del núcleo se decidió tomar siete muestras para realizar el análisis DRX. El objetivo del uso de esta técnica es para definir la predominancia de las fases minerales de calcita y/o magnesita en la determinación de la procedencia.

El principio de esta técnica consiste en la excitación de los electrones más cercanos al núcleo del átomo, lo que produce a los rayos X. El método se basa en el bombardeo de electrones a un átomo. La aplicación de este análisis en la determinación estructural se basa: 1) en el sistema cristalino característico del material, la composición química y la relación atómica, 2) en la determinación de las intensidades de los picos característicos del material y 3) en la Ley de Bragg, la cual explica el fenómeno de interferencia destructiva y constructiva de los rayos difractados en cristales, lo que provoca la aparición de haces de rayos X difractados en ciertos ángulos dependiendo de la longitud de onda, así como para una estructura cristalina determinada (Razo, 2007).

Los análisis de DRX se realizaron por medio de un difractómetro de la marca Siemens modelo D₅₀₀₀ con una sensibilidad de hasta un 5% en peso. Las condiciones a las que fueron corridos los análisis son las siguientes: voltaje de 30 KV, corriente de 20 mAmperes e intervalo de 2θ ángulo de 3-70°. Esta técnica es cuantitativa en la determinación de fases cristalinas de un mismo compuesto o especie mineral, pero en este caso se ha realizado para sedimentos lacustres, por lo que se considera como cualitativa para corroborar la presencia de fases minerales.

Las muestras se prepararon mediante la molienda en un mortero de ágata, hasta obtener una muestra homogénea fina. Se utilizó un porta muestras de vidrio del tipo cilíndrico. Una vez obtenidos los difractogramas se les eliminó la interferencia debida al porta muestras, así como el ruido de fondo producido por el equipo. Finalmente, se compararon los difractogramas con una base de datos para obtener las posibles especies minerales y estructuras que constituyen la muestra.



Figura 12.- Equipo de Difracción de Rayos X (SIEMENS D5000).

VI.2.6) Análisis Granulométrico

Este análisis es utilizado en los sedimentos lacustres como indicador de energía y madurez textural. Mediante esto es posible representar el ingreso de material al cuerpo de agua, ya sea por efectos de una transgresión o regresión, así como permiten caracterizar el aporte de materiales a través de drenajes fluviales y por ende es posible evidenciar la paleogeografía de los lagos.

Para el análisis se utilizó un equipo Coulter LS-100 Q con un rango de medición en partículas de 0.4 a 900 μm y un principio de funcionamiento basado en la dispersión de un haz láser al impactar con las partículas de la muestra que se encuentran suspendidas en el aire. La intensidad y ángulo de dispersión del haz son obtenidos por medio de detectores colocados en arreglo parabólico y con los cuales se resuelven algoritmos que proporcionan la distribución en porcentaje de volumen (Razo, 2007), mientras que para las texturas la clasificación fue tomada de las normas ASTM D421-58 y D422-63 para la clasificación de suelos (Hernández-Olivares, 2012).



Figura 13.- Equipo de análisis granulométrico (Coulter LS-100 Q).

TEXTURAS	MALLAS (ASTM)	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
Grava	-#4	4.75 mm	75 mm
Arenas	+#4 a -	75 μ m	4.75 mm
gruesas	+#4 a -#10	2 mm	4.75 mm
mediana	+#10 a -	425 μ m	2 mm
finas	+#40 a -	75 μ m	425 μ m
Limo		5 μ m	75 μ mm
Arcilla		1 μ m	5 μ m
Coloide		< 1 μ m	1 μ m

Tabla 2.- Clasificación de la textura de los suelos de acuerdo a los diferentes tamaños de partícula.

VI.2.7) Análisis de Diatomeas

La evidencia microfósil se refiere a aquellos organismos de la biota que sólo pueden ser identificados por medio de un microscopio. Generalmente tienen una talla menor a 1mm, en los cuales se incluyen el polen, diatomeas, otras algas, esporas de hongos, minerales, ostrácodos, entre otros. En este caso nos ocuparemos de las diatomeas.

Las diatomeas son organismos microscópicos, unicelulares y en ocasiones forman colonias, pueden flotar libremente (plantónicas) o estar adheridas en alguna superficie (bentónicas). Se caracterizan por tener una frústula compuesta por dos valvas y una banda que cubre la unión de estas. La frústula está compuesta por sílice amorfa hidratada que tiene la fórmula general $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ y es llamado ópalo biogénico (Round, 1981; Schelske *et al.*, 1986; Reyes-Salas, 1990).

Las diatomeas se desarrollan en ambientes marinos y lacustres. En los primeros ellas han alcanzado grandes desarrollos sobre todo en el Mioceno Medio dando lugar ahora a su explotación para usos industriales entre los que destacan los pulidores de metales, la fabricación de papel, pintura y plásticos. En la medicina forense, como

producto para cosméticos, en la alimentación, como purificadores de agua para beber, para la refinación de azúcar y bebidas embotelladas, así como aislantes térmicos.

En la actualidad son usadas para reconstruir la historia y pre-historia de los cambios de uso de la tierra (Renberg *et al.*, 1993 en Lowe y Walker, 1998). Además de las reconstrucciones ambientales.

VI.2.7.1) Limpieza de muestra

Siguiendo el criterio de Gasse, 1980 para la separación de las diatomeas de los sedimentos, se llevó a cabo la fase de secado, pesado, digestión y neutralización del ph. Hasta la fecha este es el método que mejores resultados ha dado para la limpieza de estos organismos y al mismo tiempo que se evita la fragmentación de las valvas. Los materiales de acompañamiento que se eliminaron al realizar la limpieza, son principalmente carbonatos y materia orgánica. No se debe omitir ninguno de los siguientes pasos.

Eliminación de materia orgánica y de carbonatos:

* Se realiza a través de la oxidación de la materia orgánica con el objeto de eliminar las impurezas de origen orgánico que impiden la observación de las frústulas, en este tipo de limpieza se utiliza la solución de peróxido de hidrógeno (H₂O₂), diluido al 30% en volumen. Con este propósito se pesaron 0.5 gr de muestra seca en una balanza analítica de tipo (OHAUS) de precisión estándar.

* La muestra pesada se colocó una a una en un vaso de precipitados de 150 ml etiquetado con los datos correspondientes (tramo y profundidad) y se le agregaron 50 ml de peróxido.

* Se colocaron los vasos en una parrilla eléctrica, bajo la campana de extracción a una temperatura que varía entre 70 y 100° C, durante aproximadamente 8 hrs o bien, hasta que dejó de efervescer la muestra ya que el tiempo de oxidación depende de la cantidad de materia orgánica que contenga. Se debe tener cuidado de que la solución en ningún momento llegue al punto de ebullición puesto que las frústulas de diatomeas son susceptibles a fracturarse.

* Posteriormente se procede a realizar la eliminación de carbonatos, agregando 10 ml de ácido clorhídrico (HCl) al 37% en volumen. Se vuelve a calentar la muestra para la eliminación completa de los carbonatos, evitando a que se llegue a sequedad para que no se fracturen las frústulas.

* La muestra se retiró de la parrilla y se esperó a que esta enfriara para colocarla en un vial y adicionarle agua destilada hasta 45 ml.

*Posteriormente se hicieron cambios consecutivos de agua destilada hasta homogeneizar a un pH neutro, aproximadamente un total de cinco lavados.

VI.2.7.2) Montaje de muestras

En el momento en que la muestra llegó a un pH neutro en el vial esta se vertió el vial en un vaso de precipitado de 300 ml, aforando la muestra a 250 ml de agua destilada (sí la densidad valvar que la muestra presenta es muy baja, la muestra se afora a un menor volumen, pero esto debe ser debidamente registrado en la libreta de laboratorio, donde se anotan los pormenores del trabajo).

* Para poder observar las valvas al microscopio, se homogeneizaron la muestra en el vaso (esto se realizó con un agitador, el cual debe ser enjuagado con agua destilada entre cada agitación de las muestras). La gota se tomó preferentemente de la mitad del vaso de

precipitados y esto se hizo cuando el sedimento estuvo bien mezclado, dentro del vaso, ya que ahí es donde se concentran la mayoría de las valvas.

* Se extrajo un volumen de 200 microlitros con una micropipeta, inyectando el contenido sobre un cubreobjetos nuevo. El cubreobjetos fue previamente colocado sobre una superficie plana y perfectamente nivelada (para evitar la concentración de las valvas en el centro o en uno de los lados del cubreobjetos). Es importante cuidar que éste no se encuentre en corrientes de aire, que lo pudieran contaminar, para ello se introducen las muestras en un desecador.

* La gota se dejó secar, por lo menos un día entero para proceder al montaje.

* Con los portaobjetos previamente etiquetados se fijó la muestra al portaobjetos, se le colocó una gota de resina (Nafrax), para posteriormente colocarlos en la parrilla a calentamiento con una temperatura menor a los 100° C hasta la aparición de la primera efervescencia de la resina.

* El cubreobjetos con la muestra ya seca, es colocado sobre el portaobjetos rápidamente y se da un instante para permitir que la resina derretida ocupe toda el área del cubreobjetos.

* Al realizar el paso anterior se debe aplicar una pequeña presión sobre el cubreobjetos, sin llegar a romper el cubreobjetos, para eliminar las burbujas que se forman al montar la muestra (este paso se debe hacer muy rápido y fuera de la parrilla, ya que la resina se solidifica en poco tiempo).

VI.2.7.3) Identificación de Diatomeas

Para la identificación de las especies de diatomeas se utilizó un microscopio óptico Olympus Bmax 50, con un ocular de 100 x (graduado en micras, para así obtener la medida exacta de las valvas observadas y proceder a su identificación a partir de la

comparación de los catálogos de especies del laboratorio de cuencas lacustres). Se adicionó una gota de aceite de inmersión para lograr una observación más definida de las estructuras características que definen una especie con el objetivo de 100X para alcanzar una magnificación de 1000X.

La identificación de las especies se llevó a cabo bajo los criterios de Gasse, (1980, 1986), Krammer y Lange-Bertalot (1988, 1997a, 1997b, 2004a y 2004b), Ehrlich (1995), entre otros.

Las algas se fotografiaron, para llevar un registro de las imágenes más sobresalientes en cada muestra.

El inventario taxonómico nos permite conocer cada uno de los distintos géneros y especies que están presentes en las muestras del sedimento, ya que una buena caracterización es determinante para conocer los conjuntos de diatomeas que a su vez definen las condiciones físico-químicas del medio donde estos organismos se depositaron.

El procedimiento consistió en realizar una observación preliminar de todas las muestras, para identificar y registrar las especies. Se llevó una relación de las dominancias relativas de especie por muestra, que permitieron definir las fluctuaciones del nivel lacustre.

VI.3) Trabajo de Gabinete

A partir del trabajo de campo se realizó una columna estratigráfica detallada y sucesivamente se procedió a la digitalización de tablas y gráficos a partir de los análisis geoquímicos realizados ya antes mencionados, mediante los programas de Excel, CorelDRAW X4 y Grapher 7.

VII. RESULTADOS

VII.1) Estratigrafía

La columna sedimentaria ACA I-11 que integra el núcleo tuvo una longitud de 21.48 m al momento de recuperarse. Está caracterizada por el dominio de facies arcillosas, limosas, y limo-arenosas, que se intercalan con niveles de arenas, limo-arcilloso, arcilla-limosa, arena-limosa, turba y cenizas volcánicas. Los estratos son masivos en general y existe la presencia de cuatro niveles de material retrabajado a las profundidades de 20.80-21.0 m, 20.31-20.51 m, 10.20-10.33 m y 3.25-3.36 m. Los cuatro niveles de material volcánicos resaltan en las profundidades 10.60, 10.50, 8.70 y 8.90 metros, además de presentar dos niveles muy marcados de material turboso a los 3.85 y 1.14 m de profundidad. La tendencia del color es principalmente en la base y cima más oscuro y en el centro que es más claro en coincidencia con altos niveles de carbono orgánico en base y cima (Fig. 14).

Con base a las diferencias texturales a lo largo del núcleo y los cambios de color fue dividido para su estudio inicial en siete grandes zonas para su descripción detallada en base a los cambios litológicos, se hace referencia a los tramos que la componen para su futura localización.

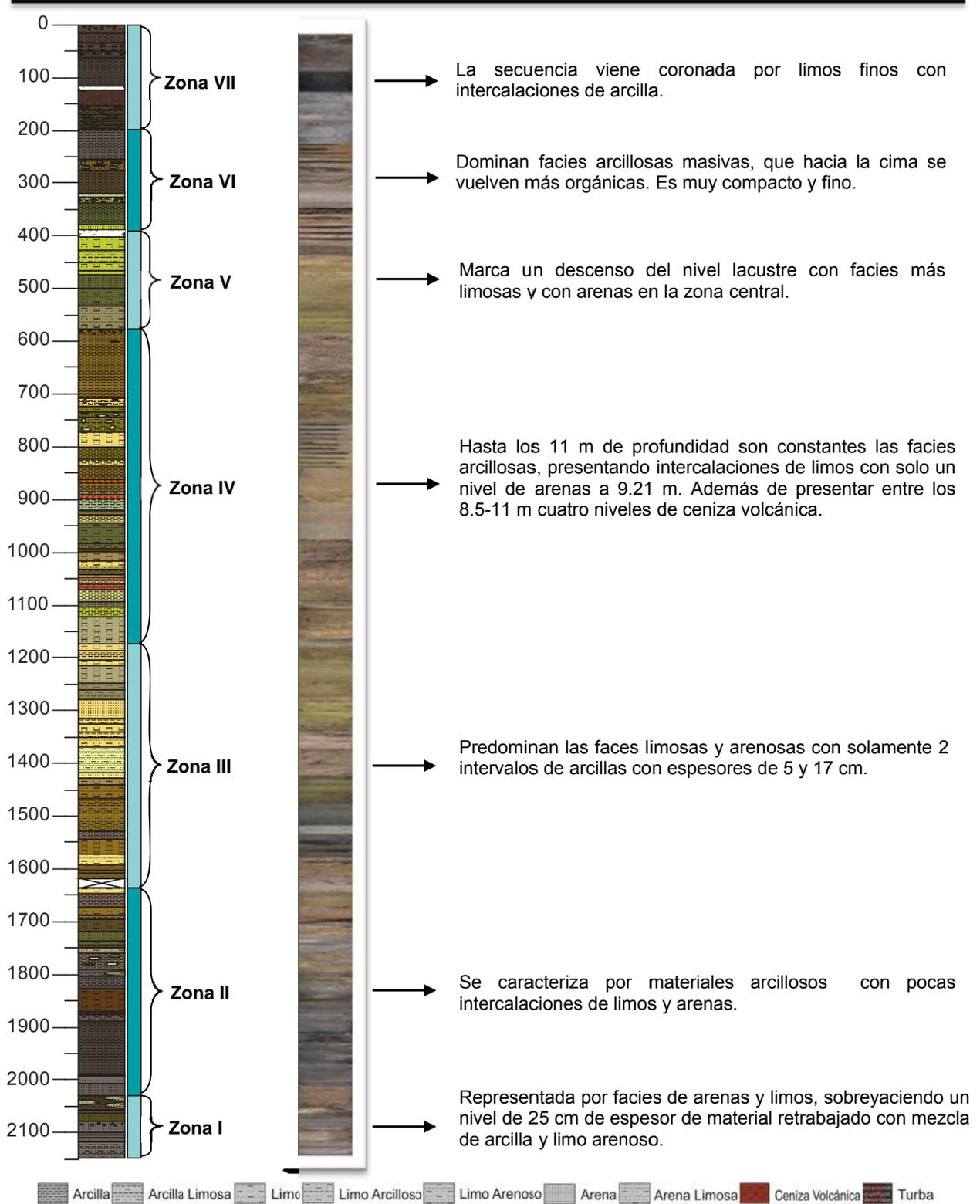


Figura 14.-Estratigrafía del núcleo ACA I-11 extraído del depocentro del Valle de los Espejos. Los colores de la simbología no presentan una relación con los colores de la columna estratigráfica debido a que estos fueron determinados con base al código de la Tabla Munsell 2000.

Zona 1 (21.48 a los 20.31 m): Comprende los tramos (Tr) 40 y 41, lo que corresponde a la base del núcleo ACA I-11 y fue subdividida por dos paquetes en base a sus características texturales.

El paquete A está conformado por: una arcilla limosa compacta con un espesor de 34 cm; en contacto transicional se aprecia intercalaciones de arenas y limos de un espesor de 14 cm; sobreyaciendo en contacto discordante paralelo no erosional, se aprecia una arena fina de 20 cm de espesor, que presenta en la parte superior manchones grises y clastos muy negros de 5 mm (posibles clastos de carbón), brindando una apariencia de material reabajado. En este paquete destaca un color homogéneo con clave 2.5 Y/5/1, además de haber presentado alta efervescencia en la prueba de ácido clorhídrico (HCl).

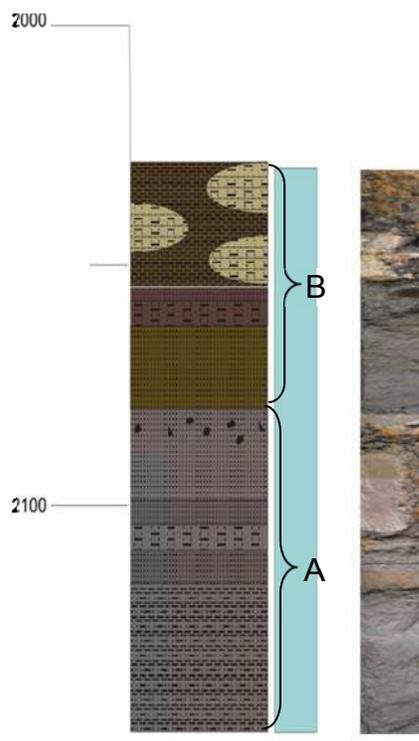


Figura 15.- Estratigrafía de la Zona 1, compuesta por arcilla limosa, arenas, limos, arcillas, limo arenoso y material reabajado.

El paquete B está en contacto discordante paralelo erosional con el paquete A y es conformado por: una arena fina homogénea (posible material volcánico) con un espesor de 19 cm y un color 2.5 Y/4/3; le sobreyace en contacto concordante intercalaciones de arena homogénea masiva con un limo fino oscuro, esta parte presenta un espesor de 5 cm de color 7.5 YR/3/1; culminando el paquete B con 25 cm de espesor de un material muy reabajado con mezcla de arcilla plástica oscura y limo arenoso de color más claro, todo este paquete presentó alta efervescencia con el HCl.

Zona 2 (20.31 a los 16.38 m): Esta zona abarca del tramo (Tr) 39 al 33 y fue subdividida por siete paquetes en base a sus características texturales.

El paquete A consta de 25 cm de arena fina homogénea (posible material volcánico) de color verdoso 7.5 YR/4/1 con alta efervescencia al contacto con el HCl; sobreyaciendo se aprecia en contacto transicional una arena mediana homogénea de color 10 YR/5/1 con 11 cm de espesor, además de haber tenido una fuerte reacción con el HCl. Finalizando en contacto concordante con 1 cm de material arcilloso.

Al paquete B en contacto transicional con el paquete A, lo conforma 85 cm de arcilla plástica no muy compacta y algo porosa (bofa) de color 10 YR/2/1, que presentó alta reacción con el HCl y mediana efervescencia con el peróxido (H_2O_2) y 22 cm correspondientes a una arcilla plástica estratificada y algo porosa de color 7.5 YR/2.5/1, que reacciono al contacto con la prueba de HCl y H_2O_2 .

El paquete C en contacto concordante con el paquete B, presenta un limo arcilloso estratificado con 12 cm de espesor, de color 7.5 YR/4/2, que reaccionó con el HCl; sobreyaciendo aparecen 4 cm de arcilla plástica porosa y estratificada de color 7.5 YR/2.5/1, con efervescencia al contacto con el HCl y en la cima del paquete se distinguen 43 cm de limo estratificado de color 7.5 YR/4/2 con efervescencia homogénea al contacto con el HCl y poca efervescencia con el H_2O_2 . Todo este paquete presentó pequeños estratos finos de color claro de calcita, además de poco vetilleo vertical del mismo mineral.

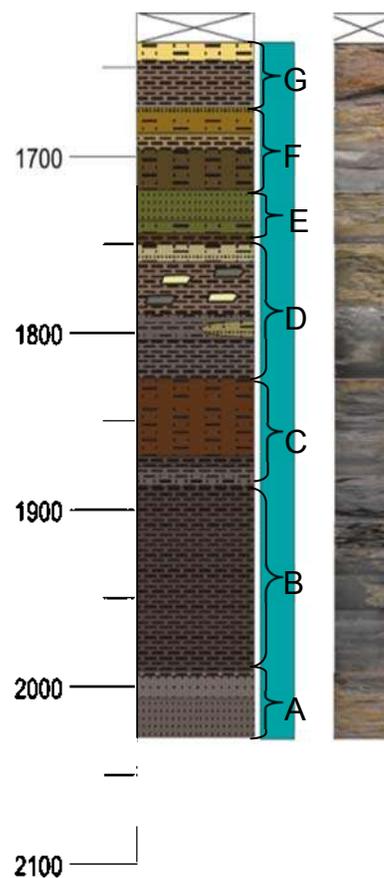


Figura 16.- Estratigrafía de la Zona 2, compuesta por arenas, arcillas, limo arcilloso, limo, arcilla limosa y limo arenoso.

El paquete D está conformado en su base por 25 cm de arcilla compacta y porosa, de color 7.5 YR/4/1 y efervescente con el HCl; después pasa a un arcilla limosa de color 7.5 YR/4/1 con un espesor de 14 cm, la cual está conformada por manchones de limo arenoso poco compacto de color 2.5 Y/7/2 que efervesció con el H₂O₂; hacia la cima le siguen 29 cm de arcilla plástica no compacta de color 10 YR/5/2 con manchones claros y oscuros, que reaccionan al contacto con el HCl; en la cima de este paquete se aprecian 10 cm de limo arenoso no compacto y deleznable, de color 2.5 Y/7/3 con efervescencia al HCl.

Respecto al paquete E, su base está compuesta por 6 cm de arcilla compacta y le sobreyacen 7 cm de limo fino, ambos estratos son de color 10 YR/4/2, presentan vetillas alineadas que efervescen al contacto con el HCl y el H₂O₂; finalizando el paquete con 19 cm de arena fina de color verde claro 5Y/5/2.

Mientras que el paquete F presenta 23 cm de un limo masivo compacto de color 2.5 Y/4/2, le siguen 9 cm de arcilla fina compacta de color 2.5 Y/6/2 y culmina con 16 cm de un limo arenoso fino de color 2.5 Y/5/3, donde todo el paquete reaccionó con alta efervescencia al contacto con el HCl.

Esta zona termina con el paquete G que está conformado por 28 cm de una arcilla compacta masiva de color 10 YR/5/2 y en su cima se aprecian 4 cm de un limo grueso de color 2.5 Y/6/3, todo el paquete efervesció con el HCl.

Zona 3 (16.38 a los 11.74 m): A esta zona la conforman los tramos 31 al 23, lo que nos coloca en la parte central del núcleo ACA I-11 y fue subdividida por cinco paquetes en base a sus características texturales.

El paquete A está constituida por 10 cm de arena limosa; posteriormente se aprecia la intercalación de 5 cm de una arcilla fina; donde después se distingue de nuevo la presencia de una arena limosa con 11 cm de espesor. Todo el paquete presentó un color homogéneo 2.5Y/5/4 y efervescencia con el HCl.

En el paquete B se identificaron 19 cm de limo arenoso de color 2.5Y/6/3 con fuerte efervescencia al contacto con el HCl; le siguen 30 cm de limo fino de color 2.5Y/5/3; continuando con 14 cm de arcilla plástica compacta de color 10YR/5/2, que además presentaba una tendencia a fracturarse durante el muestreo y poca efervescencia con el HCl. Le sobreyacen 62 cm de un limo arcilloso fino, homogéneo, bien compacto; seguido por un limo arenoso homogéneo, poroso y deleznable; estos últimos lito-tipos presentaron un color homogéneo 2.5Y/5/3 con algunas zonas más claras hacia la cima del paquete y su efervescencia con el HCl varió de nula a alta hacia la cima.

En el paquete C se reconocieron 14 cm de un limo arenoso, compacto y masivo de color 2.5Y/6/2; seguido por 7 cm de arena fina, porosa y compacta de color 2.5Y/8/2; continuando con 59 cm de una arena limosa fina, masiva, porosa, compacta de color

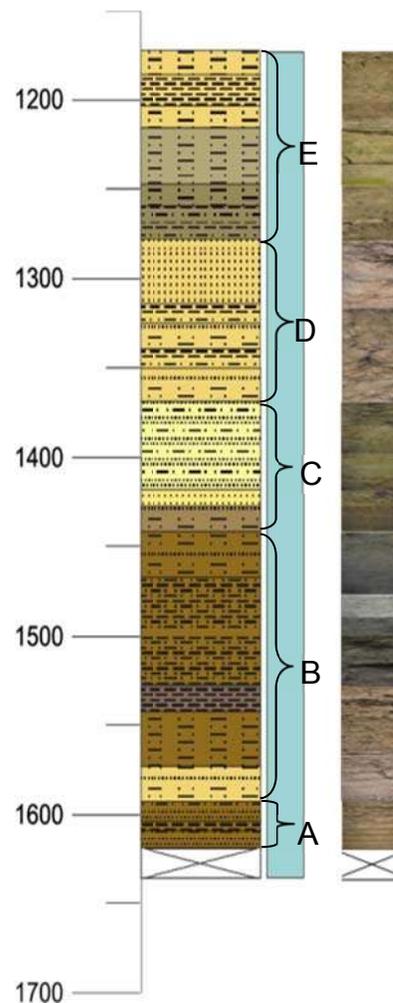


Figura 17.- Estratigrafía de la Zona 3, compuesta por arena limosa, arcilla, limo arenoso, limo, limo arcilloso, arenas, arena limosa y arcilla limosa.

claro 5Y/8/2, donde los tres lito-tipos mostraron alta efervescencia al contacto con el HCl.

En el paquete D se aprecian 44 cm de un limo arenoso masivo, poroso de color claro 2.5Y/6/3; interrumpido por dos intercalaciones de arcilla limosa compacta un poco más oscura, con espesores de 2 y 5 cm, localizadas a los 13.34 y 13.18 m respectivamente; sobreyaciendo se encuentra una arena muy fina porosa que tiende a hacerse más gruesa hacia la cima del paquete y es de color claro 2.5Y/6/3; la efervescencia al contacto con el HCl fue alta, partiendo de la base y disminuyó hacia la cima del paquete.

Esta zona termina con el paquete E que comprende de los 12.78 a 11.74 m, donde su base está compuesta por 18 cm de arcilla limosa con alta efervescencia con el HCl, seguido por un limo franco de 12 cm en su espesor y disminución en la efervescencia del HCl, ambos lito-tipos con un color homogéneo 2.5Y/7/2; posteriormente se aprecian 34 cm de un limo masivo, algo compactado, poroso y poco deleznable de color 2.5Y/7/3, donde la efervescencia al contacto con el HCl es alta en la base y disminuye en la cima, mientras que con el H₂O₂ sucede lo contrario; subyaciendo se distingue 10 cm de un limo de color más claro y deleznable, le siguen 17 cm de arcilla, culminando la zona con un limo de 13 cm en su espesor, donde estos últimos tres lito-tipos presentan un color homogéneo 2.5Y/6/3 y su efervescencia fue alta con el HCl, mientras que con el H₂O₂ fue principalmente en el centro y poca.

Zona 4 (11.74 a los 5.71 m): Está conformada por 10 tramos que corresponden del 22 al 13 y fue subdividida por siete paquetes en base a sus características texturales.

El paquete A está constituido por 52 cm de un limo poroso, deleznable, masivo de color 5Y/7/3, que reaccionó al contacto con el HCl y H₂O₂; después pasa a un limo arcilloso deleznable, poroso de color 5Y/6/4, con un espesor de 19 cm y alta efervescencia con el HCl y donde solo 5 cm de la base del limo arcilloso reaccionaron al contacto con el H₂O₂; sobreyaciendo se aprecian 11 cm de arcilla plástica de color 5Y/7/2, con alta efervescencia en la prueba de HCl.

Continuando con el paquete B se observaron 22 cm de una arcilla plástica, compacta de color 2.5Y/8/4, efervescente con el HCl; le sigue en contacto erosivo la destacada presencia de 4 cm de ceniza volcánica gruesa y deleznable de color 2.5Y/7/1, que después pasa a ceniza volcánica muy fina y compacta de color 2.5Y/8/1 con un espesor de 6 cm; el paquete culmina con 7 cm de arcilla compacta de color 2.5Y/6/3 y con muy poca efervescencia al contacto con el HCl.

El paquete C está constituido por 4 cm de ceniza volcánica muy fina de color 2/8/5PB con alta efervescencia con el HCl y H₂O₂; sobreyaciendo se distinguen 7 cm de limo masivo, poroso, deleznable de color 2.5Y/7/3 con alta efervescencia con el HCl y poca con el H₂O₂; le siguen 9 cm de arcilla plástica de color 5Y/5/3 con poca efervescencia al contacto con el H₂O₂; finalizando con 13 cm de limo arenoso retrabajado, granular, deleznable de color 2.5Y/6/4 y efervescente con el HCl y poco con el H₂O₂.

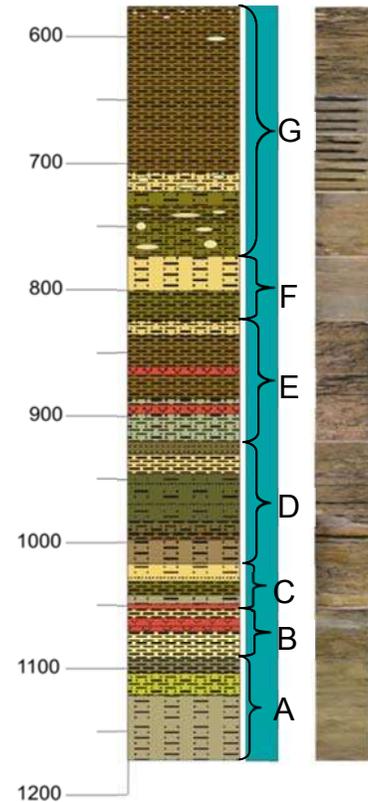


Figura 18.- Estratigrafía de la Zona 4, constituida por limo, limo arcilloso, arcilla, limo arenoso, arena, con intercalaciones de ceniza volcánica.

De los 10.20 a los 9.21 m se encuentra el paquete D que está conformado por: 21 cm de limo masivo, compacto de color 2.5Y/6/2 y efervescencia con el H₂O₂; le siguen 3 cm de arcilla plástica, compacta, masiva de color 2.5Y/5/3, que es efervescente con el H₂O₂; posteriormente se distinguen 8 cm de limo arcilloso muy compacto y masivo de color 2.5Y/5/2, el cual efervesció al interactuar con el H₂O₂; después se identificaron 40 cm de un limo arenoso, masivo, un poco plástico de color 5Y/5/2, efervescente con el HCl; sobreyaciendo se aprecian 15 cm de arcilla plástica, masiva, compacta de color 2.5Y/6/3, con alta efervescencia con el HCl y moderada con el H₂O₂; culminando con 12 cm de arena fina, deleznable de color 2.5Y/5/2, presentando alta efervescencia con el HCl y el H₂O₂.

Le sigue el paquete E que va de los 9.21 a los 8.27 m, donde su base consta de 34 cm correspondientes a un limo arcilloso deleznable, masivo, poroso de color 5Y/6/2 con muy poca efervescencia con el H₂O₂, además presenta una intercalación de 0.5 cm de ceniza volcánica de color blanca, posicionada a los 8.93 m de profundidad del núcleo ACA I-11; posteriormente pasa a una arcilla, masiva, compacta, con tendencia a fracturarse, poco plástica de color 2.5Y/5/3 con un espesor de 50 cm y una intercalación en la profundidad de 8.69 m de ceniza volcánica fina de color negra y con 1 cm de espesor; finalizando con 10 cm de un limo arcilloso masivo, compacto con tendencia a fragmentarse de color 2.5Y/6/4 y muy poca efervescencia al contacto con el H₂O₂.

En el paquete F se encuentran 25 cm de arcilla masiva, porosa y compacta de color 5Y/5/3, con poca efervescencia con el HCl y alta con el H₂O₂; le siguen 27 cm de un limo masivo, algo deleznable de color 2.5Y/6/3 con alta efervescencia con el H₂O₂. De los 7.75 a los 7.31 m se identificaron 28 cm de un limo arcilloso masivo, poroso de color 5Y/5/4, con manchones blancos de carbonatos y efervescencia al contacto con el HCl y el H₂O₂; seguido de 11 cm de arcilla plástica, masiva, compacta de color 5Y/5/4, la cual seguía presentando los manchones blancos de carbonatos, donde cabe mencionar que la arcilla era efervescente con el H₂O₂; después pasó a un limo masivo,

poroso de color 5Y/5/3 de 5 cm de espesor con muy poca efervescencia con el HCl y alta con el H₂O₂.

Entre los 7.31 a los 5.71 m se posicionan el paquete G, donde su base está constituida por 14 cm de un limo arcilloso masivo, compacto de color 2.5Y/6/4, con manchones de carbonatos, presentando poca efervescencia con el HCl y el H₂O₂; le siguen hacia la cima 70 cm de arcilla plástica, masiva, compacta de color 2.5Y/5/4, reaccionante con el H₂O₂; pasando a una arcilla porosa, masiva, con zonas muy compactas y en su base presenta una tendencia a fracturarse, es de color 2.5Y/5/4 y efervesció con el H₂O₂; la zona 4 culmina con 26 cm de arcilla masiva, compacta con tendencia a fracturarse, de color 2.5Y/5/4, efervescente con el H₂O₂ y presentando en la cima manchones de carbonatos.

Zona 5 (5.71 a los 3.87 m): Está constituida por los tramos 12 al 9, para lo cual fue subdividida por dos paquetes en base a sus características texturales.

El paquete A esta conformado por 43 cm de limo arenoso fino, semi-compacto, deleznable de color 2.5Y/7/2, con efervescencia alta y homogénea al contacto con el H₂O₂; pasando a un limo arenoso fino, masivo, deleznable de color 5Y/5/2, con 32 cm de espesor y efervescente al H₂O₂; le siguen 25 cm de arena fina, masiva, deleznable de color 5Y/5/2 con efervescencia alta y homogénea con el H₂O₂; continua la presencia de una arena fina, compacta de color 5Y/6/3, efervescente con el HCl y el H₂O₂ de 8 cm de espesor.

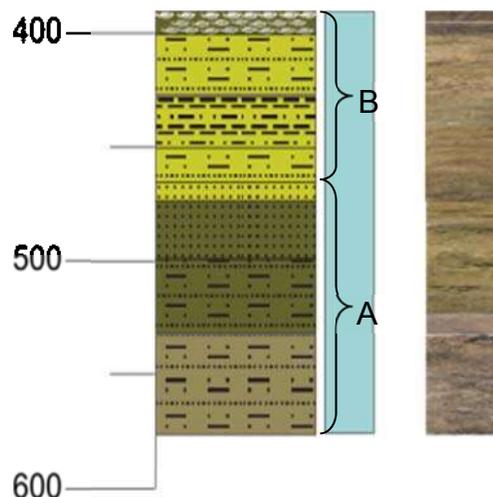


Figura 19.- Estratigrafía de la Zona 5, conformada por limo arenoso, arenas, arcilla limosa y turba.

El paquete B está constituido por 16 cm de un limo arenoso fino, masivo, compacto de color 5Y/6/3 con efervescencia media de HCl y alta con el H₂O₂; hacia la cima se aprecian 22 cm de arcilla limosa, masiva, deleznable de color 5Y/6/3 con poca efervescencia con el HCl y alta con el H₂O₂; le siguen 26 cm de limo arenoso fino (posible material volcánico de un flujo piroclástico) se presenta masivo, bien compactado de color 5Y/6/3, efervescente con el H₂O₂ y culminando la zona 5 entre los 4.0-3.87 m destaca un material turboso, masivo, compacto de color oscuro 5Y/5/2 con manchones negros y alta efervescencia con el H₂O₂.

Zona 6 (3.87 a los 1.99 m): Está conformado por los tramos 8 al 6, para lo cual fue subdividida por dos paquetes en base a sus características texturales.

Donde la base del paquete A está constituida por 10 cm de arena fina de color 5Y/6/4; seguido por 41 cm de arcilla plástica, masiva, bien compacta de color 5Y/4/2; continuando con 11 cm de un material oscuro 2.5Y/6/4, arcilloso (posible lavado) con clastos negros y blancos; estos lito-tipos presentaron alta efervescencia con el H₂O₂ incrementando en la base. Sobreyaciendo al paquete, culminó 7 cm de arena fina (posible material volcánico) de color 5Y/6/2 efervescente con el H₂O₂.

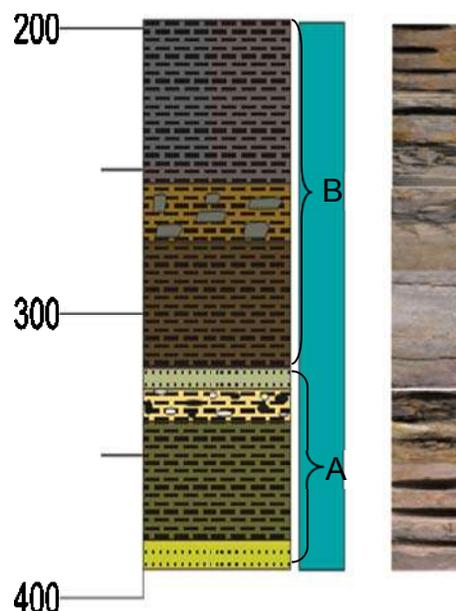


Figura 20.- Estratigrafía de la Zona 6, constituida por arenas y arcilla.

Al paquete B lo conforman 43 cm de una arcilla plástica, masiva, bien compacta de color 2.5Y/4/2 con efervescencia moderada al contacto con el H₂O₂; seguida por 20 cm de material arcilloso de color 2.5Y/5/3 con manchones negros y moderada efervescencia con el H₂O₂. Culminando la zona 6 con 56 cm de arcilla plástica, masiva y bien compacta de color 5Y/4/1 con alta efervescencia al interactuar con el H₂O₂.

Zona 7 (1.99 a los 0m): Esta es la última zona y abarca del tramo 5 al 1, por lo que fue subdividida en dos paquetes en base a sus características texturales.

El paquete A está constituido por 40 cm de una arcilla limosa de color 2.5Y/4/2, conformada por pocas bandas oscuras, horizontales y semi-verticales con forma irregular (posible materia orgánica), además de presentar alta efervescencia con el H₂O₂; sobreyaciendo se encuentran 38 cm de una arcilla plástica, compacta, masiva de color 2.5Y/4/3, constituida por abundantes bandas horizontales y vetillas con forma de raíces de color oscuro (posible materia orgánica) con alta efervescencia al contacto con el H₂O₂; destacando entre los 1.21 a los 1.14m material turboso oscuro 2.5Y/2.5/1 con poca efervescencia con el H₂O₂.

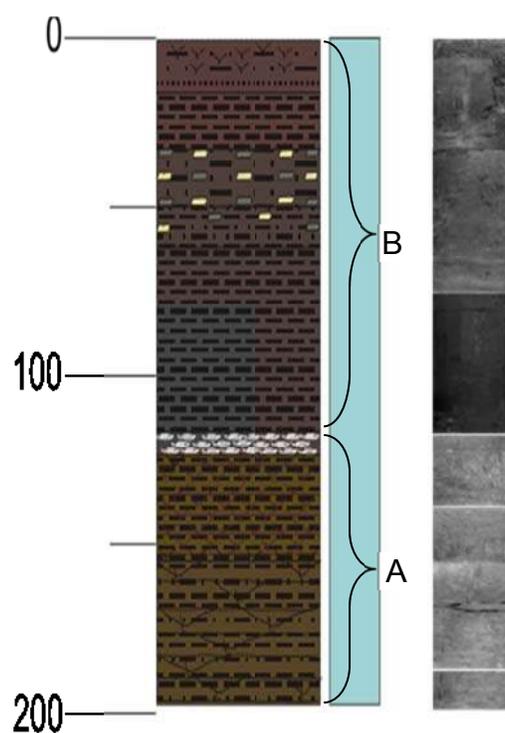
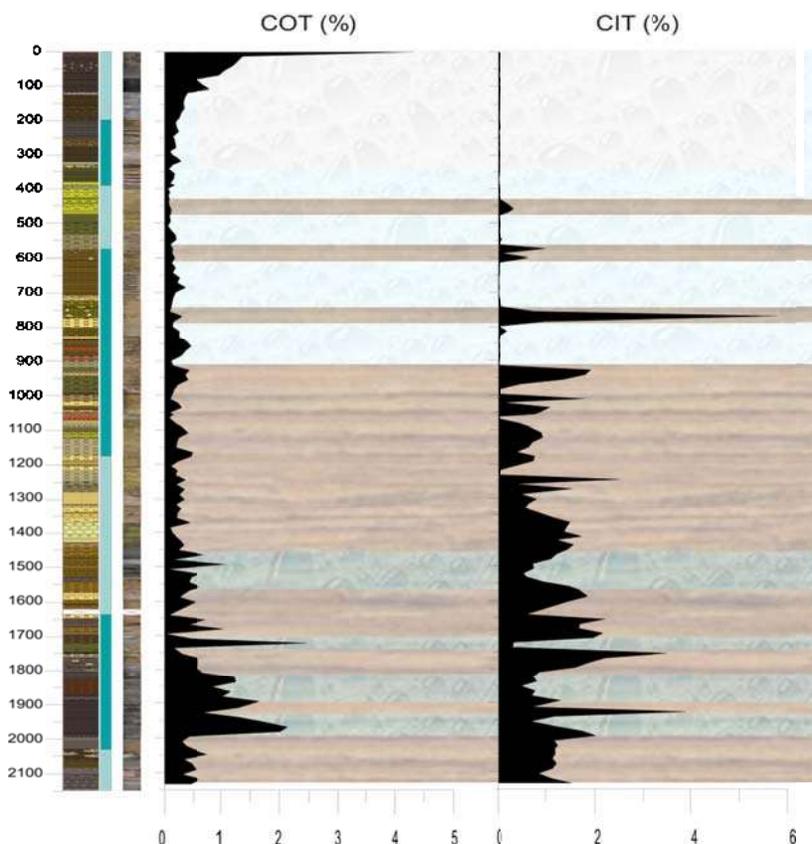


Figura 21.- Estratigrafía de la Zona 7, compuesta por limo arcilloso, arcilla, turba y limo arenoso. Con evidencia de material retrabajado y materia orgánica.

El paquete B está constituido por 44 cm de una arcilla extremadamente plástica de color 10YR/2/1, con manchones de color café claro en su cima, además de efervescer con el H₂O₂. Continuando con 10 cm de arcilla, seguido por 29 cm de un material que tiende a hacerse más limoso e incrementando la presencia de unos manchones claros hacia la cima; el color 5YR/2.5/1 de estos lito-tipos fue homogéneo así como su alta efervescencia con el H₂O₂. Esta zona y el núcleo ACA I-11 culmina con 16 cm de una arcilla plástica, seguido por 15 cm de un limo arenoso muy orgánico, donde presentaron un color homogéneo café claro 5YR/3/1, así como alta efervescencia con el H₂O₂.

VII.2) Análisis de contenido de Carbono Orgánico e Inorgánico



Gráfica 1.- Muestra los porcentajes del análisis de contenido de carbono orgánico (COT) e inorgánico (CIT) en correlación con la estratigrafía del núcleo ACA I-11.

En general se aprecia en la gráfica 1 que de las 160 muestras analizadas 65 muestras son las que destacan por sus altos porcentajes de carbono, 43 muestras corresponden al CIT y 22 muestras presentan un alto porcentaje en COT.

Dentro de las 43 muestras con relevancia en el CIT se observa que se incluyen en facies arcillosas y limosas, con escasas intercalaciones de arenas y material retrabajado, lo que permite suponer que de los 21.48 m hasta los 9.28 m, se presentó un tirante de agua bajo, posiblemente llegando a ser seco con algunos episodios de aporte terrígeno.

Sin embargo el COT presentó 22 muestras con valores de moderados a altos en su porcentaje, siendo el intervalo de 1.08 a 0 m el más alto. En base a esto se infirió un tirante de agua alto y condiciones de estabilidad en el lago, por la tendencia de sus sedimentos de hacerse más orgánicos hacia la cima. Las facies que predominan son arcillosas con pocas intercalaciones de limos.

A continuación se describen las fluctuaciones de los valores de COT y CIT que han sido desglosadas por zonas:

VII.2.1) Contenido de Carbono Orgánico Total (COT)

La Zona 2 corresponde a la base del núcleo ACA I-11, en ella destacan 12 valores altos de COT que van de los 0.86 a 2.48 %, estos predominan en sedimentos arcillosos, indicando pequeñas fluctuaciones de humedad. Sin embargo es importante mencionar que los valores que se encuentran en las profundidades de 18.94, 19.41, 19.69 y 19.83 m son mayores que el CIT por una diferencia mínima, pero aun así, se aprecia una variación en el ambiente (Tabla 3).

Zona 2 (20.31-16.38 m)			
Tr.	Clave en metros	COT %	Textura
35	17.22	2.48	Arena
36	18.24	1.24	Arcilla
37	18.38	1.26	Limo
	18.52	0.86	Limo
	18.66	1.17	Limo
	18.80	1.03	Limo Arcilloso
	18.94	1.66	Arcilla
38	19.13	1.31	Arcilla
	19.41	1.33	Arcilla
	19.55	1.76	Arcilla
	19.69	2.14	Arcilla
	19.83	2.01	Arcilla

Tabla 3.- Valores altos de COT de la Zona 2 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.

El tramo 29 que corresponde a la Zona 3 y presenta tres valores de 0.60, 0.71 y 1.08 %, que son relativamente bajos pero en la profundidad que se encuentran y comparados con el CIT, muestran una variabilidad en la humedad. El incremento del COT se presentó en materiales limo-arcillosos (Tabla 4).

Zona 3 (16.38-11.74 m)			
Tr.	Clave en metros	COT %	Textura
29	14.66	0.71	Limo Arenoso
	14.94	1.08	Limo Arcilloso
	15.22	0.60	Limo Arcilloso

Tabla 4.- Valores altos de COT de la Zona 3 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.

De los 1.08 a 0 m corresponde a la Zona 7, localizada en la cima del núcleo ACA I-11. Fueron siete los valores que presentaron mayor porcentaje de COT, mostrando de la base hacia la cima su incremento en facies de limos y arcillas, donde los valores fueron de 0.81 a 4.32 %. Este comportamiento del COT coincide con la estratigrafía, ya que los tramos que conforman esta zona mostraban una tendencia más orgánica de la base a la cima por ser material cercano a la superficie y depositado recientemente (Tabla 5).

Zona 7 (1.99-0 m)			
Tr.	Clave en metros	COT %	Textura
1	0	4.32	Limo
	0.13	1.37	Limo
	0.26	1.30	Arcilla
2	0.4	1.21	Limo
	0.54	1.07	Limo
	0.68	0.97	Arcilla
3	1.08	0.81	Arcilla

Tabla 5.- Valores altos de COT de la Zona 7 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.

VII.2.2) Contenido de Carbono Inorgánico Total (CIT)

En toda la Zona 1 correspondiente a los tramos 40 y 41, se obtuvieron en distintos materiales altas concentraciones en porcentaje del CIT que fueron de los 1.110 a 1.540 %. Indicando un periodo constante y posiblemente seco o con un tirante de agua bajo (Tabla 6).

Zona 1 (21.48-20.31 m)			
Tr.	Clave en metros	CIT %	Textura
40	20.35	1.190	Material retrabajado
	20.49	1.200	Material retrabajado
	20.63	1.140	Limo
	20.77	1.220	Arena
41	20.91	1.140	Arena
	21.19	1.110	Arcilla Limosa
	21.33	1.540	Arcilla Limosa

Tabla 6.- Valores altos de CIT de la Zona 1 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.

La Zona 2 comprende 17 valores altos en el porcentaje del CIT, que oscilan entre los 3.900 a 1.170 % y destacan en las profundidades de 19.97, 19.27, 17.68, 17.54, 16.95 y 16.54 m, donde las facies que predominan son las arcillas con escasas intercalaciones de limos. Indicando que seguía pasando la cuenca por un periodo seco o con un tirante de agua bajo (Tabla 7).

Zona 2 (20.31-16.38 m)			
Tr.	Clave en metros	CIT %	Textura
33	16.54	2.220	Arcilla
	16.68	1.700	Arcilla
34	16.81	1.680	Limo Arenoso
	16.95	2.170	Arcilla
	17.09	1.970	Limo
36	17.54	3.520	Limo Arenoso
	17.68	2.220	Arcilla
	17.82	1.880	Arcilla
	17.96	1.610	Arcilla Limosa
37	18.94	1.310	Arcilla
38	19.27	3.900	Arcilla
	19.41	1.180	Arcilla
	19.69	1.180	Arcilla
	19.83	1.740	Arcilla
39	19.97	2.030	Arena
	20.11	1.170	Arena
	20.25	1.250	Arena

Tabla 7.- Valores altos de CIT de la Zona 2 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.

La parte central del núcleo ACA I-11 correspondiente a la Zona 3, la mayoría de sus muestras analizadas, presentaron porcentajes altos de CIT que iban de los 1.110 a 1.850 %, destacando uno de 2.530 % a los 12.45 m de profundidad. Las facies que predominan son limosas con un nivel de arcilla y otro de arena. Indicando una cuenca con un tirante de agua bajo y con ingreso de material cercano a la cuenca (Tabla 8).

Zona 3 (16.38-11.74 m)			
Tr.	Clave en metros	CIT %	Textura
24	12.45	2.530	Limo
25	12.72	1.550	Arcilla Limosa
26	13.58	1.150	Limo Arenoso
27	13.72	1.500	Arena Limosa
	13.86	1.430	Arena Limosa
	14.00	1.380	Arena Limosa
	14.14	1.740	Arena Limosa
28	14.24	1.240	Arena
	14.38	1.570	Limo Arenoso
29	14.52	1.450	Limo Arenoso
	14.66	1.220	Limo Arenoso
	14.8	1.110	Limo Arcilloso
30	15.6	1.490	Limo
	15.7	1.680	Limo Arenoso
	15.88	1.850	Limo Arenoso
31	16.02	1.470	Arcilla

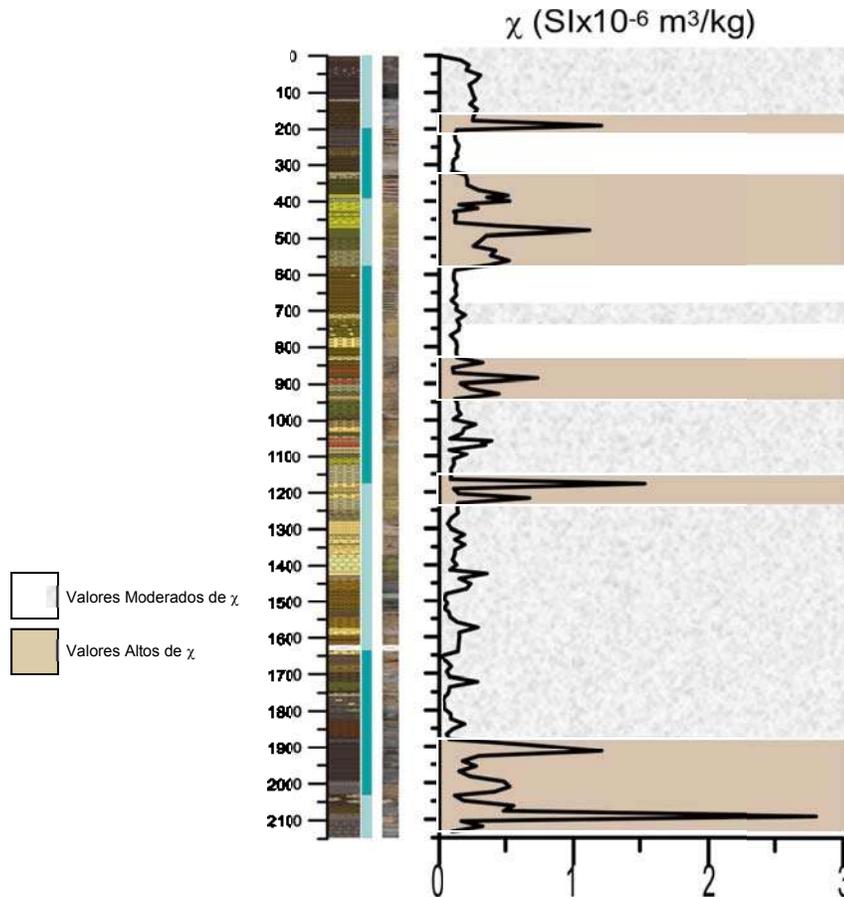
Tabla 8.- Valores altos de CIT de la Zona 3 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.

La Zona 4 a diferencia de la Zona 3 muestra cambios bruscos y solo 7 valores altos en el porcentaje del CIT. Partiendo de la base hacia la cima entre los 10.37 a 9.28 m con porcentajes de 1.090 a 1.920, la cuenca pasó de un tirante de agua moderado a bajo por su sedimentación, que varió de lo fino a lo grueso, posteriormente viene un cambio brusco a los 7.69 m con un extraordinario incremento en el porcentaje del CIT con un valor de 5.780%, seguido a los 5.74 m con 1.010 % en una arcilla, mostrando cómo se estabilizó de nuevo la cuenca (Tabla 9).

Zona 4 (11.74-5.71 m)			
Tr.	Clave en metros	CIT %	Textura
13	5.74	1.010	Arcilla
16	7.69	5.780	Limo Arcilloso
19	9.28	1.920	Arena
	9.42	1.810	Arcilla
	9.56	1.370	Limo Arenoso
	10.12	1.800	Limo
20	10.37	1.090	Arcilla

Tabla 9.- Valores altos de CIT de la Zona 4 con su respectivo tramo (Tr.), profundidad (clave en metros) y su textura.

VII.3) Susceptibilidad Magnética



Gráfica 2.- Muestra los valores de susceptibilidad magnética correlacionada con la columna estratigráfica del núcleo de Acambay.

De las 160 muestras analizadas, 31 son las que destacan por valores moderados y altos de susceptibilidad magnética (χ), 13 corresponden a valores moderados y 18 a valores altos en la χ . En la gráfica 2 se marcaron 4 fases de valores moderados de χ , que van de los 0.20 a 0.40 $\times 10^{-6}$ m³/kg y son dos los que sobre salen en las profundidades de 14.24 m con 0.36 $\times 10^{-6}$ m³/kg y 10.57 m con 0.40 $\times 10^{-6}$ m³/kg. Sin embargo, los valores altos de χ van de los 0.28 a 2.80 $\times 10^{-6}$ m³/kg siendo 5 fases la que

los conforman, destacando por cinco extraordinarios valores en las profundidades de 20.91 m con $2.80 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$, 19.13 m con $1.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$, 11.77 m con $1.53 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$, 4.80 m con $1.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ y 1.91 m con $1.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Dentro de las 13 muestras con valores moderados en la χ se observa que se incluyen dos ciclos en las facies de sedimentos; 1) arena- limo arenoso- arena- limo arenoso- arena y 2) arcilla- ceniza volcánica- arcilla- limo- arcilla- limo. La intercalación de ceniza volcánica gruesa se encuentra a los 10.69 m hacia la cima del núcleo. Cabe mencionar que 8 muestras presentan fragmentos de diatomeas y dos muestras no presentaron diatomeas (Tabla 10).

Sin embargo los 18 valores altos de χ presentaron facies arcillosas, limosas y arenosas, con tendencia a mostrar ciclicidad en la sedimentación. Respecto a las diatomeas, tres muestras presentaron fragmentos y una no presentó diatomeas (Tabla 11).

La susceptibilidad magnética junto con la estratigrafía y las diatomeas permitió inferir que la cuenca presentaba un lago con un tirante de agua fluctuante, por lo que sus cambios fueron principalmente de somero a profundo, turbio y en ocasiones salado, con periodos de fases de aporte terrígeno de moderado a alto, según los registros preservados en los sedimentos.

VII.4) Espectrometría de Masas (ICP-MS)

Se determinaron de 160 muestras las concentraciones en partes por millón (ppm) o porcentaje en peso (%) de la química elemental de los sedimentos, utilizando la técnica de espectrometría de masas, con la finalidad de obtener elementos básicos (Fe, Ti, Al, K, Ca, Mg, Sr, Ba, Mn, Zn, Zr, etc.) para la interpretación paleoambiental y para poder determinar la procedencia de minerales que componen los sedimentos de la cuenca.

En el caso de los lagos de cuencas cerradas, las concentraciones de solutos y los niveles lacustres fluctúan en respuesta a la relación precipitación/evaporación (P/E). Estos cambios en el balance hidrológico son registrados en las facies sedimentarias y en la composición multi-elemental (Valero-Garcés *et al.*, 1997 en Sosa-Nájera *et al.*, 2010).

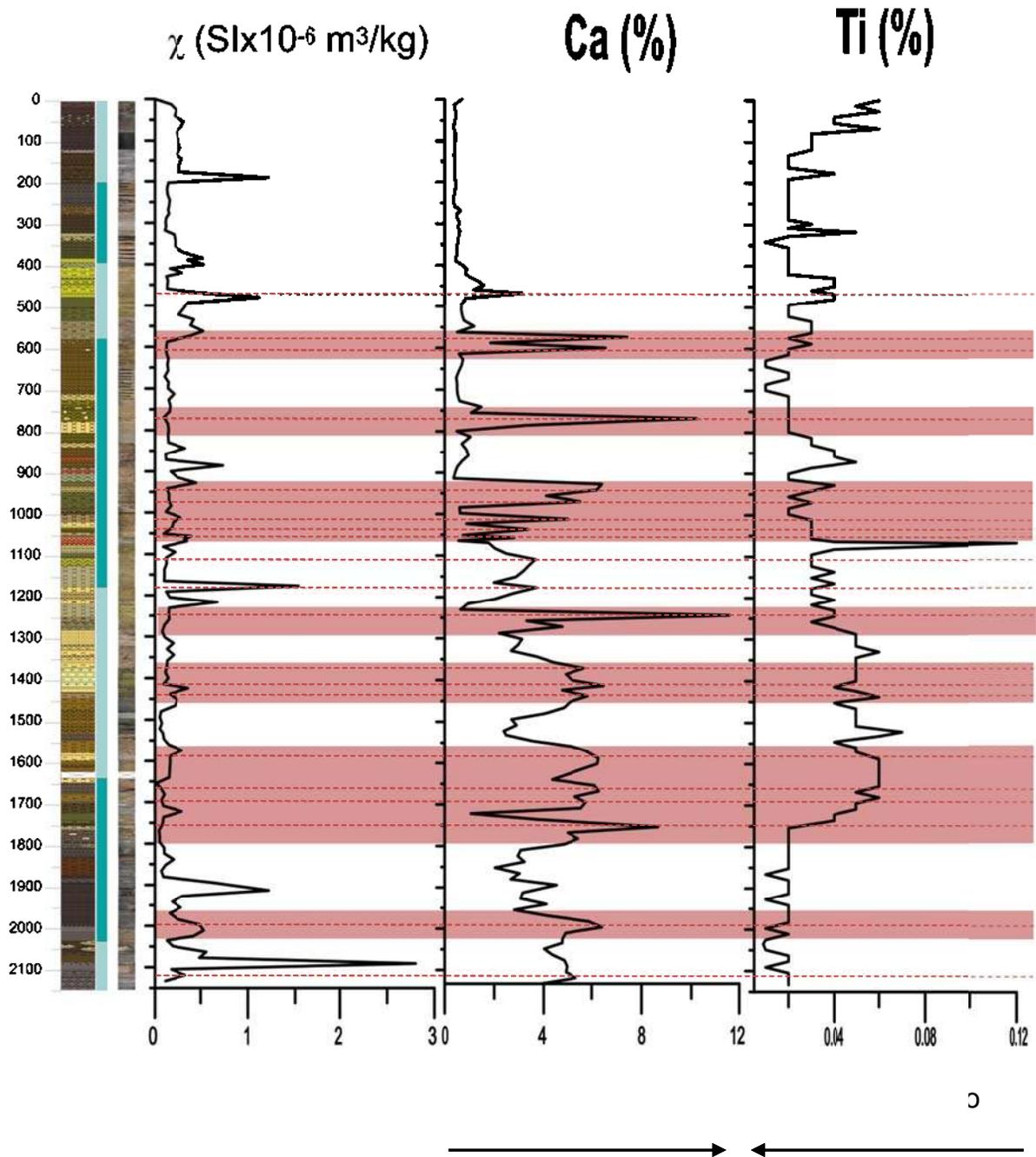
El titanio (Ti) se encuentra en minerales que no se meteorizan con facilidad, es uno de los elementos más inmóviles durante el proceso de intemperismo, por lo que ha sido utilizado como un “*proxy*” de cambios en el aporte clástico y puede ser indicativo de cambios en las condiciones hidrológicas (Peterson *et al.*, 2000; Haug *et al.*, 2001a, 2003; Barron *et al.*, 2003, 2004; Croudace *et al.*, 2006; Peterson y Haug, 2006; Rothwell y Rack, 2006; Rothwell *et al.*, 2006 en Sosa-Nájera *et al.*, 2010). Posee baja corrosión al medio ambiente, muestra resistencia en medios que contengan niveles elevados de cloruro. Se puede incorporar a las cuencas por vía eólica, fluvial y pluvial. Su variación temporal proporciona precipitación y escurrimiento de las cuencas hidrográficas locales, ya que sus concentraciones no son afectadas por la alteración atmosférica y post-deposición (Tenorio-Peña, 2011).

Por otra parte, el calcio (Ca) está presente en todo tipo de rocas y los principales minerales que contienen este elemento son: las micas, calcita, dolomita, anhidrita, yeso

y anortita. En los sedimentos lacustres la forma de carbonato que predomina es la calcita (CaCO_3), que puede tener un origen biogénico o clástico por lo que puede indicar como “*proxy*” momentos de menor sedimentación clástica y variaciones de fases húmedas a secas (Sosa-Nájera *et al.*, 2010; Tenorio-Peña, 2011).

Para explicar la gráfica 3 se muestra la correlación de la susceptibilidad magnética (χ), con los valores altos de Ti y bajos de Ca ya que indican un incremento en el aporte de sedimentos terrígenos de la cuenca hacia el lago debido a alta precipitación y descarga por procesos pluviales (Kelts y Hsü, 1978; Eugster, 1980; Boyle, 2001; Haug *et al.*, 2001a; Barron *et al.*, 2003, 2004; Peterson y Haug, 2006; Rothwell y Rack, 2006 en Sosa-Nájera *et al.*, 2010). Los valores bajos de Ti en general ocurren cuando hay valores bajos de susceptibilidad magnética y concentración alta de Ca. Estos eventos de disminución en la concentración de Ti sugieren la existencia de periodos de menor aporte clástico al lago y por ende periodos de menor precipitación. Los valores altos indican condiciones de mayor humedad y se asocian con valores altos de susceptibilidad magnética. Estas periodicidades, que sugieren eventos cíclicos de menor aporte en el Ti, se pueden interpretar como sequías recurrentes. Los mecanismos que determinan esta ciclicidad pueden estar relacionados con actividad solar, y/o fenómenos climáticos (Sosa-Nájera *et al.*, 2010).

Partiendo de la base a la cima del núcleo ACA I-11 se muestra en la tabla 11 los principales valores más altos de la concentración del calcio que van de 2.80 al 11.60 % y se encuentran en la profundidad de 21.19 a 4.68 m, donde destacan 4 valores a los 17.54 m con 8.66 %, 12.45 m con 11.60 %, 7.69 m con 10.20 % y 5.74 m con 7.42 %, los cuales se encuentran graficados indicando eventos de sequía (gráfica 3).

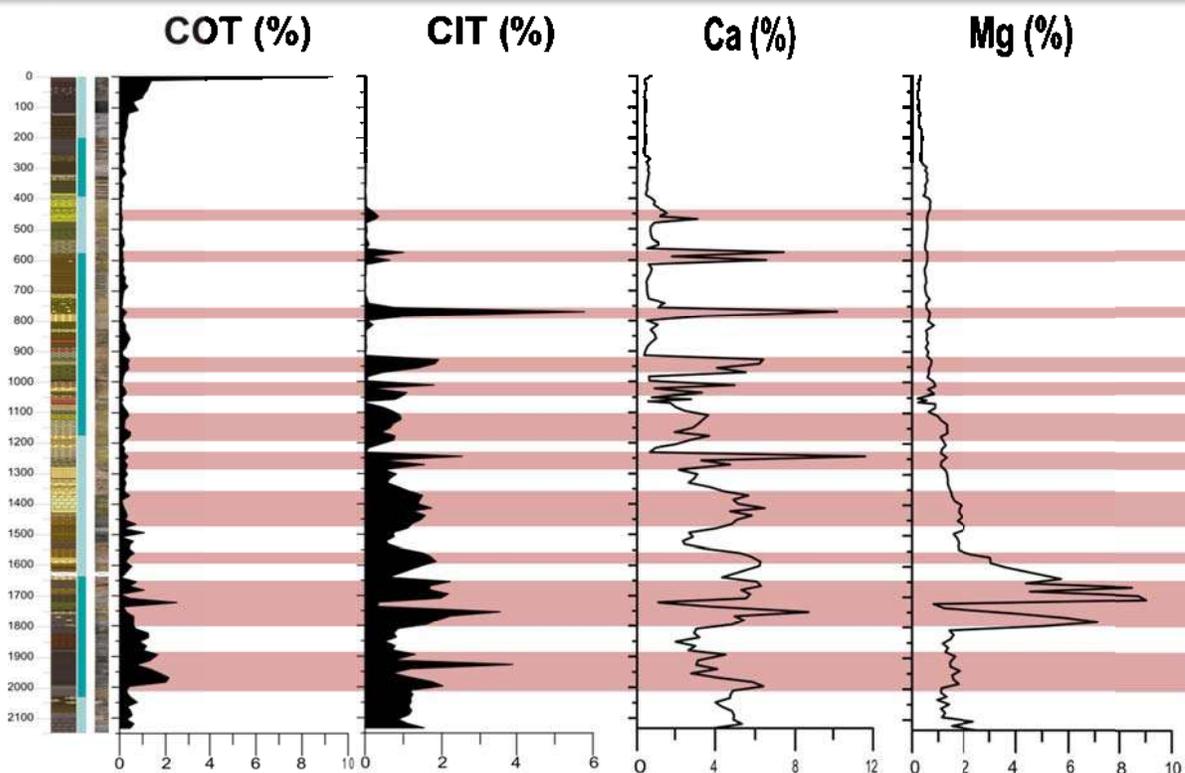


Gráfica 3.- Se muestra la correlación de la columna estratigráfica con los datos de la susceptibilidad magnética y las concentraciones de Ti y Ca. En barras de color con líneas punteadas se destacan los eventos de sequía más importantes de la secuencia.

Zona	Tr.	Clave en metros	χ	Ca %	Ti (%)	Textura
5	10	4.68	0.45	3.12	0.04	Arena
4	13	5.74	0.38	7.42	0.02	Arcilla
	14	6.00	0.12	6.55	0.02	Arcilla
	16	7.69	0.10	10.20	0.02	Limo arcilloso
	19	9.28	0.45	6.41	0.04	Arena
		9.42	0.13	6.20	0.03	Arcilla
		9.56	0.15	4.10	0.02	Limo arenoso
		9.70	0.15	5.53	0.03	Limo arenoso
		10.12	0.28	4.97	0.03	Limo
	20	10.37	0.18	3.35	0.03	Arcilla
	21	10.57	0.40	2.80	0.03	Arcilla
	22	11.09	0.12	3.66	0.03	Limo arcilloso
3	23	11.77	1.53	3.70	0.03	Limo
	24	12.45	0.15	11.60	0.04	Limo
	25	12.72	0.10	4.75	0.04	Arcilla limosa
	27	13.72	0.13	5.66	0.05	Arena limosa
		14.14	0.09	6.47	0.04	Arena limosa
	28	14.38	0.16	5.83	0.06	Limo arenoso
	30	15.88	0.16	6.26	0.06	Limo arenoso
2	33	16.68	0.07	6.28	0.05	Arcilla
	34	16.95	0.07	5.75	0.05	Arcilla
	36	17.54	0.08	8.66	0.02	Limo arenoso
	39	19.97	0.49	6.41	0.01	Arena
1	41	21.19	0.33	5.34	0.02	Arcilla Limosa

Tabla 12.- Valores de la gráfica 3, donde se muestra las zonas con sus respectivos tramos, profundidad en metros, susceptibilidad magnética (χ), concentraciones altas de calcio (Ca) y bajas de titanio (Ti), finalizando con la textura de la muestra del núcleo ACA I-11.

Por otra parte la gráfica 4 muestra la correlación de valores bajos de COT con valores altos de CIT, Ca y Mg ya que indican fases secas en el lago. Los valores bajos de COT en general ocurren cuando hay valores altos de CIT y concentración alta de Ca, pero también se toma en cuenta al magnesio (Mg) no porque sea un elemento que está presente en fracciones clásticas (anfíboles, micas y feldespatos), sino porque es utilizado como “proxy” de períodos secos. El incremento de la concentración de Ca puede indicar momentos de menor sedimentación clástica y por ende, de mayor precipitación autigénica en el lago, siempre y cuando no presente rocas carbonatadas el entorno de la cuenca.



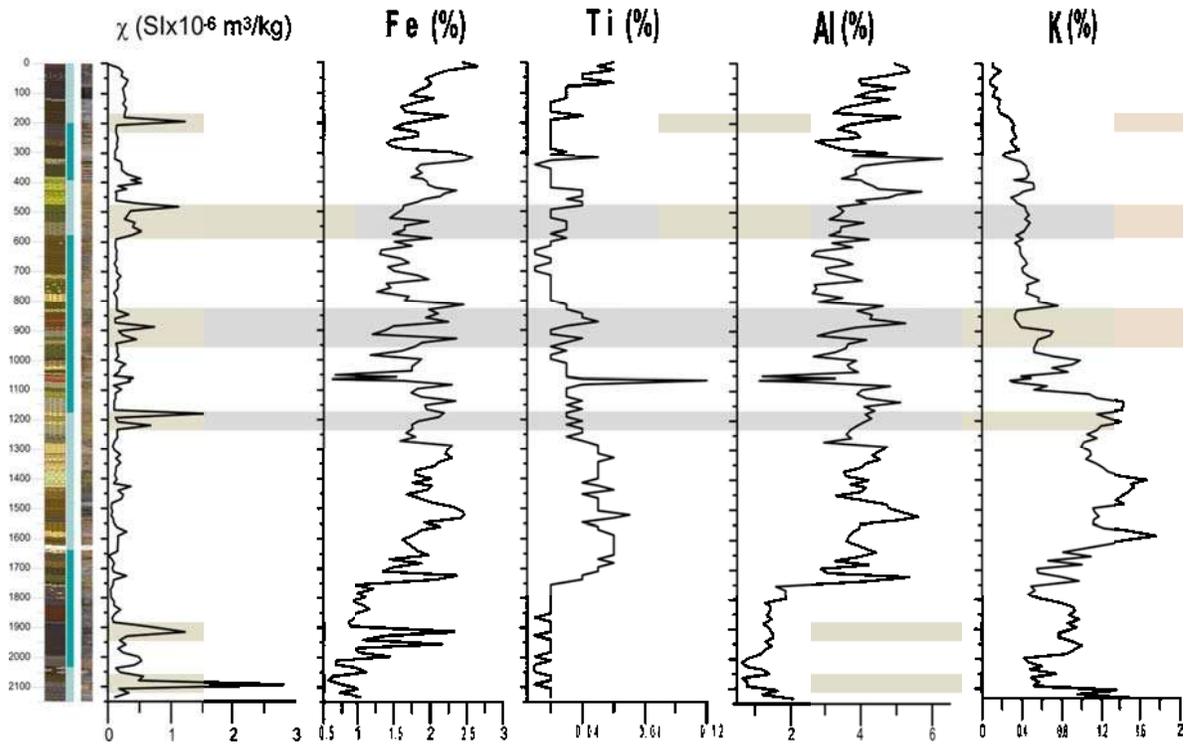
Gráfica 4.- Se muestra la correlación de la columna estratigráfica con los valores de carbón orgánico e inorgánico y las concentraciones de Ca y Mg. En barras de color se destacan eventos de sequía más importantes de la secuencia.

Partiendo de la base a la cima del núcleo ACA I-11 se muestra en la tabla 13 los principales valores más altos de la concentración del calcio que van de 2.80 al 11.60 % y se encuentran en la profundidad de 21.19 a 4.68 m, donde destacan 4 valores a los 17.54 m con 8.66 %, 12.45 m con 11.60 %, 7.69 m con 10.20 % y 5.74 m con 7.42 %. Estos valores fueron correlacionados con el CIT y el Mg para determinar si los carbonatos son alóctonos o autóctonos de la cuenca, además de corroborar los eventos de sequía (gráfica 4). Por lo que se puede inferir que es poco el carbonato que proviene de aporte clástico analizando los valores de Mg y su gráfica.

Zona	Tr.	Clave en metros	COT (%)	CIT (%)	Ca %	Mg (%)	Textura
5	10	4.68	0.11	0.25	3.12	0.57	Arena
4	13	5.74	0.14	1.01	7.42	0.58	Arcilla
	14	6.00	0.17	0.65	6.55	0.58	Arcilla
	16	7.69	0.30	5.78	10.20	0.67	Limo arcilloso
	19	9.28	0.42	1.92	6.41	0.74	Arena
		9.42	0.35	1.81	6.20	0.72	Arcilla
		9.56	0.40	1.37	4.10	0.64	Limo arenoso
		9.70	0.23	0.47	5.53	0.64	Limo arenoso
		10.12	0.10	1.80	4.97	0.89	Limo
	20	10.37	0.29	1.09	3.35	0.83	Arcilla
	21	10.57	0.15	0.78	2.80	0.55	Arcilla
22	11.09	0.40	0.91	3.66	0.98	Limo arcilloso	
3	23	11.77	0.45	0.78	3.70	1.09	Limo
	24	12.45	0.36	2.53	11.60	1.32	Limo
	25	12.72	0.34	1.55	4.75	1.09	Arcilla limosa
	27	13.72	0.44	1.50	5.66	1.53	Arena limosa
		14.14	0.20	1.74	6.47	1.8	Arena limosa
	28	14.38	0.33	1.57	5.83	1.92	Limo arenoso
30	15.88	0.26	1.85	6.26	3.06	Limo arenoso	
2	33	16.68	0.42	1.70	6.28	8.48	Arcilla
	34	16.95	0.02	2.17	5.75	8.72	Arcilla
	36	17.54	0.30	3.52	8.66	4.04	Limo arenoso
	38	19.27	0.71	3.90	3.06	1.46	Arcilla
	39	19.97	0.42	2.03	6.41	1.12	Arena
1	41	21.19	0.62	1.11	5.34	1.52	Arcilla Limosa

Tabla 13.- Valores de la gráfica 4, donde se muestra las zonas con sus respectivos tramos, profundidad en metros, contenido de carbón orgánico (valores bajos) e inorgánico (valores altos), concentraciones altas de calcio (Ca) y magnesio (Mg), finalizando con la textura de la muestra del núcleo ACA I-11.

Los elementos como el Fe, Al, Ti y K provienen de fuentes detríticas, por lo que son comúnmente utilizados como “proxies” de aporte terrígeno para interpretar los cambios en el aporte alóctono en estudios paleoambientales. El hierro (Fe) forma parte de numerosos minerales, entre ellos los óxidos (hematita, magnetita, limonita, siderita, ilmenita, entre otros), también se encuentra en arcillas, micas y meteoritos, además, se incorpora a las rocas sedimentarias detríticas o a las calizas. El aluminio (Al) se encuentra presente en silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas), arcilla y en forma de alúmina. El potasio (K) se encuentra principalmente en micas y sales, en los sedimentos marinos.



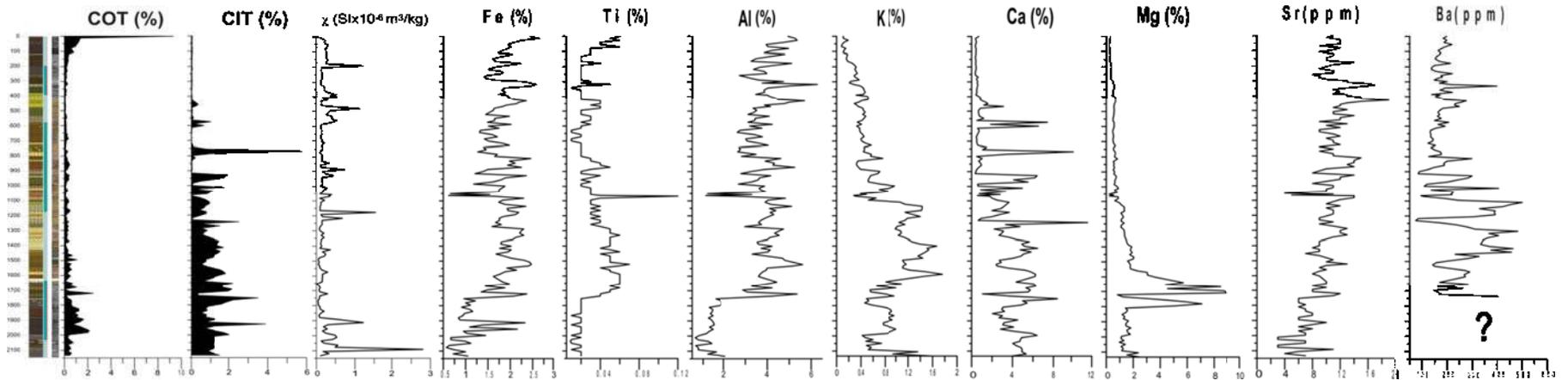
Gráfica 5.- Se muestra la correlación de la columna estratigráfica con los datos de la susceptibilidad magnética y las concentraciones de Fe, Ti, Al y K. En barras de color se destacan los eventos de aporte clástico más importantes de la secuencia.

Para explicar la gráfica 5 se muestra la correlación de la susceptibilidad magnética (χ), con los valores altos de Fe, Ti, Al y K ya que indican un incremento en el aporte de sedimentos terrígenos de la cuenca hacia el lago. Los valores bajos de estos elementos en general ocurren cuando hay valores bajos de susceptibilidad magnética, esta disminución en la concentración de Fe, Ti, Al y K sugieren la existencia de periodos de menor aporte clástico al lago. Para conocer si el aporte de sedimentos hacia el lago fue en un periodo húmedo o seco, se correlacionan con el CIT y el COT, donde los valores de estos disminuyen cuando la susceptibilidad magnética incrementa. Y si se desea conocer si el aporte fue por una fuente pluvial, fluvial o eólica se requiere de otro tipo de correlaciones. Cabe mencionar que cuando se tiene baja susceptibilidad magnética y alto porcentaje de Fe, es debido a que este elemento se encuentra oxidado, por lo tanto estaríamos hablando de una ferrihidrita y de una fase húmeda.

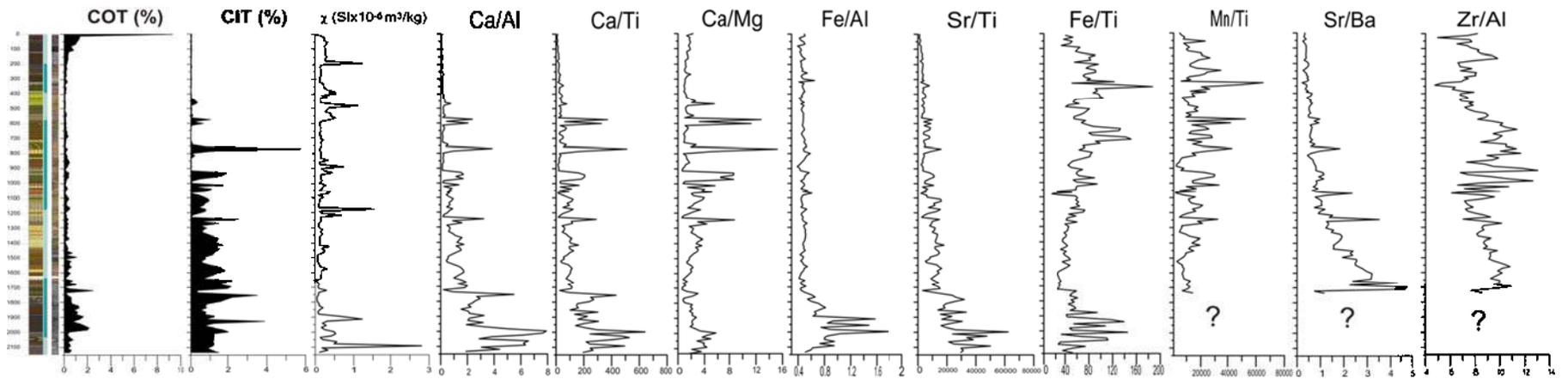
Zona	Tr.	Clave en metros	χ	Fe (%)	Ti (%)	Al (%)	K (%)
7	5	1.91	1.22	1.92	4.28	0.02	0.3
6	8	3.85	0.52	1.74	3.47	0.02	0.44
5	9	4.00	0.53	1.96	4.13	0.02	0.51
		4.20	0.30	2.08	4.49	0.02	0.52
	11	4.80	1.12	1.64	3.35	0.04	0.43
	12	5.34	0.43	1.98	4.09	0.03	0.48
		5.62	0.53	1.65	3.43	0.03	0.42
4	18	8.44	0.33	2.11	4.32	0.04	0.33
		8.86	0.73	1.5	3.87	0.03	0.39
	19	9.28	0.45	2.36	4.16	0.04	0.56
3	23	11.77	1.53	2.19	4.13	0.03	1.15
	24	12.17	0.68	1.75	3.88	0.03	1.19
2	38	19.13	1.22	2.33	1.48	0.02	0.77
		19.55	0.28	2.16	1.46	0.02	1
	39	20.11	0.53	0.67	0.64	0.02	0.47
1	40	20.63	0.56	0.63	0.66	0.02	0.49
	41	20.91	2.80	0.74	0.78	0.01	0.52
		21.19	0.33	0.72	1.21	0.02	0.95

Tabla 14.- Valores de la gráfica 5, donde se muestra las zonas con sus respectivos tramos, profundidad en metros, valores altos de χ y porcentajes del contenido de Fe, Ti, Al y K de las muestras del núcleo ACA I-11.

Cabe mencionar que los bajos valores de Ti, Zr y minerales magnéticos permiten inferir menor flujo de detritos hacia el lago y dominancia de antigénicos, sin embargo el aumento Ti, Zr, χ y la presencia de titanomagnetita, así como la ausencia de diatomeas, indican un aumento en la fracción terrígena. Las siguientes relaciones de elementos permiten inferir lo siguiente: Ca/Ti y Ca/Al indican la erosión química de los clásticos y muestran un valor más bajo durante las fases húmedas y viceversa; las proporciones de Ca/Mg y Sr/Ba indican las variaciones de carbonatos de evaporitas a rocas clásticas; la distribución de Si/Al y Zr/Al indican aporte detrítico de entrada eólica en un ambiente árido; la actividad eólica y la evaporación es baja cuando son los valores más bajos de Si/Al, Zr/Al y Ca/Mg; por último el bajo contenido de carbono COT y CIT indican poca productividad y aguas menos concentradas (Roy *et al.*, 2006).

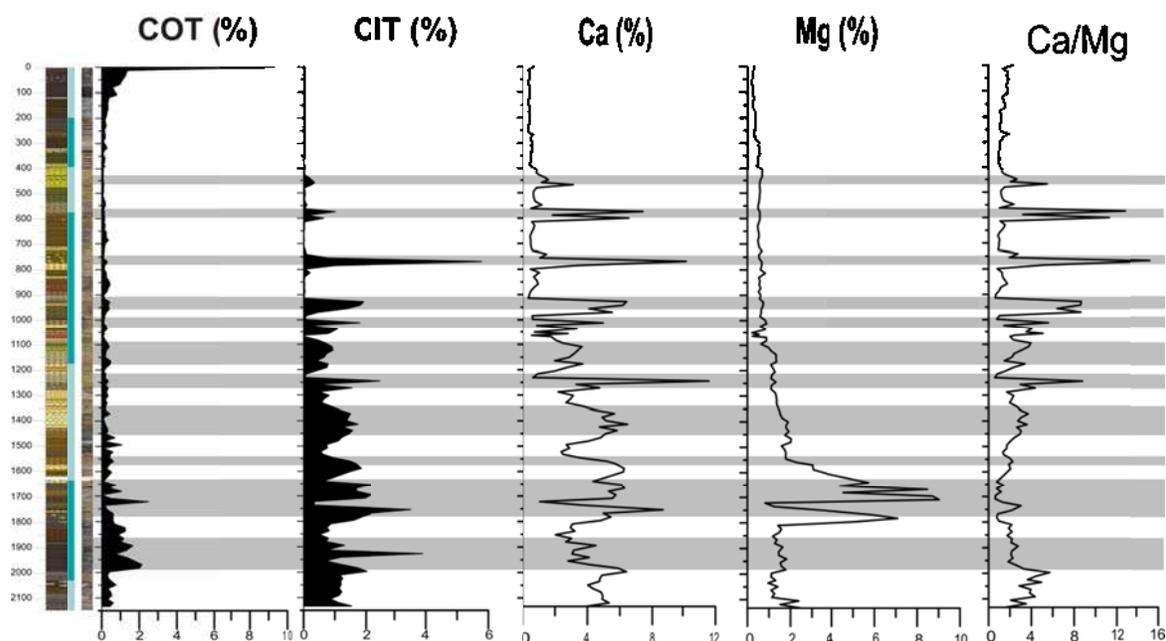


Gráfica 6.- Correlación de COT, CIT, χ , Fe, Ti, Al, K, Ca, Mg, Sr y Ba.



Gráfica 7.- Correlación de COT, CIT, χ , Ca/Al, Ca/Ti, Ca/Mg, Fe/Al, Sr/Ti, Fe/Ti, Mn/Ti, Sr/Ba y Zr/Al.

VII.5) Difracción de Rayos X (DRx)



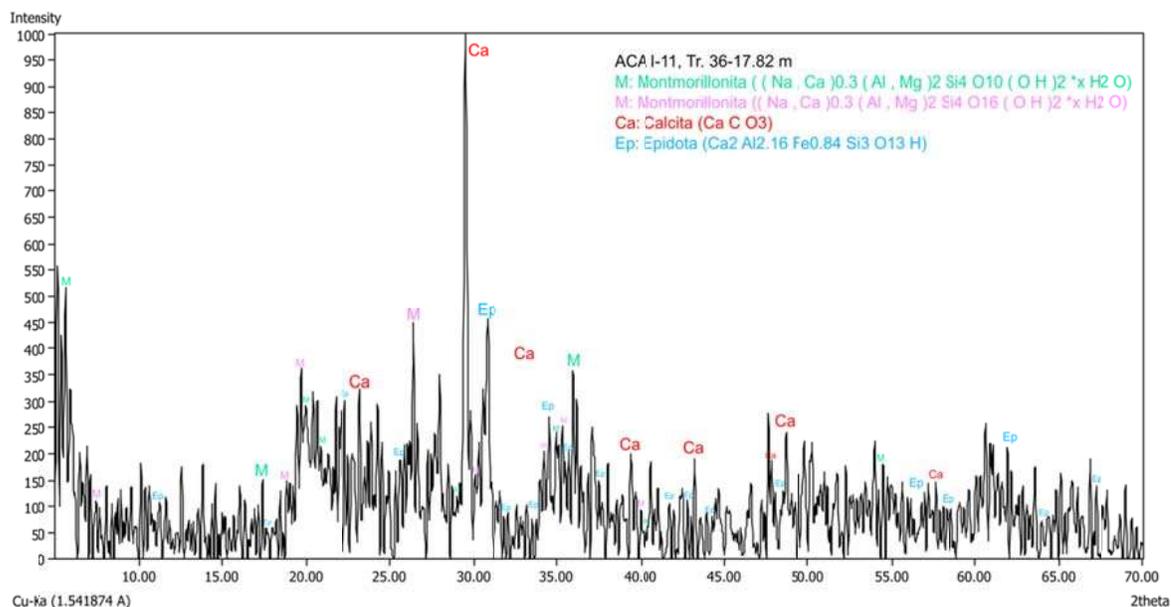
Gráfica 8.- Se muestra la correlación de la columna estratigráfica con los valores de carbón orgánico e inorgánico y las concentraciones de Ca, Mg y Ca/Mg. En barras de color se destacan eventos de sequía más importantes de la secuencia.

Zona	Tr.	Clave en metros	COT (%)	CIT (%)	Ca %	Mg (%)	Ca/Mg	Textura
5	10	4.68	0.11	0.25	3.12	0.57	5.47	Arena
4	13	5.74	0.14	1.01	7.42	0.58	12.79	Arcilla
	14	6.00	0.17	0.65	6.55	0.58	11.29	Arcilla
	16	7.69	0.30	5.78	10.20	0.67	15.22	Limo arcilloso
	19	9.28	0.42	1.92	6.41	0.74	8.66	Arena
		9.42	0.35	1.81	6.20	0.72	8.61	Arcilla
		9.56	0.40	1.37	4.10	0.64	6.41	Limo arenoso
		9.70	0.23	0.47	5.53	0.64	8.64	Limo arenoso
		10.12	0.10	1.80	4.97	0.89	5.58	Limo
	20	10.37	0.29	1.09	3.35	0.83	4.04	Arcilla
	21	10.57	0.15	0.78	2.80	0.55	5.09	Arcilla
22	11.09	0.40	0.91	3.66	0.98	3.73	Limo arcilloso	
23	11.77	0.45	0.78	3.70	1.09	3.39	Limo	
3	24	12.45	0.36	2.53	11.60	1.32	8.79	Limo
	25	12.72	0.34	1.55	4.75	1.09	4.36	Arcilla limosa
	27	13.72	0.44	1.50	5.66	1.53	3.70	Arena limosa
		14.14	0.20	1.74	6.47	1.8	3.59	Arena limosa
	28	14.38	0.33	1.57	5.83	1.92	3.04	Limo arenoso
	30	15.88	0.26	1.85	6.26	3.06	2.05	Limo arenoso
2	33	16.68	0.42	1.70	6.28	8.48	0.74	Arcilla
	34	16.95	0.02	2.17	5.75	8.72	0.66	Arcilla
		17.09	0.46	1.97	5.55	9.02	0.62	Limo
	36	17.54	0.30	3.52	8.66	4.04	2.14	Limo arenoso
		17.82	0.61	1.88	5.44	7.09	0.77	Arcilla
	38	19.27	0.71	3.90	3.06	1.46	2.10	Arcilla
	39	19.97	0.42	2.03	6.41	1.12	5.72	Arena

Tabla 15.- Valores de las fases secas indicadas en la gráfica 8, donde se resaltan siete muestras seleccionadas para DRX (5.74, 7.69, 9.28, 12.45, 16.68, 17.09 y 17.82 m).

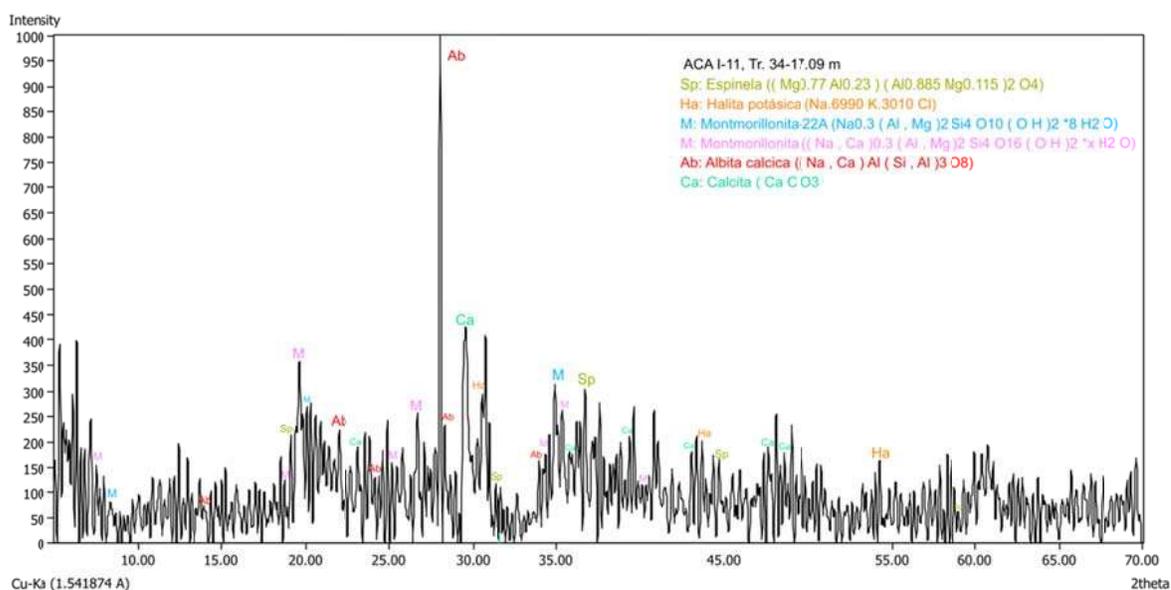
La gráfica 8 fue utilizada para determinar las muestras representativas que serían requeridas para realizarles el análisis de DRX. Debido a que se pretendía conocer el corpotamiento de las fases minerales que estuvieran compuestas principalmente por Ca y Mg (calcita, magnesita y dolomita), para más adelante determinar si durante los eventos de sequía el alto contenido de CIT es de origen autigénico o alogénico. Para poder sugerir la procedencia de los carbonatos se correlacionarían los resultados de DRX con los periodos secos del lago y sus respectivas diatomeas.

En el difractograma de la profundidad 17.82 m (gráfica 9) se aprecian cuatro fases minerales donde la que predominó fue la calcita, mientras que las fases de epidota y montmorillonita fueron en menor cantidad. Cabe mencionar que esta muestra analizada es de arcilla no compacta, presentó valores moderados a altos de Ca (5.44%) y Mg (7.09%), por lo que se esperaba la precencia de fases minerales de magnesita y dolomita, pero no se encontraron.



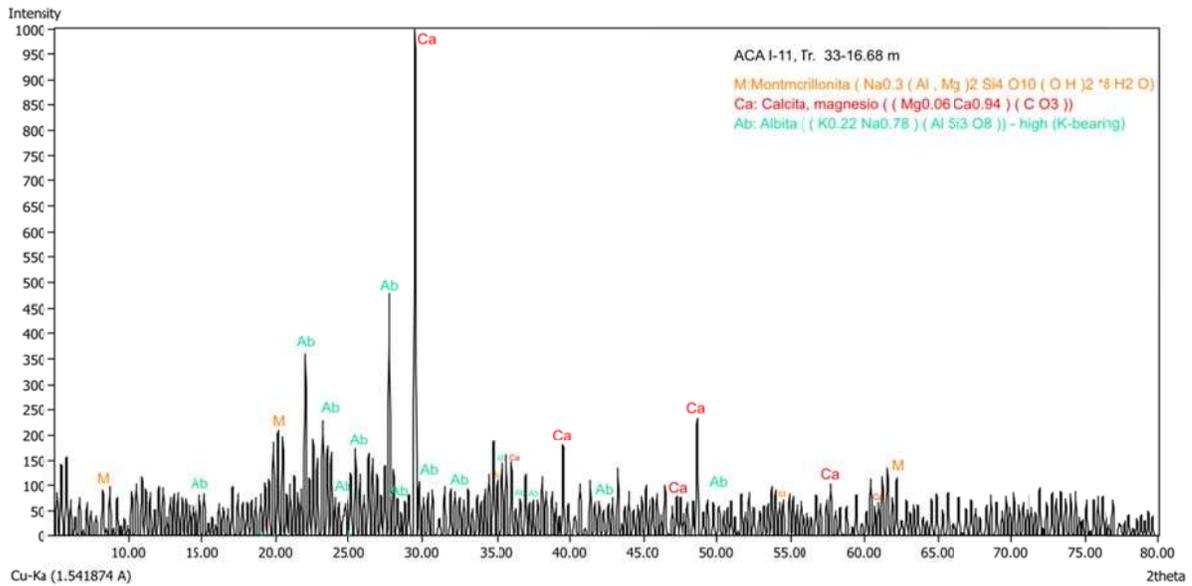
Gráfica 9.- Difactrograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 17.82 m del núcleo ACA I-11.

En el difractograma de la profundidad 17.09 m (gráfica 10) se aprecian seis fases minerales donde la que predominó fue la albita, mientras que en menor cantidad se encontraron las fases de calcita, montmorillonita, espinela y halita. Esta muestra esta conformada por un limo que consta de valores moderados a altos de Ca (5.55%) y Mg (9.02%), por lo que se esperaba la presencia de fases minerales de magnesita y dolomita, pero no se encontraron.



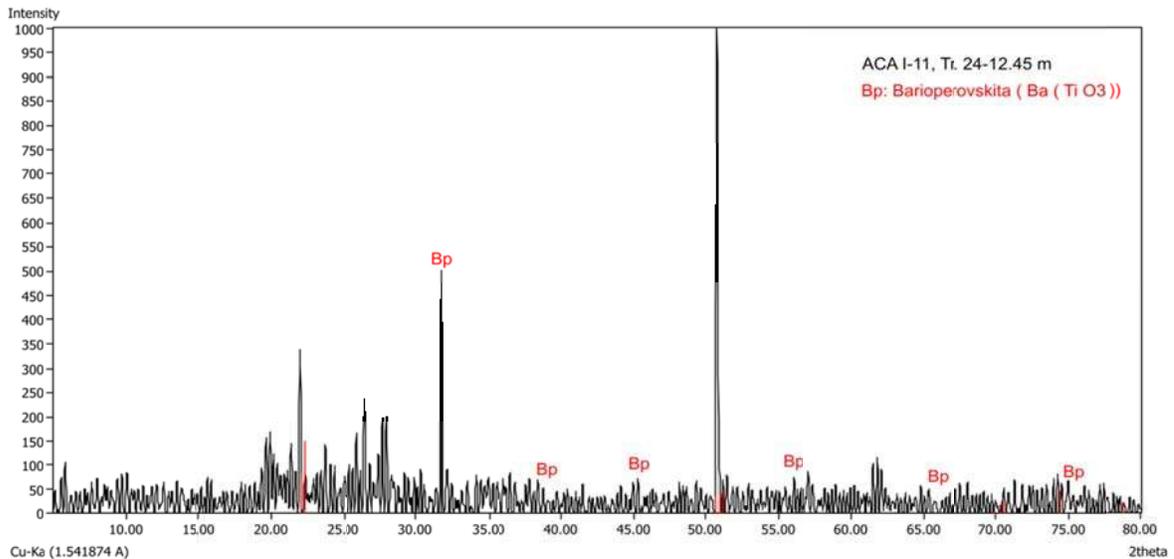
Gráfica 10.- Difractograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 17.09 m del núcleo ACA I-11.

En el difractograma de la profundidad 16.68 m (gráfica 11) se aprecian tres fases minerales donde la que predominó fue la calcita, en menor cantidad la albita y de forma incipiente la montmorillonita. Esta muestra esta conformada por un limo que consta de valores moderados a altos de Ca (6.28%) y Mg (8.48%), por lo que se esperaba la presencia de fases minerales de magnesita y dolomita, pero no se encontraron.



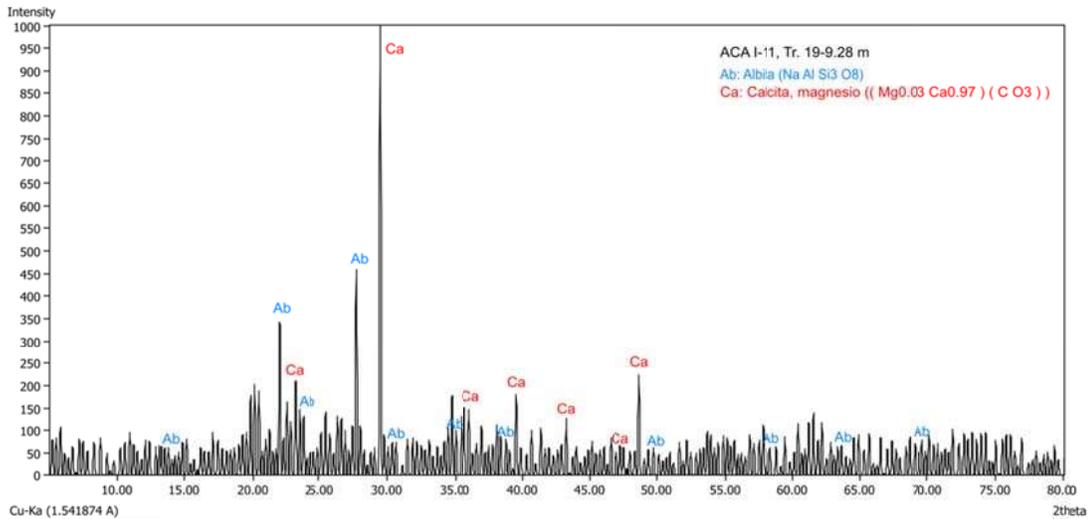
Gráfica 11.- Difactograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 16.68 m del núcleo ACA I-11.

En el difractograma de la profundidad 12.45 m (gráfica 12), se identificó una fase mineral con una intensidad de 500 aproximadamente y un ángulo 2θ de 31.6 (Barioperovskita), ya que la base de datos del difractómetro no pudo localizar la tarjeta de la fase mineral predominante con ángulo 2θ de 50.70 y la fase incipiente de un ángulo 2θ de 22.



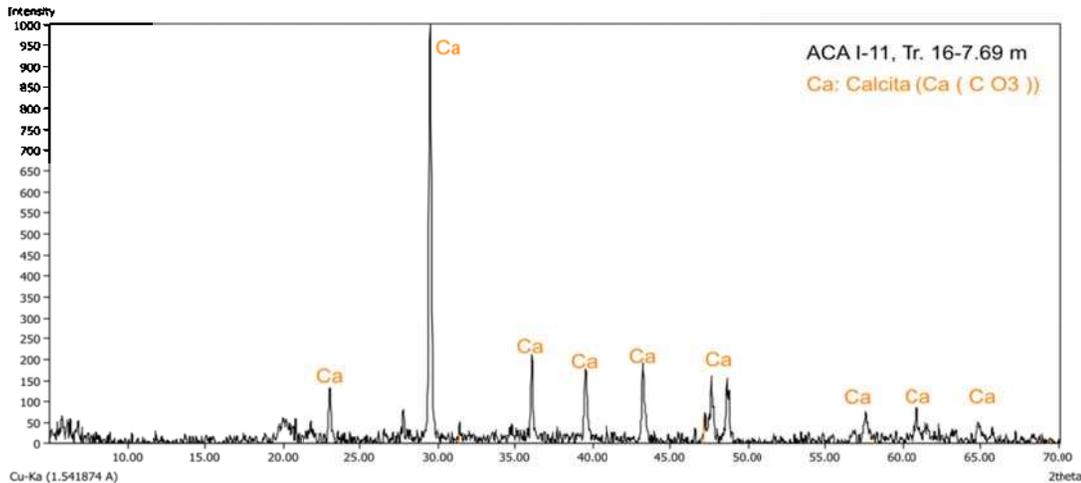
Gráfica 12.- Difactograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 12.45 m del núcleo ACA I-11.

En el difractograma de la profundidad 9.28 m (gráfica 13), se aprecian dos fases minerales donde la que predominó fue la calcita, mientras que en menor cantidad se encontró la fase de albita. Esta muestra está conformada por un limo que consta de alto porcentaje de Ca (11.6%).



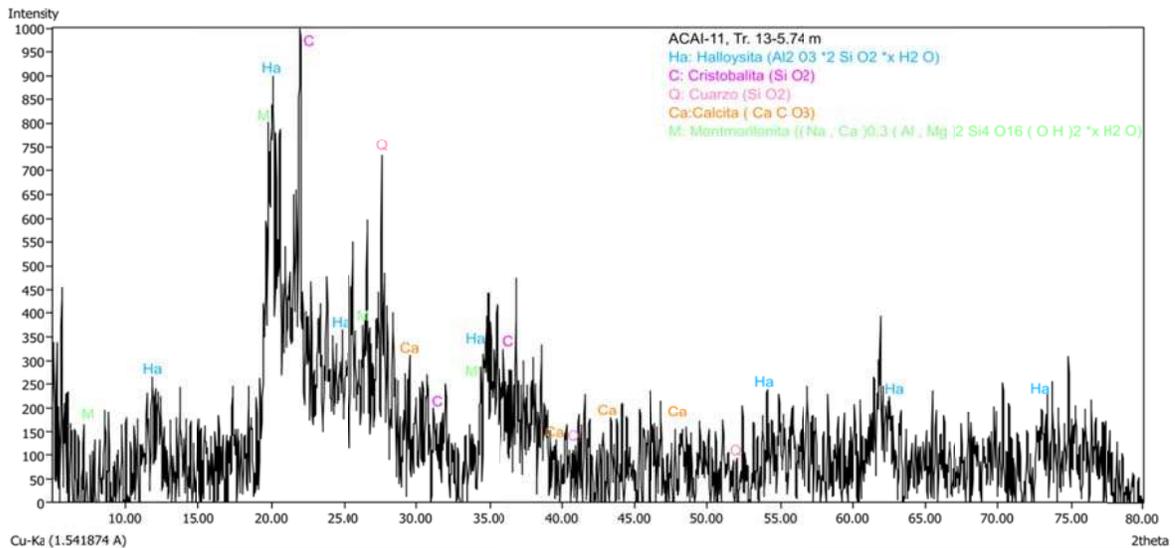
Gráfica 13.- Difractograma que muestra las fases minerales presentes a la profundidad de 9.28 m del núcleo ACA I-11.

En el difractograma de la profundidad de 7.69 m (gráfica 14), se aprecian una fase mineral de calcita, la muestra está conformada por un limo arcilloso que consta de valores altos de Ca (10.20%), Ca/Mg (15.22) y CIT (5.78%).



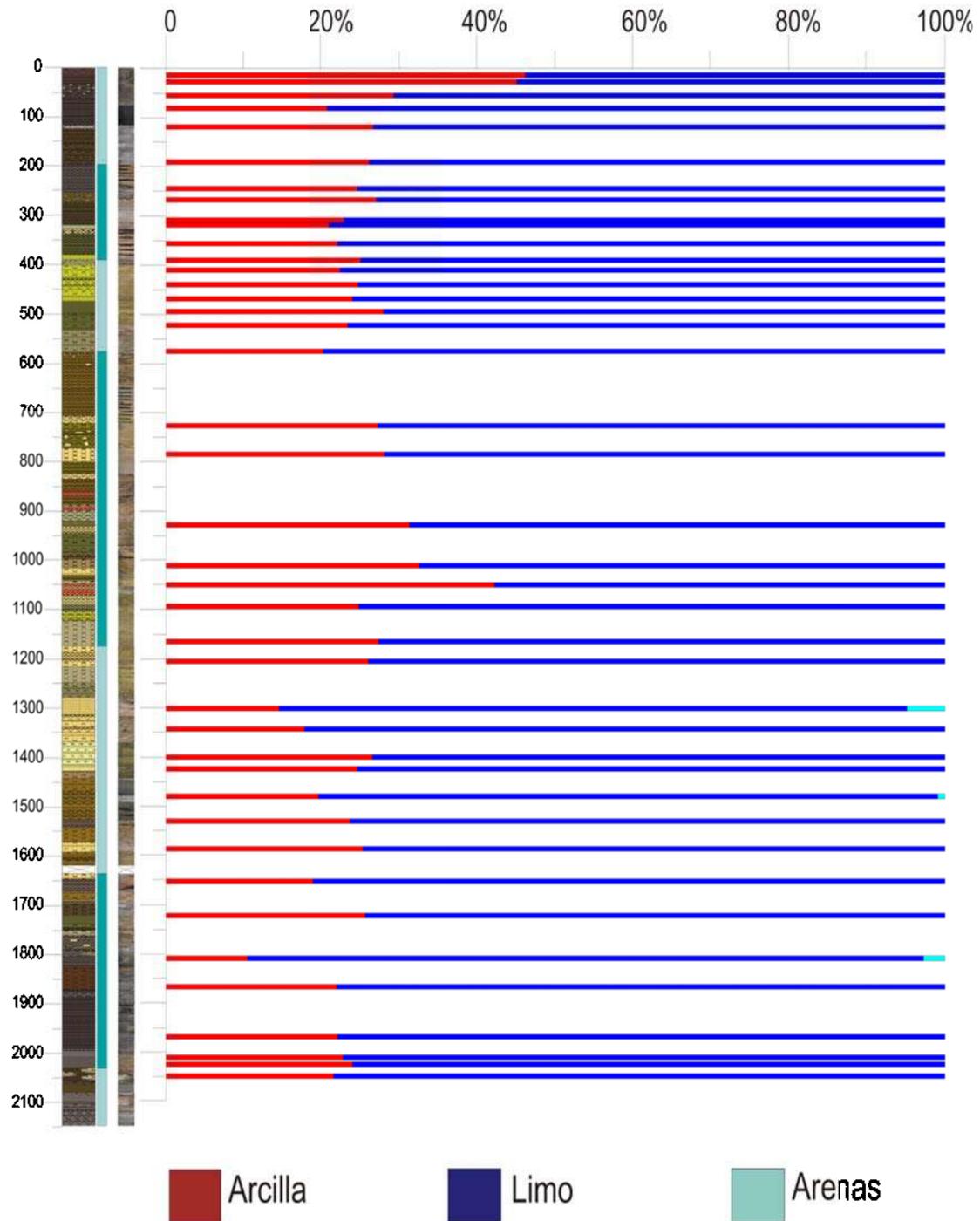
Gráfica 14.- Difractograma que muestra la fase mineral presente a la profundidad de 7.69 m del núcleo ACA I-11.

En el difractograma de la profundidad de 5.74 m (gráfica 15), se aprecian cuatro fases minerales donde la que predominó fue la calcita y la halloysita, en menor cantidad el cuarzo y de forma incipiente la cristobalita y la montmorillonita. Esta muestra la conforma una arcilla con porcentaje alto de Ca (7.42%) y Ca/Mg (12.79%), por lo que se esperaba la presencia de fases minerales de calcita y dolomita, pero no se encontró presente la dolomita.



Gráfica 15.- Difractograma que muestra las fase mineral presente a la profundidad de 5.74 m del núcleo ACA I-11.

VII.6) Análisis Granulométrico



Gráfica 16.- Comportamiento granulométrico de las facies pertenecientes al núcleo ACA I-11.

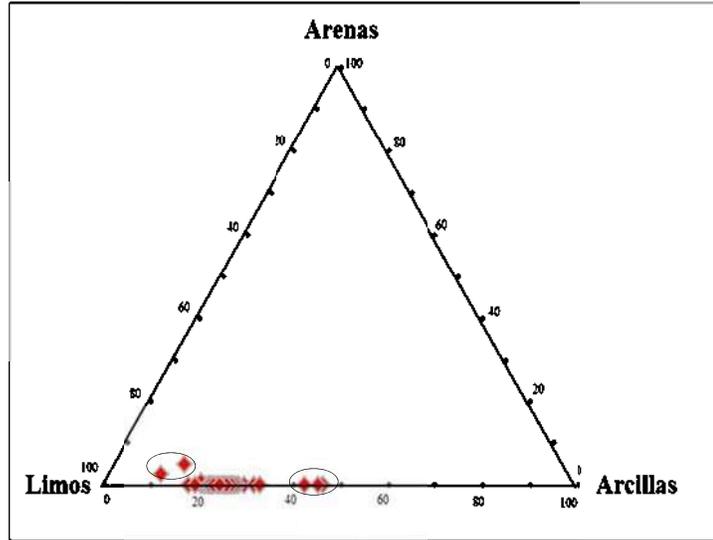
Se realizó el análisis granulométrico a 42 muestras representativas del núcleo de ACA I-11, con la finalidad de conocer el tamaño de partícula de las texturas observadas durante la descripción de la estratigrafía. Cabe mencionar que el equipo solo detectó materiales de granulometría limo arcilloso (gráficas 16 y 17), mientras que los materiales más arenosos se observaron a nivel visual y están representados en las tablas de anexos (XII.1 y XII.3, columna de texturas).

Este estudio revela que el depósito de los sedimentos del núcleo se llevó a cabo en un ambiente con baja energía y alta a media madurez textural, lo que permitirá en conjunto con otros proxies definir ciclos transgresivos o regresivos.

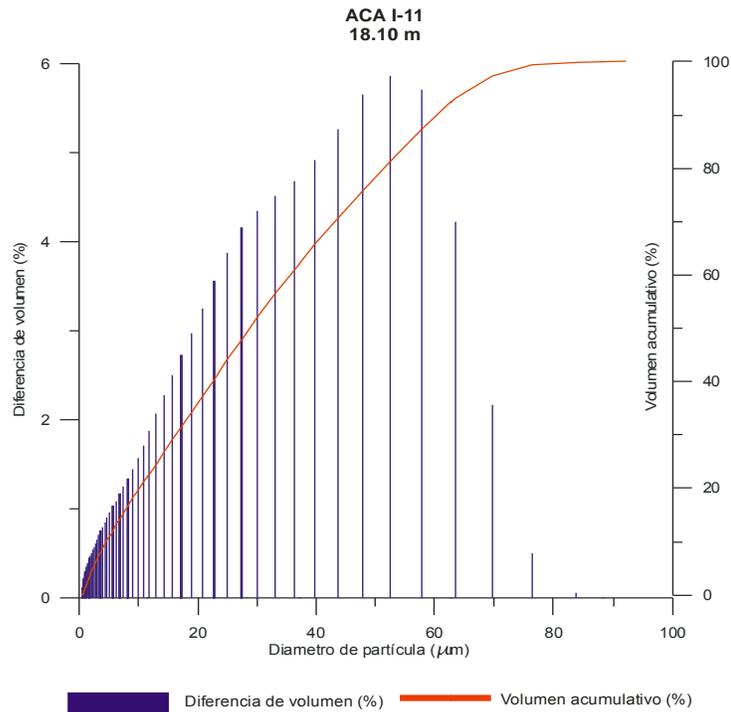
Esta técnica mostró que el núcleo presenta una sedimentación muy homogénea, siendo su comportamiento textural con un predominio de limos y agregados principalmente de tipo arcilloso y en cuatro muestras cercanas a la base, en menor cantidad del tipo arenas (gráfica 16), en correspondencia con las fases más áridas a los 18 m y entre los 15-13 m. Los mayores porcentajes de arcillas se observan en el centro del núcleo en correspondencia con las fases más profundas y húmedas (ver análisis de diatomeas y COT) y en las últimas fases de ciénega.

Las arenas corresponden a material con granulometría fina (Tabla 2), muy deleznable, posiblemente a material volcánico depositado *in situ*. Resalta una alta madurez textural destacando los minerales de cuarzo y feldespatos, además de, minerales opacos.

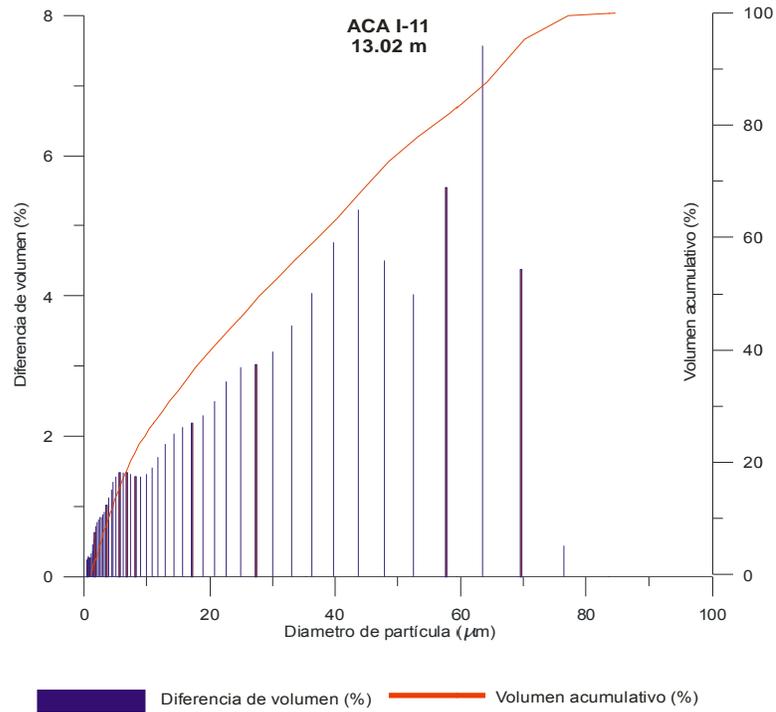
Los resultados del análisis de tamaño de partícula se presentan a partir de los datos obtenidos, donde se observa un predominio de limos (gráfica 17).



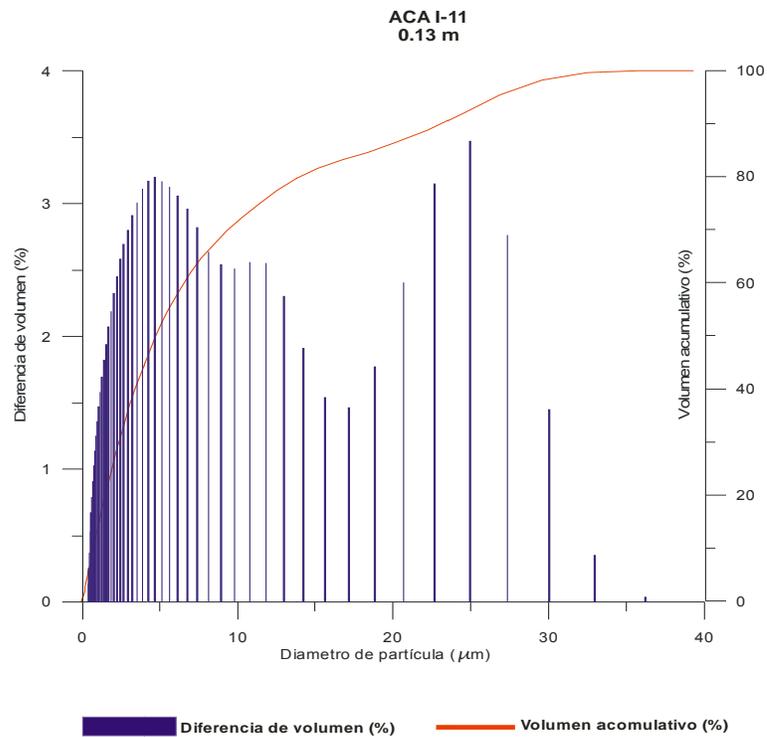
Gráfica 17.- Diagrama ternario de la textura de los sedimentos de acuerdo a los diferentes tamaños de partícula (Arcillas, Limos y Arenas) que conforman al núcleo ACA I-11.



Gráfica 18.- Comportamiento trimodal de la base (18.10 m) del núcleo ACA I-11.



Gráfica 18.- Comportamiento trimodal de la parte central (13.02 m) del núcleo ACA I-11.



Gráfica 19.- Comportamiento trimodal de la cima (0.13 m) del núcleo ACA I-11.

Zona	Tramo	Prof. (m)	Arcilla	Limo	Arena
7	1	0.13	46.20	53.80	0
		0.26	45.10	54.90	0
	2	0.54	29.30	70.70	0
	3	0.80	20.90	79.10	0
	4	1.18	26.70	73.30	0
6	5	1.91	26.20	73.80	0
	6	2.45	24.7	75.3	0
		2.68	27.1	72.9	0
	7	3.08	23	77	0
		3.18	21.1	78.9	0
8	3.56	22.2	77.8	0	
5	9	3.90	25.1	74.9	0
		4.10	22.5	77.5	0
	10	4.39	24.8	75.2	0
		4.68	24.1	75.9	0
	11	4.94	28	72	0
5.22		23.5	76.5	0	
4	13	5.74	20.4	79.6	0
	15	7.27	27.3	72.7	0
	17	7.85	28.1	71.9	0
	19	9.28	31.3	68.7	0
		9.84	28.1	71.9	0
		10.12	32.5	67.5	0
	20	10.51	42.3	57.7	0
	22	10.95	24.9	75.1	0
11.65		27.4	72.6	0	
3	23	12.05	26.1	73.9	0
	26	13.02	14.5	80.7	4.8
		13.44	17.7	82.3	0
	27	14.00	26.6	73.4	0
	28	14.24	24.7	75.3	0
	29	14.80	19.8	79.3	0.9
	30	15.32	23.8	76.2	0
15.88		25.4	74.6	0	
2	33	16.54	19.1	80.9	0
	35	17.22	25.7	74.3	0
	36	18.10	10.5	86.8	2.7
	37	18.66	22.1	77.9	0
	38	19.69	22.2	77.8	0
	39	20.11	22.9	77.1	0
20.25		24.1	75.9	0	
1	40	20.49	21.7	78.26	0.04

Tabla 16.- Resultados obtenidos en porcentajes del tamaño de partícula del análisis granulométrico.

VII.7) Identificación de Diatomeas

En el núcleo estudiado se observaron un total de 21 géneros (*Aulacoseira*, *Amphora*, *Anomoeonis*, *Campylodiscus*, *Cocconeis*, *Craticula*, *Cyclotella*, *Cyclostephanos*, *Cymbella*, *Denticula*, *Epithemia*, *Eunotia*, *Fragilaria*, *Hantzchia*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Pinnularia*, *Rhopalodia*, *Stephanodiscus*, *Surirella*), entre las que figuran las centrales y las pennales. De 160 muestras analizadas 23 muestras no presenta diatomeas en las profundidades de 20.25, 17.09, 16.95, 16.54, 10.69, 10.64, 3.28, 2.58 y entre los 2.03-0 m; en 12 muestras solo se apreciaron fragmentos de diatomeas y 125 muestras presentan diatomeas con piezas completas y fragmentos en algunos casos.

A partir del inventario taxonómico se distinguieron las asociaciones de diatomeas correspondientes a cada cambio en el nivel lacustre desde la base hacia la cima. A los conjuntos de las asociaciones de diatomeas se les asignaron sus afinidades ecológicas en base a la información bibliográfica del modo de vida de los distintos taxones con apoyo de la base de datos del OMINIDIA, Lecoingt *et al.*, (1999), Gasse (1980), Krammer y Lange Bertalot (1988, 1997a y b, 2004a y b), (Tabla 18).

ASOCIACIONES DE DIATOMEAS CARACTERISTICAS	INTERPRETACION AMBIENTAL
<i>Stephanodiscus</i> , <i>Cyclotella</i> , <i>Aulacoseira</i>	Aguas profundas y turbias
<i>Stephanodiscus</i> , <i>Fragilaria construens</i>	Aguas menos turbias y alcalinas
<i>Aulacoseira granulata</i> , <i>Stephanodiscus</i> , <i>niagarae</i>	Descenso del nivel lacustre a partir de un lago con tendencia a profundo
<i>Cymbella cistula</i> , <i>C. próxima</i> , <i>Epithemia</i> , <i>sorex</i> , <i>Navicula</i> , <i>Nitzschia</i> , <i>amphibia</i>	Ciénega o lago de aguas bajas con abundante vegetación
<i>Aulacoseira granulata</i>	Aumento de la turbidez
<i>Cocconeis palcentula</i> , <i>Epithemia adnata</i> , <i>Navicula cryptocephala</i> - <i>nav aff viridula</i>	Lago con influencia de energía de corrientes y vegetación acuática
<i>Eunotia bilunaris</i> y <i>Eunotia monodon</i>	Pantano con alta productividad orgánica
<i>Rhopalodia gibba</i> , <i>R gibberula</i> , <i>Hantzschia</i> , <i>Denticula valida</i> , <i>Amphora ovalis</i>	Lago de aguas muy bajas con periodos de sequía
<i>Campylodiscus</i> , <i>Surirella</i> , <i>ovalis</i> , <i>S.brevissonii</i> , <i>Denticula valida</i> , <i>Anomoeoneis sphaerophora</i> , <i>Craticula cuspidata</i>	Lago con alta concentración iónica

Tabla 17.- Los hábitats preferentes en el ambiente lacustre (Gasse, 1980).

Espectro de pH	Acidobiótico Acidófilo Neutral Alcalófilo Alcalibiótico	Menos de 5.5 Menor de 7 Alrededor de 7 Sobre 7 Aguas alcalinas
Espectro de salinidad (concentración de sales, mg/l)	Oligohalobio • Halófilo • Indiferente • Halófilo Eurihalobio	- Formas de aguas dulces menores de 5,000 - Estimulado por pequeñas concentraciones - Tolerantes a pequeñas concentraciones - No tolerante a pequeñas concentraciones - Amplio rango
Espectro de corriente	Limnobiótico Limnófilo	Solo aguas estancadas Aguas estancadas, pueden estar en aguas corrientes
Hábitat general	Lago Posa	Cuerpos continentales de aguas estancadas Pequeños cuerpos de agua estancadas
Forma de vida	Euoplanctónico Ticoplanctónico Perifítico Epipélico Epilítico Epifítico Béntico Libre	-Suspendido en el agua -Adherido en una fase de su desarrollo y posteriormente en forma planctónica. -Sobre sustrato y sumergido sobre objetos -Sobre lodo -Sobre rocas -Sobre plantas -Normalmente sésil en el fondo -Motil
Espectro de temperatura (T°C)	Eutermal Mesotermal Oligotermal Estenotermal Metatermal Euritermal	Aguas calientes, 30° Aguas templadas, 15 a 30° Aguas frías, 0 a 15° Angosto rango de variación en temperatura 5 a 15° Amplio rango de variación en temperatura

Tabla 18.- Variables ambientales en la región de estudio (según LOWE 1974).

Se describen las diatomeas características de cada nivel estratigráfico y de sus relaciones con las facies sedimentarias y los demás marcadores paleoambientales. Es importante mencionar que siendo un lago muy homogéneo en su sedimentación, en varios niveles las zonas de diatomeas no muestran una relación directa con las zonas litológicas, por esta razón se realiza una zonación más acorde con los cambios en las asociaciones de diatomeas y cuando es posible la información generada se correlaciona con otros proxies. Además, en las tablas (ANEXO- XII.3) de resultados de diatomeas se indica la dominancia (D), sub-dominancia (SD) y especies acompañantes (X) de los taxas, así como también cuando una especie está fragmentada (F), si son escasos los fragmentos (FE) y si son escasas las diatomeas (E).

Las asociaciones de diatomeas características que permiten hacer interpretaciones paleoambientales se describen en la tabla 17 y 18. Cabe resaltar que los espectros en los que se desarrollaron las especies observadas corresponden en cuanto al pH a hábitats de aguas neutrales acidófilas en muy pocos niveles (*Eunotia*), siendo comunes los espectros neutrales a alcalífilos. En cuanto a la salinidad son indiferentes a halófilas sobre todo en la base del núcleo, siendo característica *Campylodiscus*. Las diatomeas ocuparon un lago de aguas bajas siendo dominante el hábitat ticoplanctónico a perifítico, donde se desarrollaron especies que requieren un cinturón de macrofitas para su desarrollo. En cuanto al espectro de temperatura se trata de especies mesotermales.

VIII. DISCUSIONES

VIII.1) Descripción de la evolución de la sedimentación en el depocentro de la cuenca.

El propósito de esta investigación fue documentar la variabilidad climática y ambiental de los sedimentos lacustres de la región de Acambay, mediante la interpretación de indicadores paleoclimáticos (*proxies*) durante el Pleistoceno Superior-Holoceno a través del análisis de un núcleo de sedimentos lacustres (ACA I-11) de 21.48 m. Los fechamientos del núcleo están en proceso.

A partir de las 160 muestras analizadas y sus relaciones entre los distintos *proxies* (litología, diatomeas, CIT, COT, χ , relación de iones mayores y mineralogía), se individuaron 7 zonas que se asocian a 7 fases de evolución lacustre. Cabe resaltar que niveles turbosos se encuentran presentes a los 3.85 y 1.14 m, además de presentar 4 niveles de material volcánico en las profundidades de 10.60, 10.50, 8.90 y 8.70 m.

Los gráficos de Carbono Orgánico Total, hierro, titanio, aluminio y potasio muestran bajos valores de la base del núcleo hasta los 17.22, mientras que de los 17.22 hacia la cima del núcleo los valores de Fierro Titanio y Aluminio se incrementan, esta tendencia puede asociarse a la disponibilidad de material volcánico para lixiviarse y convertirse en sedimento.

La constancia de los elementos mayores alogénicos conservativos a lo largo de todo el núcleo indican que la roca madre fuente de aporte de la sedimentación lacustre fue de afinidad andesítica resaltando la presencia de aluminio y potasio. Esta respuesta es consistente con los minerales más característicos en los difractogramas, ya que están asociados a rocas ígneas de composición básica a intermedia, siendo comunes la albita cálcica, espinela y montmorillonita producto de la lixiviación de las rocas

volcánicas del entorno. Particularmente basaltos andesíticos se encuentran en el borde occidente de la cuenca en el flanco del volcán San Pedro y al Sur de la cuenca.

La evolución detallada del lago se desglosa a partir del análisis de las diatomeas, que en conjunto con el análisis de los demás “proxies” analizados permiten identificar las siguientes fases de evolución del lago, ver gráfica 17:

VIII.1.1) FASE 1.- Lago de aguas bajas a muy fluctuante con alta concentración iónica

21.33 - 21.05 m.- Presencia de especies características de aguas salinas (*Campylodiscus*, *Rhopalodia*, *Surirella*, *Nitzschia*), el CIT, la χ , K y Mg son muy fluctuantes. Lago muy fluctuante.

20.91 - 20.63 m.- Al inicio de este nivel, se observa un aumento en la susceptibilidad magnética correspondiente a una textural arenosa probablemente asociado al ingreso de aporte terrígeno, que profundiza ligeramente el lago para establecer una ciénega de aguas bajas que se mantiene estable pero salina, esta interpretación se basa tanto en las diatomeas dominantes *Rhopalodia* y *Stephanodiscus* y se acompañan con formas de aguas salinas. Se mantienen altos niveles de calcio y de CIT.

20.49 - 19.97 m.- Las facies sedimentarias inician con limos arenosos que hacia la cima se vuelven más arenosas. Se observa una mezcla de formas de aguas profundas (*Stephanodiscus*) con formas de aguas bajas (*Rhopalodia*). El carbono inorgánico y el calcio presentan valores altos infiriendo por lo tanto una corta fase transgresiva seguida por una fase regresiva.

19.97 - 18.10 m.- Las facies sedimentarias van de arcillas en la base y en forma transicional pasan a un limo arcilloso para finalmente convertirse en un limo. Las

diatomeas características en este intervalo son *Campylodiscus* como taxa dominante siendo acompañada por *Denticula* y *Rhopalodia*. La concentración iónica es muy fluctuante en este intervalo, mientras que la susceptibilidad magnética es baja, siendo interrumpida esta tendencia solamente a los 19.13 m donde aumenta, para dar lugar al descenso del CIT y del calcio, mientras que las diatomeas presentan alta fragmentación. La fragmentación en correspondencia a un lago de aguas muy bajas puede asociarse a algún evento sísmico en esta zona donde este proceso es muy común.

18.10 - 17.96 m.- Las facies sedimentarias son arcillosas siendo las formas dominantes *Aulacoseira*, *Campylodiscus* y *Epithemia*. Los niveles de TIC y Ca, son bajos, sin embargo las asociaciones de diatomeas indican un aumento de la turbidez, una ligera profundización del lago y por lo tanto disminución de la salinidad para el establecimiento de un cinturón de vegetación abierta donde se desarrolló *Epithemia*.

17.96 - 17.36 m.- Las facies sedimentarias corresponden arcillas que pasan a facies limo arenosas. Las diatomeas en este intervalo se encuentran muy fragmentadas y escasas siendo comunes aquellos de *Surirella*, *Nitzschia* y *Campylodiscus*. El calcio, aluminio y fierro ascienden sin embargo la susceptibilidad magnética no muestra un gran incremento en sus valores. El carbono orgánico total se encuentra bajo y el CIT aumenta.

17.36 - 16.40 m.- Las facies sedimentarias corresponden a intercalaciones de limos y arcilla, siendo la zona central de este intervalo caracterizada por la presencia de *Aulacoseira*, *Nitzschia* y *Navícula*. Los valores de carbono inorgánico son altos al igual que el calcio y magnesio. Es característica la conservación de *Aulacoseira* sugiriendo un hábitat con tendencia a descender la concentración iónica y por lo tanto se infiere una corta fase de mejoramiento en las condiciones del lago.

16.40 - 16.02 m.- Corresponde a una arcilla fina con un incremento en el Carbono orgánico total. La forma dominante es de *Surirella*, viene acompañada por *Navicula*,

Nitzschia y *Epithemia* sugiriendo un continuo mejoramiento del hábitat lacustre hacia aguas más abiertas, no obstante este criterio, la presencia de *Surirella* como forma más abundante sugiere cierta salinidad.

16.02 - 15.60 m.- Las facies pasan a un limo arenoso, los taxa se presentan muy fragmentados en la mayoría de las muestras, *Campylodiscus* y *Epithemia*. Esta última caracterizando un hábitat perifítico con abundante vegetación acuática

VIII.1.2) Fase II.- Establecimiento de una ciénaga fluctuante que paulatinamente pasa a un cuerpo de agua cada vez más profundo

15.60 - 14.80 m.- Pasa a un limo arcilloso y cambian los valores del CIT, Ca y Mg que muestran un descenso importante (ver gráfica 6). *Campylodiscus* y *Nitzschia* siguen presentando fragmentación por lo tanto se infiere un hábitat muy inestable.

14.80 - 13.72 m.- La sedimentación consiste en arena fina y los taxones característicos, *Aulacoseira*, *Navicula* y *Stephanodiscus* sugieren un incremento del tirante de agua con lixiviación importante de iones lo que incrementa los valores de Ca.

13.72 - 12.88 m.- Las facies pasan de limo arenosas a arenosas finas. Los valores de CIT y calcio al igual que la susceptibilidad son bajos, siendo *Campylodiscus* dominante; Este taxa sin embargo se asocia a *Aulacoseira*, *Navicula*, *Nitzschia* y *Epithemia* de aguas más diluidas. Valores altos de fierro, aluminio y potasio sugieren que continúa el aporte detrítico a la cuenca.

VIII.1.3) Fase III.- El más alto nivel lacustre y estabilidad

12.88 - 10.82 m.- Las facies se vuelven más homogéneas de limos finos a arcillosos. Es característico el descenso en el carbono inorgánico, el calcio y magnesio. El taxa

dominante a lo largo de este intervalo es *Aulacoseira* y se asocia con *Navícula* y *Stephanodiscus* en la base. Cabe resaltar el incremento en la susceptibilidad magnética a los 11.77 m en correspondencia con altos valores de fierro, aluminio y potasio. Este aumento en la susceptibilidad magnética está directamente relacionado a una fragmentación de las frústulas de diatomeas. Este episodio lacustre sugiere una importante contribución en la humedad en la cuenca un hábitat más estable al inicio y final de este episodio con incremento importante de la profundidad del lago.

10.82 - 10.51 m.- Se presenta una fase de actividad volcánica, la observación del material al microscopio óptico y lupa binocular sugiere un depósito de caída *in situ*. El material consiste en una ceniza fina constituida por una dominancia de material pumicitico y con algunas plagioclasas, muy homogénea sin presencia de otros líticos acompañantes, sobre todo en el centro de este intervalo. En correspondencia a este evento se observa un incremento en la susceptibilidad magnética al igual que los valores de fierro, aluminio y potasio. En este depósito *Aulacoseira*, *Navícula* y *Epithemia* asociado a fragmentos de *Stephanodiscus* sugiere un lago que recibía el aporte de la ceniza sin colmatarse.

10.37 - 7.85 m.- Las facies consisten en un limo arenoso que pasa hacia los 8.86 m a una sucesión de limos arcillosos intercalados con arcilla. Las diatomeas están caracterizadas por *Stephanodiscus* y *Navícula* que se alterna en ocasiones con *Nitzschia* y *Epithemia*. Se detecta una fase de descenso del nivel lacustre al centro de este intervalo (9.14m) donde la forma dominante es *Eunotia* que tiene como formas subdominantes *Navícula* y *Fragilaria* como forma ticoplanctonica. Tanto el COT como el CIT se mantienen bajos, los niveles de susceptibilidad magnética tienden a ser bajos con dos picos discretos en correspondencia con ciclos de aporte de terrígenos. Estos terrígenos acompañados de una constancia de los taxones de aguas profundas sugieren un cuerpo de agua con alta permanencia por varios miles de años. Este es el periodo donde el lago experimenta su mayor tirante de agua.

VIII.1.4) Fase IV.- Descenso rápido para dar paso a un lago turbio de cierta profundidad

7.85 - 7.69 m.- Siguen siendo característicos los limos arcillosos, se observa un pico alto de CIT en correspondencia a un alto nivel de calcio. Las formas características pasan a ser de ambientes epifíticas donde domina *Nitzschia* siendo subdominante *Denticula* este episodio marca el inicio de un descenso rápido del nivel del lago.

7.69 - 5.62 m.- De 7.69 a 5.62 m se observa como la litología que predomina es una arcilla plástica donde las diatomeas dominantes se asocian a otras formas fragmentadas, sobre todo entre 5.62 y 5.70 m, donde la susceptibilidad magnética asciende.

VIII.1.5) Fase V.- Segundo y último nivel lacustre alto por un período de tiempo corto

Hacia la cima hasta los 4.10 m las diatomeas alternan de *Aulacoseira* a *Navicula* con formas acompañantes.

En un corto intervalo se torna a un hábitat más pantanoso a los 5 m, donde se desarrolla *Eunotia* acompañada por *Navicula*, sin embargo hacia la cima de este episodio lacustre el lago se restablece para incrementar su segundo nivel lacustre alto a lo largo de su historia en la cuenca. Resaltan valores bajos de calcio, CIT y COT, a excepción de la susceptibilidad magnética que aumenta a los 4.80 m, acompañando este incremento a una fragmentación de las valvas, es posible que se trate de un segundo evento sísmico que se registra en un lago de aguas tendientes a profundizarse o bien un ingreso fluvial con alta energía que fragmentó las valvas.

VIII.1.6) Fase VI.- Último descenso del nivel lacustre-ciénaga de aguas bajas y alcalinas

4.10 – 3.56 m.- En este intervalo las facies sedimentarias pasan de limo arenosas en la base hacia arcillosas en la cima. Las diatomeas en correspondencia de estas facies son *Navícula* acompañadas de *Aulacoseira* indicando un aumento de la turbidez, aunque también es común *Eunotia* indicando un incremento en las condiciones de acidez lo que indica una ciénega fluctuante.

3.56 - 2.88 m.- Las facies arcillosas empiezan a dominar y se observan una redistribución en las comunidades de diatomeas donde *Navícula* y *Epithemia* marcan el establecimiento de una ciénega de aguas más diluidas que en el intervalo anterior.

2.88 - 2.17 m.- La litología dominante es arcillosa, sin embargo presenta manchones negros sugiriendo un redepósito de los materiales, en este intervalo las diatomeas se presentan muy fragmentadas. *Nitzschia* y *Aulacoseira* son comunes. Los niveles de CIT y COT se mantienen bajos.

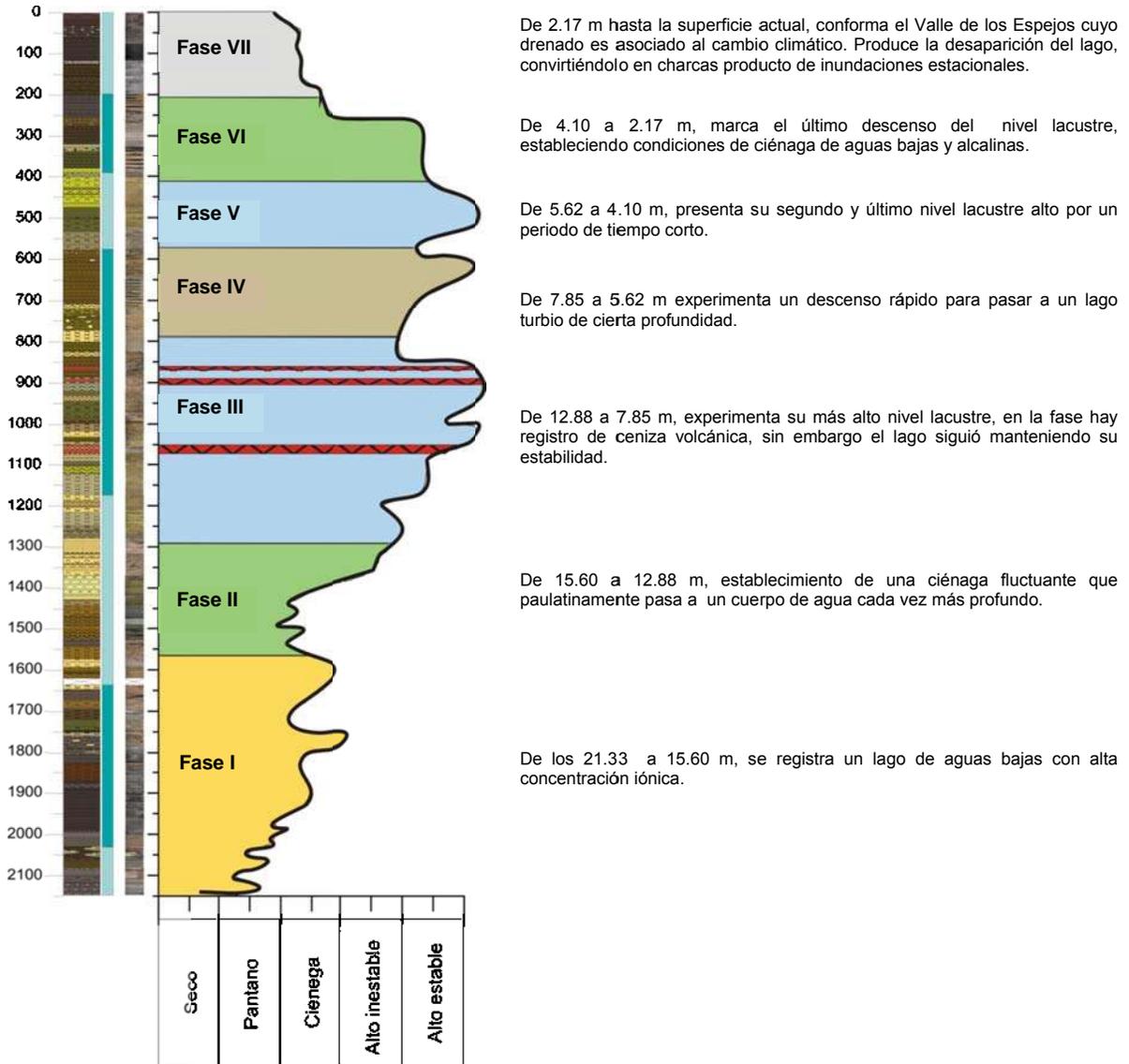
VIII.1.7) Fase VII.- Conformación de la Ciénega de los Espejos

En los últimos dos metros de evolución del lago, el registro sedimentario corresponde a intercalaciones de arcillas y limos, se presenta un incremento en los valores de COT, y la susceptibilidad magnética es baja manifestando un pico importante a 1.90 m. No aparecen diatomeas en este episodio sugiriendo que no existió la sílice necesaria para la conformación de las frústulas.

El antiguo lago de Acambay en los últimos cientos de años (de dos metros a la actualidad), se convierte en lo que se observa hoy en día, un lago de aguas bajas que

se inunda episódicamente en períodos lluviosos, sin embargo no mantienen el tirante de agua necesario para producir las condiciones para el desarrollo de diatomeas.

En resumen la evolución del lago se esquematiza en la gráfica 17, donde se observa que el lago experimentó siete fases a lo largo de su historia.



Gráfica 20.- Evolución sedimentológica del paleo-lago Espejos, mediante el análisis de diatomeas.

VIII.2) Correlación del Valle de los Espejos con otras cuencas

A pesar de que no existen aún fechamientos del núcleo ACA I-11 extraído del depocentro del Valle de los Espejos, es posible realizar algunas comparaciones con secuencias sedimentarias (núcleos) de cuencas lacustres localizadas en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), las cuales han brindado evidencias sobre el cambio climático y ambiental durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Cabe mencionar que algunas secuencias sedimentarias presentan hiatos en su sedimentación (Texcoco, Cuitzeo, Tecocomulco y Zirahuén).

La región con una configuración tectónica y latitud más semejante al graben de Acambay es la zona lacustre de Cuitzeo y Zacapu que se incluyen dentro del sistema de grabens de Chapala-Tula. Al observar la sedimentación y la curva paleoambiental de los lagos de Cuitzeo y Zacapu, se lograron realizar algunas comparaciones paleoambientales con el Valle de los Espejos.

La base del núcleo de Acambay presenta condiciones de concentración iónica sustentadas por la presencia de *Campylodiscus*, mientras que Cuitzeo presenta condiciones más diluidas (Israde-Alcántara *et al.*, 2010).

En el Valle de los Espejos entre los 21.48 a 9 m se observa un clima seco, al igual que en Cuitzeo de 24 a 12 m (Israde-Alcántara *et al.*, 2010). Cabe mencionar que entre los 18 y 16 m, ambas secuencias sedimentarias presentan un incremento en las concentraciones de Ca, Mg y CIT. Además, una fase intermedia con fluctuaciones de humedad donde el paleolago de Acambay experimentó su más alto nivel lacustre se observa entre los 15 y 13 m de ambos núcleos. Esta fase de humedad puede asociarse al final del estadio isotópico 5a, por lo que en ambos puede inferirse que corresponden al último interglaciario, el cual está caracterizado por condiciones cálidas y húmedas (Imbrie *et al.*, 1992).

En el Valle de los Espejos entre los 12 a los 10 m, el lago experimentó su más alto nivel lacustre manteniendo estabilidad el lago. Entre los 52 y 35 ka en Zacapu (Ortega *et al.*, 2002) establecen condiciones relativamente húmedas; en Cuitzeo a profundidades similares a los 50 ka también se observa una pequeña fase húmeda (Israde-Alcántara *et al.*, 2010);

Entre los 35 y 18 ka Cuitzeo (Israde-Alcántara *et al.*, 2010) presenta una tendencia a sequías semejantes a las cuencas de Zacapu y Chalco (Caballero y Ortega, 1998), semejantes a la cuenca de Acambay a los 7.69 m (UMG) presentó condiciones secas con niveles lacustres bajos.

Una evidencia del cambio climático es la comparación de las secuencias lacustres con los estudio de glaciares de montañas, donde determinan que durante el UMG se desarrollaron condiciones climáticas más húmedas en los extremos oriental y occidental en el CVTM, mientras que en el centro menos húmedas (Caballero *et al.*, 2010). Esto coincide con la hipótesis de Bradbury (1997, 2000), quien sugiere un desplazamiento hacia el sur de los vientos del oeste durante el UMG, causando incremento en la humedad hacia el centro-occidente de México, explicando los altos niveles lacustres del lago de Pátzcuaro para este período.

Esta hipótesis no coincide con las evidencias paleoecológicas obtenidas en varios lagos del occidente (Zacapu y Cuitzeo) y centro (Tecocomulco, Texcoco y Chalco) del CVTM, donde reportan niveles bajos y condiciones secas para el UMG (Caballero y Ortega, 1998; Lozano-García y Ortega-Guerrero, 1998; Sosa-Nájera, 2001; Ortega *et al.*, 2002; Caballero *et al.*, 2002; Lozano-García *et al.*, 2005; Ortega *et al.*, 2010; Israde-Alcántara *et al.*, 2010;). En Zirahuén (aprox. a los 6.50 m), se infieren condiciones frías y secas hacia los 17,000 años A.P (Torres-Rodríguez *et al.*, 2012).

Para el Valle de los Espejos, se infiere que durante el UMG (posiblemente a los 7.69 m de profundidad del núcleo) se presentaron condiciones secas con base a un brusco cambio en el porcentaje del CIT, Ca y niveles lacustres bajos como indican las diatomeas.

En Cuitzeo (entre 6 y 2 m) las condiciones secas se establecen con vegetación halófila dentro del polen y las diatomeas (Israde-Alcántara *et al.*, 2010), y en Acambay se observa una marcada erosión a esa misma profundidad, en base a la susceptibilidad magnética.

En Cuitzeo (entre ca. 3 y 2 m de profundidad corresponde a ca. 10 ka), los valores altos de carbonato de calcio y diatomeas características indican fases de clima seco y bajos niveles lacustres hasta el Holoceno medio (Israde-Alcántara *et al.*, 2010), lo que puede asociarse al final del último ciclo glaciar Würmiense. El final de este episodio está caracterizado por el aumento del flujo de humedad hacia los continentes (18 ka), que sucesivamente pasa (entre los 11 y 10 ka) a condiciones frías y áridas (Imbrie *et al.*, 1992). Para este periodo la sedimentación en el Valle de los Espejos sugiere un descenso en el nivel lacustre con condiciones alcalinas, además de presentar pulsos de humedad a los 3.08 a los 2.03 m.

Hacia la cima del núcleo de Acambay si se compara con los estadios isotópicos más recientes en el tiempo (Holoceno (entre los 8.5-8.0 ka); inicia con un corto periodo de clima más cálido y húmedo, sin embargo la tendencia general apunta hacia condiciones cada vez más secas, convirtiéndolo en charcas producto de inundaciones estacionales. El drenado sucesivo ocasionó la desaparición del lago.

Autor(es)/Estades		120,000-17,000 años A.P.	52,000-39,000 años A.P.	35,000 años A.P.	31,000 años A.P.	28,000 años A.P.	26,500 años A.P.	GTM 25,000-22,000 años A.P.	UMG 22,000-18,000 años A.P.	21,000-10,000 años A.P.	GTA 18,000-15,000 años A.P.	GTE 15,000-12,000 años A.P.	11,500 años A.P.	8,000 años A.P.	5,000 años A.P.	3,600 años A.P.	3,000 años A.P.	2,500 años A.P.	1,300 años A.P.	1,100 años A.P.	960 años A.P.
TEXCOCO	Bradbury (1971, 1989)					Condiciones someras y salobres, con incremento en la salinidad															
	Ramírez-Nava (2002)					Niveles lacustres bajos															
	Lozano-García y Ortega-Guerrero (1998)																				
	Sandoval-Montalvo (2000)																				
	Sedov et al., 2009b							25,000 y 18,000 años A.P. Somero y salobre													
	Ramírez-Nava (2002)								Somero, condiciones (-) salobres y (+) húmedas												
Sedov et al., 2009b											Sequía con hielos sedimentarios (entre los 17,500 y 7,000 años A.P.)	Disminución en el nivel lacustre									
CHALCO	Caballero y Ortega (1998)				Reducción en el nivel lacustre, con condiciones someras y salobres		Aguas dulces e incremento en el aporte de agua														
	Lozano-García et al., (1993)																				
	Lozano-García y Ortega-Guerrero (1994)							22,000 años A.P. Reducción en el nivel lacustre, ambiente somero variable y alterno entre condiciones de pantano ácido a neutral													
	Lozano-García (1996)																				
	Sosa-Nejara (2001)																				
Caballero (2010)										Entre los 16,800 y 15,000 años A.P., condiciones someras de agua dulce.	15,000 y 14,000 años A.P. fase de sedimentación baja, reducción del nivel lacustre con respecto al Glacial Tardío.										
CUIZEO	Irrade-Alcántara et al., 2002, 2010	Aguas dulces, alcalinas con cierta profundidad y algunos periodos de disturbio volcánico (120,000, 35,000, y 25,000 años A.P.)	44,000 a 42,000 y 19,000 a 17,000 años A.P., dos fases húmedas	Tendencia a sequías entre los 35,000 y 18,000 años A.P.				Niveles lacustres bajos y condiciones secas	10,000 años A.P., clima seco y bajos niveles lacustres	17,000 años A.P. hielos en la sedimentación				Aguas bajas y turbias. Hielos en la sedimentación							
	Valázquez-Durán (2003)				30,000 años A.P. Actividad volcánica que interrumpió el registro lacustre			24,000 años A.P. lago somero, levemente salobre	22,000 años A.P. evento corto de mayor nivel lacustre												
	Caballero (2010)							Entre 22,000 y 21,000 años A.P., lago somero y salobre	Condiciones secas y hielos en la sedimentación												
PATZCUARO	Bradbury et al., 1983														El nivel del lago descendió varias veces	Disminuyendo bruscamen el nivel del lago	Dos periodos de erosión y eutrofización en el lago				
	Metcalf et al., 1994														3,500 años A.P. condiciones seca y fase de erosión		Condiciones secas y fase de erosión	Condiciones secas y fase de erosión			
	Bradbury (2000)						Lago profundo y turbio	Lago profundo y frío				Disminución en el nivel lacustre y condiciones secas									
	Metcalf (1992 y 1995)						Tasa de sedimentación baja			Evidencias de actividad volcánica, bajos niveles lacustres	Después de los 16,700 y hasta los 5,500 años A.P., condiciones secas										
ZACAPU	Metcalf et al., 1994																	2,230 años A.P. lago profundo y frío	Periodo seco	Nivel más bajo del lago	
	Arnaud et al., 1997																	2,800-2400 años A.P. bajo nivel del lago	bajo nivel del lago		
	Ortega et al., 2002	Condiciones más húmedas	Descenso en la humedad y condiciones más secas				Discontinuidad en la sedimentación y un hiatus			15,000 años A.P. condiciones somera	14,000 años A.P. condiciones secas			4,800 años A.P. condiciones secas, 4,500 años A.P.		2,800 años A.P. condiciones más húmedas					
ZIRAHUÉN	Vázquez et al., 2010										17,000 a 14,000 años A.P. bajos niveles lacustres. Condiciones frías y secas.	14,000 a 8,180 años A.P. aumento en el nivel lacustre. 8,180 y 7,200 años A.P. evento erosivo originó un hiatus. 8,180 a 3,900 años A.P. ascenso en el nivel lacustre. 3,900 años A.P. intenso aporte terrígeno.							1,400 años A.P. bajo erosión y condiciones secas	880 años A.P. bajo erosión y condiciones secas	
ZACAMBAY	Carranza-Rivera (2013)	Condiciones estables, en base a Cuizco (Irrade-Alcántara et al., 2010)	Se observa un clima seco con fluctuaciones de humedad y una fase que indica como el paleolago experimentó su más alto nivel lacustre con algunos periodos de disturbio volcánico.	Condiciones cálidas y húmedas, con periodos de erosión y aporte terrígeno				Condiciones secas y niveles lacustres bajos					Descenso en el nivel lacustre con condiciones de aguas bajas y alcalinas, además de escasos pulsos de humedad	Presenta una tendencia a condiciones cada vez más secas, ocasionando la desaparición del lago, convirtiéndolo en charcas producto de inundaciones estacionales							

Tabla 19.- Correlación del Valle de los Espejos con otras cuencas limítrofes.

IX. CONCLUSIONES

Las facies sedimentarias en el depocentro del Valle de los Espejos se caracterizan por ser limo-arcillosas, observándose facies arenosas en la base hasta los 12.50 m, en correspondencia con los episodios más áridos que experimentó el lago y por lo tanto asociadas a un sistema en regresión.

El Valle de los Espejos ha mostrado un depósito continuo de flora de diatomeas desde su base hasta los últimos dos metros, indicando que a lo largo del Pleistoceno tardío estuvo presente un cuerpo de agua fluctuante, con dos fases de alto nivel lacustre, la primera fase fue interrumpida por episodios volcánicos.

En la base del núcleo de 21.48 a 13 m, se observa como el Valle de los Espejos se mantuvo como un cuerpo de agua inestable con muy constantes incrementos en la salinidad, mientras que el centro del núcleo posiblemente durante el Pleistoceno superior mantuvo un clima más óptimo para el establecimiento de un lago estable y con cierta profundidad.

Siendo la región de Acambay una zona sísmica se presenta un nivel deformado con diatomeas fragmentarias asociadas a este evento a los 19.13 m. La fragmentación en correspondencia a taxones asociados a un lago de aguas muy bajas. Otro nivel de alta fragmentación que requiere una investigación más detallada se encuentra a los 4.80 metros, es posible que se trate de un segundo evento sísmico que se registra en un lago tendiente a profundizarse.

Existe una gran diferencia entre el paleolago Pliocénico de Acambay establecido al Sur del Valle de los Espejos, con el paleolago más reciente (Pleistoceno superior-Holoceno). En la secuencia Pliocénica es evidente la gran deformación siendo su cima fechada en 2 M.a. Sus facies sedimentarias manifiestan un lago profundo y

estable con dominancia a *Stephanodiscus* (Israde-Alcántara *et al.*, 2010 y 2012). A pesar de que tuvo una marcada afectación por la tectónica, el lago profundo continuó funcionando. Sin embargo en el Valle de los Espejos, al norte del lago Pliocénico, los paleoambientes sugieren un paleolago con tendencia a ser más somero.

El Valle de los Espejos al igual que Cuitzeo constituye un lago plano que a lo largo de tiempo experimentó escasas fases de profundización. Los datos geoquímicos indican que la mayor parte de los componentes terrígenos de los sedimentos del lago de Cuitzeo son de composición andesítica (Israde-Alcántara *et al.*, 2010), del igual manera que el Valle de los Espejos.

En el núcleo de Cuitzeo no se tienen fechamientos por debajo de los 8 m que es la profundidad límite donde se ha llegado a los 40,000 años, siendo inferidas las edades de la base del núcleo a través de extrapolaciones. Se espera se puedan fechar los depósitos de ceniza de ambos núcleos para realizar una correlación precisa.

X. LITERATURA CITADA

- Aguirre-Díaz, G. J., 1995, La Toba de Amealco y su correlación con la Formación Las Américas a través del graben de Acambay, parte central de la Faja Volcánica Mexicana: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 12, pp. 17–27.
- Aguirre-Díaz, G. J., 1996, K-Ar ages and volcanic stratigraphy of the Amealco caldera and vicinity, central Mexican volcanic belt: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 13, pp. 10–51.
- Aguirre-Díaz, G. J., Urrutia-Fucugauchi, J., Soler-Arechalde, A. M., and McDowell, F. W., 2000, Stratigraphy, K-Ar ages, and magnetostratigraphy of the Acambay graben, central Mexican Volcanic Belt, in Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., and Stock, J. M., eds., *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 334, p. 167-178.
- Arnauld C., Metcalfe S.E., Petrequin P., 1997, Holocene climatic change in the Zacapu lake basin, Michoacán: Synthesis of Results. *Quaternary International*, Vol. 43/44, Elsevier Science Ltd. Pp. 173 – 179.
- Bernal, J.P., McCulloch, M.T. y Lachniet, M.S., 2006. An early Holocene stalagmite record of dust and humidity from southwestern Mexico. *Geochemica et Cosmochemical Acta*, 70(18): A48.
- Bradbury, J.P., 1971, Paleolimnology of Lake Texcoco, México. Evidence from diatoms: *Limnology and Oceanography*, 16, 180-200.
- Bradbury J.P., M.R. Forester y A.W. Watts. 1983. Paleolimnología y desarrollo de la agricultura en Pátzcuaro, Michoacán, México. V Coloquio sobre Paleobotánica y Palinología. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México.
- Bradbury, J.P., 1986, Paleolimnología del Lago de Chalco México, el medio ambiente litoral. *In*: Lorenzo, J.L. and Mirambell, L. (eds), *Tlapacoya: 35,000 Años de Historia del Lago de Chalco*. Colección Científica, Serie Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 297 pp.
- Bradbury, J.P., 1989, Late Quaternary lacustrine paleoenvironments in the Cuenca de Mexico: *Quaternary Science Reviews*, 8, 75-100.
- Bradbury, J.P., 2000, Limnologic history of Lago de Pátzcuaro, Michoacán, Mexico for the past 48000 years: impacts of climate and man: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 163, 65-95.
- Broecker S. W., 1989, The great Ocean Conveyor, *Oceanography*, Vol. 4.
- Butler R., 1998, *Paleomagnetism: Magnetic Domains to geologic terranes*. Blackwell Scientific Publications.
- Caballero, M. y Ortega, B., 1998, Lake levels since about 40000 years ago at Lake Chalco, near Mexico City: *Quaternary Research*, 50, 69-79.
- Caballero, M., Macías, J.L., Lozano, G.S., Urrutia F.J., Bernal, R., 2001, Late Pleistocene-Holocene volcanic stratigraphy and paleoenvironments of the upper Lerma basin, Mexico, *in* White,

-
- J.D.L., Riggs, N.R. (eds.), Volcaniclastic sedimentation in lacustrine settings: International Association of Sedimentologists Special Publication, 30, 247-261.
- Caballero M., Ortega, B., Valadez, F., Metcalfe, S.E., Macías J.L., Sugiura Y., 2002, Sta. Cruz Atizapán: a 22-ka lake level record and climatic implications for the late Holocene human occupation in the Upper Lerma basin, Central Mexico: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 186, 217-235.
- Caballero M., 2010, Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último.
- Caballero M. y Ortega B., 2011, Registros lacustres del centro de México: una aproximación a los paleoambientes de los últimos 50 000 años. *Escenarios de cambio climático: Registros del Cuaternario en América Latina (Vol. I)*. Caballero M. y Ortega B. (compiladoras). Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, UNAM (ISBN: 978-607-02-2432-4) pp 163-181
- Chan, L. S., Yeung, C. H., Yim, W. W.-S., OR, O.L., 1998, Correlation between magnetic susceptibility and distribution of heavy metals in contaminated sea-floor sediments of Hong Kong Harbour. *Environmental Geology*. 36 (1-2): 77-86.
- Chaparro M. A. E., Bidegain J. C., Sinito A. M., Gogorza C.S.G, Jurado S., 2003, Preliminary results of magnetic measurements on stream sediments from Buenos Aires Province, Argentina, *Studia Geophys. Geod.* 47, 121-145.
- Davies S.J., Metcalfe S.E., MacKenzie A.B., Newton A.J., Endfield G.H. y Farmer J.G., 2004, Environmental changes in the Zirahuén Basin, Michoacán, Mexico, during the last 1000 years: *Journal of Paleolimnology* 31. pp. 77 – 98.
- Dekkers M., 1997, Environmental Magnetism: An introduction. *Geologie en Mijnbouw*, 76: 163-182.
- Donald G. D., 1974, Electroanalysis and coulometric analysis, 46 (5), pp.21-28.
- Ehrlich, A., 1995, Atlas of the inland-water diatom flora of Israel; Flora Palaestina. The Geological Survey of Israel. The Israel Academy of Sciences and Humanities. Israel. 166 pp.
- Endsley, E.A., Gallup, C.D., Hodell, D.A., Curtis, J.H., Brenner, M., Gentry, C.L., Edwards, R.L. y Cheng, H., 2007. Late Holocene Droughts Recorded in Speleothems From the Maya Lowlands of the Yucatan Peninsula, Mexico, Spring Meeting 2007. American Geophysical Union, Acapulco. Mexico.
- Eugster. H. P. y L. A. Hardie, 1978, "Saline Lakes", en A. Lerman (comp.), *Lake: Chemistry, Geology, Physics*, Springer-Verlag, New York, pp. 237-294.
- Ferúsquia-Villafranca I., Arroyo-Cabrales J., Martínez-Hernández E., Gama-Castro J., Ruiz-González J., Polaco O. J., Johnson E., 2010, Pleistocene mammals of México: A critical review of regional chronofaunas, climate change response and biogeographic provinciality, *Quaternary International*, vol. 217, Issues 1-2, pp. 53-104.
- Fisher C.T., Pollard H. P., Israde A.I., Garduño-Monroy V.H. y Banerjee S. K., 2003, A reexamination of human induced environmental change within the Lake Patzcuaro Basin, Michoacán, Mexico: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100, pp. 4957-4962.

- Gasse, F., 1980, Les Diatomees Lacustres Plio-Pleistocenes Du Gadeb (Ethipie) Systematique, Paleoecoloie, Biostratgraphie, Francia, p. 249.
- Gasse, F., 1986, East African Diatoms, Taxonomy, Ecological Distribution, Biblioteca Diatomológica. Band 11. Stuttgart, Berlin. 203.
- Gómez-Tuena A., Orozco-Esquivel Ma. T., Ferrari L., 2005, Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, núm. 3, pp. 227-283.
- González-Hernández M. J y Orozco-Hernández, M. E., 2006, Desarrollo local en unidades ambientales en la región del Alto Lerma; Estado de México: Quivera, Vol. 8 (001), pp. 191-212.
- Harmon, R.S., Thompson, P., Schwarcz, H.P. y Ford, D.C., 1978. Late Pleistocene paleoclimates of North America as inferred from stable isotope studies of speleothems. *Quaternary Research*, 9: 54-70.
- Heine, K., 1994, Present and past geocryogenic processes in Mexico: Permafrost and Periglacial Processes, 5, 1-12.
- Hernández, 2012, Evolución sedimentaria del sector oriental del graben de Acambay y su influencia con la actividad volcánica, Tesis para obtener el grado de Biólogo, Facultad de Biología, UMSNH.
- Heinrich I, Gärtner H, Monbaron M, Schleser G (eds.) (2006) TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, Vol. 4: Proceedings of the DENDROSYMPOSIUM 2005, April 21st – 23rd 2005, Fribourg, Switzerland. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt Vol. 61, p. 244 – 264.
- Hernández-Mendiola, E., 2008. Indicadores geoquímicos de condiciones paleohidrológicas y paleoclimáticas en una estalagmita desarrollada durante el último máximo glacial. Experimental Thesis, UNAM, Ciudad Universitaria, 89 pp.
- Imbrie, J., Boyle, E.A., Clemens, S.C., Duffy, A., Howard, W.R., Kukla, G., Kutzbach, J., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Molfino, B., Morley, J.J., Peterson, L.C., Pisias, N.G., Prell, W.L., Raymo, M.E., Shackleton, N.J., Toggweiler, J.R., 1992. On the structure and origin of major glaciation cycles. I. Linear responses to Milankovitch forcing. *Paleoceanography* 7, 701–738.
- INEGI, 2009, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Acambay, México: Clave geoestadística 15001.
- Israde-Alcántara I., 1997, Neogeno-Holoceno stratigraphy and paleolimnology of Cuitzeo Basin, North Michoacan: 14 Th North American Diatom Symposium, University of Michigan. U.S.A., pp. 16
- Israde-Alcántara I., Garduño-Monroy V.H., Ortega, R., 2002, Paleoambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago Cuitzeo: *Hidrobiológica*, 12, 61-78.
- Israde-Alcántara I., Andrade-Servín, A., Garduño-Monroy V.H., Rodríguez-Pascua, M., Mercer, L., 2005, Fluctuaciones ambientales del Pleistoceno en la localidad de San Bartolo Los lanzados, Municipio de Atlacomulco, en base a la información micropaleontológica. *Ciencia Nicolaita* 39, 95–106.
- Israde-Alcántara I., Miller W.E., Garduño-Monroy V.H., Barron J. y Rodríguez-Pascua, M., 2010. Palaeoenvironmental significance of Diatom and Vertebrate fossils from Late Cenozoic tectonic basins in west-central México: A review. *Quaternary International*. 219: 79-94.
-

- Israde-Alcántara I., Hernández-Olivares Rene, Garduño-Monroy Víctor H., Rodríguez-Pascua Miguel A., Pérez López Raúl, Macías-Vázquez José L., 2012, Lacustrine evolution of the eastern sector of the Acambay graben based on the diatom record. *3rd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Paleoseismology and Archaeoseismology, Morelia, Mexico (2012)*. p. 85-90
- Kessler, W.S. 2006. The circulation of the Eastern tropical Pacific: A review, *Progress in Oceanography*, 69: 181-217.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H., 1988, *Subwasserflora von Mitteleuropa*, 2/1, p. 876; 2/2, p. 596; 2/3, p. 576 y 2/4, p. 436.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot H., 1997a, Bacillariophyceae 2/1. Teil : Naviculaceae. *In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D Mollenhauer (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart, Germany. 876 p.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot H., 1997b, Bacillariophyceae 2/2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. *In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D Mollenhauer (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart, Germany. 437 p.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot H., 2004a, Bacillariophyceae. 2/3. Teil : Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. *In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D Mollenhauer (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart, Germany. 598 p.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot H., 2004b, Bacillariophyceae. 2/4. Teil : Achnanthes s. l., Navicula s. str., Gomphonema. *In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D Mollenhauer (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart, Germany. 468 p.
- Lecointe C., M. Coste, J. Prygiel y L. Ector, 1999, Le logiciel OMNIDIA version 2, une puissante base de données pour les inventaires de diatomées et pour le calcul des indices diatomiques européens. *Cryptogamie, Algol.* 20 (2):132-134, 1999.
- Lehman S. y Keigwin L., 1992, Sudden changes in North Atlantic circulation during the last deglaciation, *Nature*, 356, 757-762.
- Lowe, R.L. 1974, Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatom. National Environmental Research Center Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio, U.S.A., pp.334
- Lowe, J.J. y Walker M.J.C., 1998, *Reconstructing Quaternary Environments* 2nd Edition. Longman Group Ltd. London. 446.
- Lozano-García, M. S; Ortega G. B; Caballero M. M and Urrutia F.J., 1993, Late Pleistocene and Holocene Paleoenvironments of Chalco Lake, Central Mexico. *Quaternary Research* 40:332-342.
- Lozano-García, M.S. y Ortega G. B., 1994, Palynological and magnetic susceptibility records of Lake Chalco, central Mexico: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 109, 177-191.
- Lozano-García, M.S., 1996, La vegetación Cuaternaria en el Centro de México: Registros Palinológicos e Implicaciones Paleoclimáticas: *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 58, 113-127.

- Lozano-García, M.S. y Ortega G. B., 1998, Late Quaternary environmental changes of the central part of the Basin of Mexico; correlation between Texcoco and Chalco sub-basins: Review of Palaeobotany and Palynology, 99, 77-93.
- Lozano-García, M.S., Sosa-Najera, S., Sugiura, Y., Caballero, M., 2005, 23000 yr of vegetation history of the Upper Lerma, a tropical high-altitude basin in Central Mexico: Quaternary Research, 64, 70-82.
- Maher B., 1999, *Environmental Magnetism*. 390p., Cambridge U. Press.
- Mercer L. M., Kowallis, B. J., Carranza-Castañeda, O., Miller, W. E., and Rojas, M. L., 2002, Geology of the southeastern Acambay graben, central Mexican Volcanic Belt: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 34, no. 6, p. 282.
- Mercer L. T., Kowallis B. J., Christiansen E. y Miller W., 2010, Geology of the Tierras Blancas area in the Southeastern Acambay Graben, Central Mexico: Byu Geology Studies, Vol. 48, p. 1-36.
- Metcalfe S.E., Brown R.B., Hales P.E., Perrott R.A., Steininger F.M. y Strett-Perrott F.A., 1989, Late Holocene Human Impact on Lake Basins in Central Mexico: Geoarchaeology an International Journal. Vol 4, No. 2. pp 119 – 141.
- Metcalfe, S.E., Street-Perrott, F.A., Perrott, R.A., Harkness, D.D., 1991. Palaeolimnology of the Upper Lerma Basin, Central Mexico: A record of climatic change and anthropogenic disturbance since 11,600 yr BP. Journal of Paleolimnology 5, 197-218.
- Metcalfe, S.E., 1992, Changing environments of the Zacapu basin, Central Mexico: a diatom-based history spanning the last 30000 years: Oxford, Inglaterra, University of Oxford Research Paper No. 48, 38 p.
- Metcalfe S.E., F.A. Street-Perrott, S.L. O'Hara, P.E. Hales y R.A. Perrott. 1994, The Paleolimnological Record of Environmental Change: Examples from the Arid Frontier of Mesoamerica. En: Environmental Change in Drylands: Biogeographical and Geomorphological Perspectives. Editado por AC Millington y K Pye. Pp. 131 – 145.
- Metcalfe, S.E., 1995, Holocene environmental change in the Zacapu Basin, Mexico: a diatom-based record: The Holocene, 5, 196-208.
- Metcalfe, S.E., O'Harab, S.L., Caballero, M. y J., D.S., 2000. Records of late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico - a review. Quaternary Science Reviews, 19, 699-721.
- Metcalfe, S.E. y Davies, S.J., 2007, Deciphering recent climate change in central Mexican lake records: Climatic Change, 83, 169-186.
- Norato-Cortez, T. A., 1998, Estudio estratigráfico-volcanológico-estructural de los volcanes San Pedro y Altamirano (estados de México y Michoacán) y su relación con la evolución tectónica del sector central del Cinturón Volcánico Mexicano [Masters thesis]: Linares, Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, 73 p.
- O'Hara S.L. y Metcalfe S.E., 1995. Reconstructing the climate of Mexico from historical records. The Holocene 5, 4, pp. 485 – 490.

- Ortega B., Thompson R. y Urrutia J., 2000, Magnetic properties of lake sediments from Lake Chalco, Central Mexico, and their palaeoenvironmental implications: *Journal of Quaternary Science*, 15, pp. 127-140.
- Ortega B., Caballero, C., Lozano, S., Israde, I., Vilaclara, G., 2002, 52000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacan, Mexico: the magnetic record: *Earth and Planetary Science Letters*, 202, 663-675.
- Ortega B., Vázquez, G., Caballero, M., Israde, A. I., Lozano-García, S., Schaaf, P., Torres, E., 2010, Late Pleistocene-Holocene record of environmental changes in Lake Zirahuén, central Mexico: *Journal of Paleolimnology*, 44, 745-760.
- Pérez-Cruz L., 2006, Climate and ocean variability during middle and late Holocene recorded in laminated sediments from Alfonso Basin, gulf of California, Mexico. *Quarter*, 65, 401-410.
- Pérez Enríquez, R., Böhnell, H. y Bernal, J.P., 2007. Stalagmite analysis for Paleoclimate Studies, Centro de Geociencias. UNAM, Querétaro.
- Ramírez-Herrera, M. T., 1998, Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican Volcanic Belt: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 23, p. 317-332.
- Ramírez-Izquierdo, H., Bernal, J.P., Perez Enriquez, R., Böhnell, H., Morales Malacara, J.B. y McCulloch, M.T., 2007. Band-counting and grey tone spectral analysis in banded stalagmites, a new proxy for paleoclimate reconstruction?, AGU- Annual summer meeting 2007.
- Ramírez-Nava, M., 2002, Cambios paleolimnológicos en el lago de Texcoco durante los últimos ca. 34000 años con base en el análisis de diatomeas: México D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de licenciatura, 43 p.
- Razo, 2007., Caracterización y posibles aplicaciones de los yacimientos de Diatomitas de la región de Cuitzeo Michoacan, México., Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Metalurgia y Ciencias de los Materiales., Instituto de Investigaciones Metalúrgicas., UMSNH.
- Rey D., López-Rodríguez N., Rubio B., Vilas F., Mohamed K., Pazos O. y Bógalo M. F., 2000, Propiedades magnéticas de los sedimentos de tipo estuario. El caso de las Rías Baixas: *Journal of Iberian Geology*, Vol. 26, pp.151-169.
- Reyes-Salas A. M., 1990, El depósito de diatomita de San Francisco Los Reyes, Michoacán, Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Rodríguez R. A., 2002, Aspectos Paleolimnológicos de la historia reciente del Lago La Preciosa, Puebla, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Limnología, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
- Round F. E., 1981, *The ecology of algae*: Cambridge University Press, p. 653.
- Roy P.D., Smykatz-Kloss W., Sinha R., 2006, Late Holocene geochemical history inferred from Sambhar and Didwana playa sediments, Thar Desert: comparison and synthesis. *Quaternary International* 144 (1), 84–98.
- Roy P.D., Caballero, M., Lozano, R., Pi, T., Morton, O., 2009, Late Pleistocene-Holocene geochemical history inferred from Lake Tecocomulco sediments, Basin of Mexico, Mexico: *Geochemical Journal*, 43, 49-64.

- Sandoval Montaña, A., 2000, Análisis palinológico y consideraciones paleoambientales de un sondeo en el exlago de Texcoco, Cuenca de México: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría, 195 p.
- Schelske C. L., Conley D.J., Stoermer E. F., Newberry T. L., y Campbell C., 1986, Biogenic silica and phosphorus accumulation in sediments as indices of eutrophication in the Laurentian Great Lakes: *Hydrobiologia*, Vol. 143, p. 79-86.
- Sedov, S, Solleiro-Rebolledo, S., Terhorst, B., Solé, J., Flores-Delgadillo, M.L., Werner, G., Poetsch, T., 2009a, The Tlaxcala basin paleosol sequence: A multiscale proxy of middle to late Quaternary environmental change in central Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 2, 448-465.
- Sedov, S., Lozano-García, S., Solleiro-Rebolledo, E., McClung de Tapia, E., Ortega-Guerrero, B., Sosa-Nájera, S., 2009b, Tepexpan Revisited: A multiple proxy of local environmental changes in relation to human occupation from a paleolake shore section in central Mexico: *Geomorphology*, 122, 309-322.
- Serrano Pérez E. 1988. Monografía Municipal de Acambay, Edo de Mexico. Colección enciclopedia de los Municipios de México.
- Sosa-Nájera S., 2001, Registro Palinológico del Pleistoceno tardío-Holoceno en el extremo Meridional de la Cuenca de México: *Paleoambientes e Inferencias Paleoclimáticas*, Tesis de Maestro en Ecología y Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias. UNAM. 115.
- Sosa-Nájera S., Lozano-García S., Roy P.D., 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 de Santa María del Oro: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 62, núm. 3, pp. 437-451.
- Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. J., and Farrar, E., 1995, The Acambay graben: Active intraarc extension in the trans-Mexican volcanic belt, Mexico: *Tectonics*, Vol. 14, pp. 1245-1262.
- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., and Carrillo-Martínez, M., 2001, Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt: *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 113, no. 6, pp. 693-703.
- Tamayo, J. L. y West, R. C., 1964, Handbook of Middle American Indians, J. Natural Environment and Early Cultures. The hydrography of Middle America In: R-C. WEST (Ed.) Univ. of Texas. Press, Austin Texas. 1964. pp. 84-121.
- Tauxe L., 2005, Lectures in Paleomagnetism, <http://earthref.org/MAGIC/books>.
- Tenorio-Peña A., 2011, Paleooceanografía holocénica de la Cuenca Farallón (Golfo de California): integración de datos geoquímicos y biológicos, Tesis para obtener el grado de Bióloga., Facultad de Ciencias, UNAM.
- Thompson, R. y Oldfield, F., 1986, *Environmental magnetism: 227p.*, Allen y Unwin. London.
- Torres Rodríguez, E., 2010, Evidencias de cambio climático durante el Pleistoceno-Holoceno en la región occidental de México a través del análisis palinológico en sedimentos del lago de Zirahuén, Michoacán: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 116 p.

- Torres-Rodríguez, E., Lozano-García S., Figueroa-Rangel, B.L., Ortega, G.B. y Vázquez-Castro, G., 2012, Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17,000 años en el centro de México: el registro del lago de Zirahuén, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.29, núm. 3, pp. 764-778.
- Valero-Garcés, B.L., Laird, K.R., Fritz, S.C., Kelts, K., Ito, E., Grimm, E.C., 1997, Holocene climate in the northern Great Plains inferred from sediment stratigraphy, stable isotopes, carbonate geochemistry, diatoms and pollen at Moon Lake, North Dakota: *Quaternary Research*, 48, 359-369.
- Vázquez G., Ortega B., Davies S. J., Aston B. J., 2010, Registro sedimentario de los últimos ca. 17000 años del lago de Zirahuén, Michoacán, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 62, núm. 3, pp. 325-343.
- Vázquez-Selem, L., 2000, Late Quaternary glacial chronology of Iztaccíhuatl volcano, central Mexico. A record of environmental change in the border of the tropics: Tempe, Arizona, Arizona State University, Tesis doctoral, 210 p.
- Vázquez-Selem, L., Heine, K., 2004, Late Quaternary glaciation of México, en Ehlers, J., Gibbard, P.L. (eds.), *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology, Volume 2, Part III: South America, Asia, Africa, Australia, Antarctica*: Amsterdam, Países Bajos, Elsevier, 233-242.
- Velázquez-Durán R., 2003, Evolución paleoambiental del lago de Cuitzeo durante el Pleistoceno tardío: Historia de la vegetación e implicaciones paleoclimáticas: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Tesis de Maestría, 210 p.
- Verosub y Roberts, A. P., 1995, Environmental Magnetism: Past, Present and Future. *Journal of Geophysical Research*, 100, B2: 2175-2192.
- Watts, W.A. y Bradbury, J.L., 1982, Paleoecological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the basin of Mexico: *Quaternary Research*, 17, 56-70.
- White, S.E., Reyes-Cortes, M., Ortega Ramírez, J., Valastro, S., 1990, El Ajusco: geomorfología volcánica y acontecimientos glaciales durante el Pleistoceno superior y comparación con las series glaciales mexicanas y las de las Montañas Rocallosas: México, D. F., Instituto Nacional de Antropología e Historia, 77 p.

XI. ANEXOS

XI.1) Base de datos de los análisis geoquímicos en base a las zonas estratigráficas.

Zona	Tramo	Profundidad	CT %	CIT %	COT %	χ	Fe %	Al %	Ti %	K %	Ca %	Mg %	Sr (ppm)	Mn (ppm)	Ba (ppm)	Zn(ppm)	Zr (ppm)	Textura
1	40	20.35	1.71	1.19	0.52	0.13	0.99	1.23	0.009	0.48	4.75	0.96	303	?	?	?	?	Mat. Retrabajado c/arcilla plastica c/limo arenoso
		20.49	1.97	1.20	0.77	0.19	1.12	1.4	0.01	0.74	4.02	1.41	382					Mat. Retrabajado c/arcilla plastica c/limo arenoso
		20.63	1.47	1.14	0.33	0.56	0.63	0.66	0.02	0.49	4.34	1.1	424					Limo fino
		20.77	1.70	1.22	0.48	0.49	0.57	0.78	0.02	0.57	4.84	1.26	498					Arena fina
	41	20.91	1.68	1.14	0.54	2.80	0.74	0.78	0.01	0.52	4.95	1.14	501					Arena fina
		21.05	1.17	0.86	0.31	0.18	1	1.61	0.02	1.36	4.91	2.38	594					Arena fina
		21.19	1.73	1.11	0.62	0.33	0.72	1.21	0.02	0.95	5.34	1.52	627					Arcilla Limosa
		21.33	1.99	1.54	0.45	0.11	1.05	2.06	0.02	1.59	3.9	2.51	593					Arcilla Limosa

Zona	Tramo	Profundidad	CT %	CIT %	COT %	χ	Fe %	Al %	Ti %	K %	Ca %	Mg %	Sr (ppm)	Mn (ppm)	Ba (ppm)	Zn(ppm)	Zr (ppm)	Textura
2	33	16.40	0.70	0.62	0.08	0.15	1.83	4.43	0.06	0.81	4.35	5.72	538	494	170	52	40.9	Limo grueso
		16.54	2.96	2.22	0.74	0.01	1.98	3.95	0.06	1.09	6.1	4.39	676	756	284	47	39.4	Arcilla compacta
		16.68	2.12	1.70	0.42	0.07	1.44	3.29	0.05	0.66	6.28	8.48	715	558	164	36	32.8	Arcilla compacta
	34	16.81	2.74	1.68	1.06	0.10	1.88	4.22	0.06	1	5.31	4.54	597	614	264	50	40.1	Limo arenoso fino
		16.95	2.19	2.17	0.02	0.07	1.49	2.88	0.05	0.55	5.75	8.72	697	619	146	33	31.3	Arcilla fina compacta
		17.09	2.43	1.97	0.46	0.09	1.35	3.09	0.05	0.56	5.55	9.02	765	539	164	37	29.5	Limo masivo compacto
	35	17.22	2.83	0.35	2.48	0.29	2.37	5.36	0.04	0.79	1.06	0.82	127	284	171	60	41.2	Arena fina
		17.36	0.49	0.33	0.16	0.09	2.08	4.17	0.04	0.97	3.72	1.23	466	574	404	48	35.4	Limo fino
	36	17.54	3.82	3.52	0.30	0.08	0.96	1.58	0.02	0.49	8.66	4.04	475	?	?	?	?	Limo arenoso no compacto delesnable
		17.68	2.83	2.22	0.61	0.04	1.22	1.85	0.02	0.53	4.98	5.86	528					Arcilla plastica no compacta
		17.82	2.49	1.88	0.61	0.05	1	1.84	0.02	0.46	5.44	7.09	642					Arcilla plastica no compacta
		17.96	2.21	1.61	0.60	0.05	1.11	1.86	0.02	0.58	4.83	5	501					Arcilla Limosa
		18.10	1.56	0.87	0.69	0.10	0.91	1.28	0.02	0.78	3.07	1.42	386					Arcilla porosa compacta
		18.24	1.99	0.75	1.24	0.10	1.09	1.44	0.02	0.91	2.95	1.58	350					Arcilla porosa compacta
	37	18.38	2.08	0.82	1.26	0.20	1.16	1.42	0.02	0.93	3.22	1.47	374	Limo estratificado				
		18.52	1.37	0.51	0.86	0.11	0.97	1.33	0.02	0.87	2.03	1.17	275	Limo estratificado				
		18.66	1.96	0.79	1.17	0.07	0.94	1.45	0.01	0.97	3.02	1.37	334	Limo estratificado				
		18.80	1.75	0.72	1.03	0.09	0.84	1.24	0.02	0.86	2.67	1.27	310	Limo arcilloso estratificado				
	38	18.94	2.97	1.31	1.66	0.62	0.87	1.39	0.02	0.94	4.52	1.64	470	?	?	?	?	Arcilla plastica estratificada, porosa
		19.13	2.05	0.74	1.31	1.22	2.33	1.48	0.02	0.77	3.15	1.45	328	Arcilla plastica, porosa				
		19.27	4.61	3.90	0.71	0.30	1.39	1.5	0.01	0.77	3.06	1.46	306	Arcilla plastica, porosa				
		19.41	2.51	1.18	1.33	0.19	1.09	1.29	0.02	0.9	4.11	1.82	447	Arcilla plastica, porosa				
		19.55	2.47	0.71	1.76	0.28	2.16	1.46	0.02	1	2.81	1.53	318	Arcilla plastica, porosa				
		19.69	3.32	1.18	2.14	0.16	0.95	1.27	0.02	0.92	4.15	1.58	397	Arcilla plastica, porosa				
		19.83	3.75	1.74	2.01	0.24	1.03	1.16	0.02	0.85	5.87	1.78	522	Arcilla plastica, porosa				
		19.97	2.45	2.03	0.42	0.49	1.45	0.81	0.01	0.42	6.41	1.12	623	Arena mediana				
	39	20.11	1.47	1.17	0.30	0.53	0.67	0.64	0.02	0.47	4.89	1.1	478	Arena fina				
		20.25	1.63	1.25	0.38	0.42	0.67	0.78	0.01	0.6	4.76	1.31	477	Arena fina				

Zona	Tramo	Profundidad	CT %	CIT %	COT %	χ	Fe %	Al %	Ti %	K %	Ca %	Mg %	Sr (ppm)	Mn (ppm)	Ba (ppm)	Zn(ppm)	Zr (ppm)	Textura
3	23	11.77	1.23	0.78	0.45	1.53	2.19	4.13	0.03	1.15	3.7	1.09	465	426	389	44	29.8	Limo
		11.91	0.98	0.75	0.23	0.12	2.12	4.3	0.03	1.27	2.77	1.19	386	497	393	48	31.8	Arcilla
		12.05	0.51	0.40	0.11	0.16	1.84	4.06	0.04	1.4	2.02	1.28	275	429	302	53	32.5	Arcilla
	24	12.17	0.31	0.09	0.22	0.68	1.75	3.88	0.03	1.19	0.93	1.14	128	217	84	53	33.7	Limo
		12.31	0.22	0.03	0.19	0.15	1.76	3.7	0.04	1.15	0.64	1.1	102	202	74	50	34.2	Limo
		12.45	2.89	2.53	0.36	0.15	1.67	3.6	0.04	1.05	11.6	1.32	597	1280	170	51	25.3	Limo
	25	12.58	0.61	0.41	0.20	0.15	1.8	3.74	0.03	1.15	3.31	1.12	296	532	235	47	32.5	Limo Franco
		12.72	1.89	1.55	0.34	0.10	1.59	2.97	0.04	1.02	4.75	1.09	376	848	278	44	30.1	Arcilla limosa
	26	12.88	0.76	0.51	0.25	0.08	2.3	4.74	0.05	0.99	2.2	1.3	407	341	313	52	41.1	Arena muy fina
		13.02	1.16	0.82	0.34	0.10	2.24	4.52	0.05	1.08	3.12	1.34	595	333	483	51	38.6	Arena muy fina
		13.16	0.85	0.65	0.20	0.20	2.21	4.33	0.05	1.09	2.96	1.36	573	287	367	50	37.7	Arena muy fina
		13.30	0.86	0.58	0.28	0.13	2.3	4.54	0.06	1.04	2.68	1.36	594	305	406	51	37.9	Limo arenoso
		13.44	1.09	0.87	0.22	0.20	2.12	4.12	0.05	1.14	3.73	1.42	675	478	364	47	33.5	Limo arenoso
		13.58	1.36	1.15	0.21	0.13	2.05	4	0.05	1.21	4.42	1.49	661	610	344	48	33	Limo arenoso
	27	13.72	1.94	1.50	0.44	0.13	1.8	3.54	0.05	1.26	5.66	1.53	641	973	340	45	32.8	Arena limosa fina
		13.86	1.53	1.43	0.10	0.11	1.79	3.59	0.05	1.39	4.91	1.62	598	824	334	45	31.5	Arena limosa fina
		14.00	1.51	1.38	0.13	0.14	2.02	4.22	0.05	1.67	5.16	1.89	621	691	370	50	36.6	Arena limosa fina
		14.14	1.94	1.74	0.20	0.09	1.76	3.72	0.04	1.51	6.47	1.8	722	779	464	45	32.8	Arena limosa fina
	28	14.24	1.51	1.24	0.27	0.36	2.02	4.13	0.05	1.54	4.75	1.8	592	653	375	50	37.1	Arena fina porosa
		14.38	1.90	1.57	0.33	0.16	1.95	4.03	0.06	1.49	5.83	1.92	710	697	458	52	34.9	Limo arenoso
	29	14.52	1.69	1.45	0.24	0.24	1.68	3.31	0.04	1.43	5.09	1.74	556	604	232	40	32.4	Limo arenoso
		14.66	1.93	1.22	0.71	0.22	1.86	4.01	0.05	1.36	4.83	2.03	745	483	328	44	36.8	Limo arenoso
		14.80	1.26	1.11	0.15	0.06	2.02	4.7	0.05	1.44	4.07	2.01	673	463	283	49	43.4	Limo arcilloso fino
		14.94	1.82	0.74	1.08	0.05	2.31	4.8	0.05	1.11	2.7	1.58	420	393	217	51	44.2	Limo arcilloso fino
		15.08	0.83	0.76	0.07	0.07	2.44	5.2	0.05	1.13	2.9	1.72	399	280	157	55	47.3	Limo arcilloso fino
		15.22	1.15	0.55	0.60	0.05	2.47	5.61	0.07	1.17	2.39	1.79	361	237	142	59	53.3	Limo arcilloso fino
	30	15.32	1.07	0.61	0.46	0.08	2.41	5.15	0.06	1.12	2.48	1.77	370	265	149	55	51	Arcilla plastica
		15.46	1.36	0.94	0.42	0.09	1.92	3.99	0.04	1.11	3.55	1.79	522	283	209	44	41.5	Limo fino
		15.60	2.12	1.49	0.63	0.15	2.14	3.95	0.05	1.22	5.22	2.31	726	365	271	47	42.7	Limo fino
		15.70	2.11	1.68	0.43	0.30	1.89	3.8	0.05	1.47	5.74	3.03	817	415	291	44	38.8	Limo arenoso
	31	15.88	2.11	1.85	0.26	0.16	1.76	3.66	0.06	1.76	6.26	3.06	798	473	268	48	35.9	Limo arenoso
16.02		2.00	1.47	0.53	0.16	1.62	3.6	0.06	1.46	6.22	3.62	874	422	273	44	36.6	Arcilla fina	

Evolución Paleoambiental del Pleistoceno-Holoceno en el Valle de los Espejos

ANEXOS

Zona	Tramo	Profundidad	CT %	CIT %	COT %	γ	Fe %	Al %	Ti %	K %	Ca %	Mg %	Sr (ppm)	Mn (ppm)	Ba (ppm)	Zn(ppm)	Zr (ppm)	Textura
4	13	5.74	1.15	1.01	0.14	0.38	1.49	3.12	0.02	0.34	7.42	0.58	200	1050	206	31	25.6	Arcilla
		5.88	0.25	0.12	0.13	0.13	2.02	4.23	0.03	0.41	1.85	0.58	119	323	163	43	39.9	Arcilla
	14	6.00	0.82	0.65	0.17	0.12	1.51	3.2	0.02	0.33	6.55	0.58	179	842	192	32	32.7	Arcilla
		6.14	0.16	0.03	0.13	0.12	1.75	3.76	0.02	0.38	0.58	0.54	86	276	153	41	37.6	Arcilla
		6.28	0.21	0.03	0.18	0.14	1.33	2.75	0.01	0.38	0.74	0.48	85.4	231	133	31	28.8	Arcilla
		6.42	0.17	0.03	0.14	0.13	1.31	2.63	0.01	0.39	0.68	0.49	81.5	257	132	33	29.9	Arcilla
	15	6.57	0.27	0.01	0.26	0.14	1.6	3.42	0.02	0.43	0.56	0.53	80.8	266	135	39	34.9	Arcilla
		6.71	0.23	0.01	0.22	0.10	1.71	3.78	0.02	0.45	0.47	0.54	76.6	237	134	61	35.7	Arcilla
		6.85	0.38	0.02	0.36	0.14	1.42	3.02	0.01	0.4	0.5	0.49	79.1	274	144	36	30.7	Arcilla
		6.99	0.20	0.01	0.19	0.14	1.51	3.07	0.01	0.41	0.5	0.51	79.6	280	142	38	30.4	Arcilla
		7.13	0.17	0.02	0.15	0.20	1.82	3.61	0.02	0.47	0.53	0.55	80.9	210	123	46	34.6	Arcilla
		7.27	0.19	0.06	0.13	0.15	1.98	4.04	0.02	0.57	0.6	0.67	83.2	417	153	52	34.1	Limo arcilloso
	16	7.41	0.21	0.10	0.11	0.16	1.4	2.71	0.02	0.45	1.48	0.54	103	287	135	34	28.5	Arcilla
		7.55	0.86	0.77	0.09	0.16	1.46	2.77	0.02	0.46	1.07	0.55	88	428	149	37	29	Limo arcilloso
		7.69	6.08	5.78	0.30	0.10	1.27	2.65	0.02	0.44	10.2	0.67	319	861	174	32	30	Limo arcilloso
	17	7.85	1.14	0.99	0.15	0.14	1.71	3.49	0.02	0.57	3.34	0.66	174	503	177	45	35	Limo
		7.99	0.19	0.05	0.14	0.14	1.65	2.82	0.02	0.56	0.49	0.61	76.5	278	126	44	32.9	Limo
		8.13	0.46	0.21	0.25	0.14	2.46	4.62	0.03	0.76	1.04	0.83	133	498	299	54	41.3	Arcilla
	18	8.30	0.29	0.04	0.25	0.14	1.98	3.9	0.03	0.35	0.69	0.53	112	210	199	42	38.6	Limo arcilloso
		8.44	0.40	0.02	0.38	0.33	2.11	4.32	0.04	0.33	0.88	0.58	128	227	187	45	40.6	Arcilla
		8.58	0.49	0.04	0.45	0.11	1.94	4.26	0.04	0.33	0.96	0.55	133	205	189	42	31.1	Arcilla
		8.72	0.38	0.03	0.35	0.12	2.25	5.25	0.05	0.36	0.7	0.61	110	163	147	48	46.2	Arcilla
		8.86	0.33	0.05	0.28	0.73	1.5	3.87	0.03	0.39	0.51	0.52	98.7	87	123	36	36.5	Arcilla
		9.00	0.14	0.03	0.11	0.17	1.39	3.26	0.02	0.71	0.42	0.62	71.4	164	88	45	38.6	Limo arcilloso
		9.14	0.16	0.02	0.14	0.24	1.21	2.79	0.02	0.68	0.36	0.57	67.4	121	84	109	36.4	Limo arcilloso
		9.28	2.34	1.92	0.42	0.45	2.36	4.16	0.04	0.56	6.41	0.74	333	904	300	49	28.3	Arena fina
	19	9.42	2.16	1.81	0.35	0.13	1.89	3.64	0.03	0.54	6.2	0.72	326	896	284	43	27	Arcilla plastica
		9.56	1.77	1.37	0.40	0.15	1.79	3.59	0.02	0.52	4.1	0.64	222	586	240	41	33.5	Limo arenoso
		9.70	0.70	0.47	0.23	0.15	1.61	3.28	0.03	0.52	5.53	0.64	228	601	200	44	35	Limo arenoso
		9.84	0.24	0.08	0.16	0.17	1.18	2.68	0.02	0.71	0.6	0.59	96.7	283	119	34	33.9	Limo arenoso
		9.98	0.19	0.06	0.13	0.12	1.88	3.88	0.02	0.98	0.62	0.82	91.9	289	108	51	32.7	Arcilla plastica
		10.12	1.90	1.80	0.10	0.28	1.81	3.63	0.03	0.9	4.97	0.89	327	985	406	55	23.9	Limo
	20	10.23	0.39	0.16	0.23	0.20	1.75	3.69	0.03	0.7	0.88	0.61	94.2	296	136	44	39.5	Limo arenoso retrabajado granular
		10.37	1.38	1.09	0.29	0.18	1.75	3.93	0.03	0.86	3.35	0.83	202	507	226	46	28	Arcilla plastica
		10.51	0.98	0.89	0.09	0.09	0.66	1.2	0.03	0.39	0.74	0.21	137	156	216	13	11	Ceniza Volcanica muy fina
	21	10.57	0.93	0.78	0.15	0.40	1.54	3.29	0.03	0.49	2.8	0.55	172	497	220	34	32.9	Arcilla
		10.64	0.11	0.03	0.08	0.33	0.62	1.12	0.04	0.28	0.56	0.23	123	96	95	12	7.6	Ceniza Volcanica muy fina
		10.69	0.12	0.02	0.10	0.35	1.64	2.69	0.12	0.31	1.77	0.88	247	304	105	22	16.4	Ceniza Volcanica gruesa/Arcilla plastica
	22	10.82	0.64	0.45	0.19	0.09	2.3	4.83	0.04	0.65	2.02	0.88	246	318	190	49	41.4	Arcilla plastica
		10.95	1.03	0.71	0.32	0.21	1.83	4.03	0.03	0.52	2.49	0.63	191	487	247	41	38.5	Arcilla plastica
11.09		1.31	0.91	0.40	0.12	1.74	3.9	0.03	1.07	3.66	0.98	471	344	501	39	33.4	Limo arcilloso	
11.23		1.18	0.94	0.24	0.12	1.88	4.16	0.03	1.15	3.41	1.11	483	361	454	47	29.7	Limo poroso	
11.37		0.94	0.73	0.21	0.10	2.35	5.11	0.04	1.43	3.18	1.33	437	539	424	58	37.2	Limo poroso	
11.51		0.86	0.66	0.20	0.10	1.93	4.1	0.03	1.43	2.88	1.33	351	641	329	48	30.6	Limo poroso	
11.65		0.90	0.42	0.48	0.10	1.95	4.39	0.04	1.42	1.99	1.35	290	770	392	52	34.4	Limo poroso	

Evolución Paleoambiental del Pleistoceno-Holoceno en el Valle de los Espejos

ANEXOS

Zona	Tramo	Profundidad	CT %	CIT %	COT %	χ	Fe %	Al %	Ti %	K %	Ca %	Mg %	Sr (ppm)	Mn (ppm)	Ba (ppm)	Zn(ppm)	Zr (ppm)	Textura
5	9	3.90	0.20	0.03	0.17	0.36	1.9	4	0.02	0.32	0.46	0.43	67.7	477	172	41	31.6	Turba
		4.00	0.09	0.03	0.06	0.53	1.96	4.13	0.02	0.51	0.73	0.65	98	277	153	40	28.2	Limo arenoso fino
		4.10	0.13	0.04	0.09	0.16	1.97	4.35	0.02	0.52	0.9	0.7	107	286	173	46	29.5	Limo arenoso fino
		4.20	0.10	0.03	0.07	0.30	2.08	4.49	0.02	0.52	0.84	0.68	106	318	189	43	32.5	Limo arenoso fino
	10	4.29	0.13	0.05	0.08	0.12	2.36	5.7	0.04	0.41	1.03	0.69	117	285	277	49	42.3	Arcilla Limosa
		4.39	0.24	0.17	0.07	0.14	2.2	5.02	0.04	0.37	1.38	0.66	126	320	258	43	33.9	Arcilla Limosa
		4.49	0.35	0.27	0.08	0.13	2.14	4.78	0.04	0.29	1.59	0.6	139	356	232	39	32.8	Limo arenoso fino
		4.59	0.46	0.35	0.11	0.13	1.91	3.87	0.03	0.33	1.18	0.58	128	315	230	37	30.4	Limo arenoso fino
	11	4.68	0.36	0.25	0.11	0.45	1.83	4.15	0.04	0.35	3.12	0.57	163	464	249	36	31.1	Arena fina
		4.80	0.11	0.02	0.09	1.12	1.64	3.35	0.04	0.43	0.86	0.58	106	441	183	33	26.3	Arena fina
		4.94	0.15	0.05	0.10	0.36	1.62	3.52	0.02	0.44	0.68	0.59	88	363	170	35	25.2	Arena fina
		5.08	0.11	0.05	0.06	0.31	1.53	3.39	0.02	0.47	0.67	0.57	83.3	309	163	34	25.3	Limo arenoso fino
		5.22	0.15	0.03	0.12	0.26	1.45	3.12	0.02	0.43	0.71	0.56	90.3	358	170	33	24.9	Limo arenoso fino
		5.34	0.23	0.05	0.18	0.43	1.98	4.09	0.03	0.48	0.78	0.54	93.7	294	161	48	36.1	Limo arenoso fino
		5.48	0.31	0.11	0.20	0.39	1.65	3.45	0.03	0.45	1.19	0.5	85.3	399	176	42	31.2	Limo arenoso fino
		5.62	0.13	0.03	0.10	0.53	1.65	3.43	0.03	0.42	0.51	0.5	74.3	288	149	42	30.3	Limo arenoso fino

Zona	Tramo	Profundidad	CT %	CIT %	COT %	χ	Fe %	Al %	Ti %	K %	Ca %	Mg %	Sr (ppm)	Mn (ppm)	Ba (ppm)	Zn(ppm)	Zr (ppm)	Textura
6	6	2.03	0.22	0.03	0.19	0.14	1.64	3.65	0.02	0.32	0.44	0.39	69	252	139	37	24.5	Arcilla
		2.17	0.26	0.06	0.20	0.13	1.51	3.37	0.02	0.3	0.43	0.35	65.4	251	137	35	22.8	Arcilla
		2.31	0.26	0.02	0.24	0.13	1.82	3.87	0.02	0.32	0.38	0.37	61.7	345	156	40	29.9	Arcilla
		2.45	0.18	0.03	0.15	0.16	1.83	3.98	0.02	0.34	0.35	0.35	57.1	682	221	40	27.1	Arcilla
	7	2.58	0.20	0.03	0.17	0.15	1.47	2.73	0.02	0.29	0.41	0.34	59.7	483	175	31	22.1	Arcilla c/manchones negros
		2.68	0.22	0.04	0.18	0.14	1.41	3.01	0.02	0.3	0.65	0.34	74.8	466	181	32	24.1	Arcilla c/manchones negros
		2.78	0.22	0.03	0.19	0.15	1.47	3.28	0.02	0.34	0.49	0.35	65	394	160	34	26.4	Arcilla
		2.88	0.13	0.04	0.09	0.12	1.65	3.61	0.02	0.37	0.52	0.41	70.3	241	148	39	25.7	Arcilla
		2.98	0.17	0.04	0.13	0.11	2.29	4.74	0.03	0.23	0.6	0.56	85.6	303	200	44	35.3	Arcilla
		3.08	0.26	0.03	0.23	0.12	2.45	3.77	0.02	0.21	0.54	0.5	83	259	169	79	26.6	Arcilla
		3.18	0.31	0.03	0.28	0.11	2.58	6.28	0.05	0.28	0.61	0.58	93.8	313	212	49	43.4	Arena Fina
		3.28	0.17	0.03	0.14	0.21	2.46	5.02	0.02	0.39	0.57	0.55	85.7	1300	399	46	26.6	Mat. Arcillosos (posible lavado)
	8	3.42	0.10	0.03	0.07	0.22	1.87	4.03	0.01	0.44	0.54	0.59	79	489	191	40	19.1	Arcilla
		3.56	0.20	0.03	0.17	0.22	1.81	3.85	0.02	0.45	0.49	0.5	70.8	409	171	37	24.6	Arcilla
		3.70	0.17	0.01	0.16	0.30	1.89	3.88	0.02	0.47	0.52	0.52	77.5	526	221	38	23.9	Arcilla
		3.85	0.12	0.02	0.10	0.52	1.74	3.47	0.02	0.44	0.44	0.49	65.8	255	138	36	24.7	Arena fina

Zona	Tramo	Profundidad	CT %	CIT %	COT %	χ	Fe %	Al %	Ti %	K %	Ca %	Mg %	Sr (ppm)	Mn (ppm)	Ba (ppm)	Zn(ppm)	Zr (ppm)	Textura
7	1	0.00	4.36	0.04	4.32	0.00	2.45	4.94	0.06	0.11	0.7	0.31	66	318	198	51	40.4	Limo
		0.13	1.42	0.05	1.37	0.17	2.65	5.27	0.05	0.11	0.38	0.29	59.5	318	184	44	38.8	Limo
		0.26	1.33	0.03	1.30	0.23	2.25	5.36	0.06	0.19	0.43	0.24	58.3	524	199	84	26.6	Arcilla
	2	0.40	1.25	0.04	1.21	0.21	2.07	4.73	0.04	0.12	0.46	0.27	72.5	312	187	38	35.8	Limo
		0.54	1.11	0.04	1.07	0.32	1.94	3.95	0.04	0.09	0.39	0.21	55.3	926	219	32	30.5	Limo
		0.68	1.00	0.03	0.97	0.28	2.02	4.02	0.06	0.08	0.37	0.21	62.8	485	194	31	26.3	Arcilla
	3	0.80	0.64	0.05	0.59	0.24	1.95	4.97	0.03	0.15	0.43	0.27	67.4	295	178	39	36.6	Arcilla
		0.94	0.72	0.04	0.68	0.25	1.82	4.2	0.03	0.12	0.43	0.24	64.8	362	164	36	32.1	Arcilla
		1.08	0.86	0.05	0.81	0.26	1.73	3.86	0.03	0.11	0.42	0.23	67.5	301	174	30	32	Arcilla
	4	1.18	0.43	0.04	0.39	0.28	2.05	4.8	0.03	0.18	0.42	0.31	66.9	333	170	42	39.3	Turba
		1.32	0.38	0.04	0.34	0.24	1.81	4.11	0.02	0.17	0.38	0.28	60.5	407	158	37	34.7	Arcilla c/mat. Org.
		1.46	0.36	0.04	0.32	0.29	1.6	3.49	0.02	0.16	0.39	0.26	57.2	414	152	35	32.9	Arcilla c/mat. Org.
	5	1.63	0.37	0.03	0.34	0.27	1.66	3.26	0.02	0.18	0.42	0.28	66.3	529	168	33	32	Arcilla Limosa c/mat. Org.
		1.77	0.31	0.03	0.28	0.26	2.23	5.11	0.04	0.26	0.4	0.37	64.9	735	214	46	40.7	Arcilla Limosa c/mat. Org.
		1.91	0.28	0.03	0.25	1.22	1.92	4.28	0.02	0.3	0.42	0.37	66.8	309	148	42	28.3	Arcilla Limosa c/mat. Org.

XI.2) Base de datos de las relaciones geoquímicas en base a las zonas estratigráficas.

Zona	Tramo	Prof. (m)	Fe/AL	Ca/Ti	Ca/Mg	Sr/Ti	Fe/Ti	Mn/Ti
1	40	20.35	0.80	527.78	4.95	33666.67	110.00	?
		20.49	0.80	402.00	2.85	38200.00	112.00	
		20.63	0.95	217.00	3.95	21200.00	31.50	
		20.77	0.73	242.00	3.84	24900.00	28.50	
	41	20.91	0.95	495.00	4.34	50100.00	74.00	
		21.05	0.62	245.50	2.06	29700.00	50.00	
		21.19	0.60	267.00	3.51	31350.00	36.00	
		21.33	0.51	195.00	1.55	29650.00	52.50	

Zona	Tramo	Prof. (m)	Fe/AL	Ca/Ti	Ca/Mg	Sr/Ti	Fe/Ti	Mn/Ti
2	33	16.4	0.41	72.50	0.76	8966.67	30.50	8233.33
		16.54	0.50	101.67	1.39	11266.67	33.00	12600.00
		16.68	0.44	125.60	0.74	14300.00	28.80	11160.00
	34	16.81	0.45	88.50	1.17	9950.00	31.33	10233.33
		16.95	0.52	115.00	0.66	13940.00	29.80	12380.00
		17.09	0.44	111.00	0.62	15300.00	27.00	10780.00
	35	17.22	0.44	26.50	1.29	3175.00	59.25	7100.00
		17.36	0.50	93.00	3.02	11650.00	52.00	14350.00
	36	17.54	0.61	433.00	2.14	23750.00	48.00	?
		17.68	0.66	249.00	0.85	26400.00	61.00	
		17.82	0.54	272.00	0.77	32100.00	50.00	
		17.96	0.60	241.50	0.97	25050.00	55.50	
		18.1	0.71	153.50	2.16	19300.00	45.50	
	37	18.24	0.76	147.50	1.87	17500.00	54.50	
		18.38	0.82	161.00	2.19	18700.00	58.00	
		18.52	0.73	101.50	1.74	13750.00	48.50	
		18.66	0.65	302.00	2.20	33400.00	94.00	
		18.8	0.68	133.50	2.10	15500.00	42.00	
	38	18.94	0.63	226.00	2.76	23500.00	43.50	
		19.13	1.57	157.50	2.17	16400.00	116.50	
		19.27	0.93	306.00	2.10	30600.00	139.00	
		19.41	0.84	205.50	2.26	22350.00	54.50	
		19.55	1.48	140.50	1.84	15900.00	108.00	
		19.69	0.75	207.50	2.63	19850.00	47.50	
	39	19.83	0.89	293.50	3.30	26100.00	51.50	
		19.97	1.79	641.00	5.72	62300.00	145.00	
		20.11	1.05	244.50	4.45	23900.00	33.50	
		20.25	0.86	476.00	3.63	47700.00	67.00	

Zona	Tramo	Prof. (m)	Fe/AL	Ca/Ti	Ca/Mg	Sr/Ti	Fe/Ti	Mn/Ti
3	23	11.77	0.53	123.33	3.39	15500.00	73.00	14200.00
		11.91	0.49	92.33	2.33	12866.67	70.67	16566.67
		12.05	0.45	50.50	1.58	6875.00	46.00	10725.00
	24	12.17	0.45	31.00	0.82	4266.67	58.33	7233.33
		12.31	0.48	16.00	0.58	2550.00	44.00	5050.00
		12.45	0.46	290.00	8.79	14925.00	41.75	32000.00
	25	12.58	0.48	110.33	2.96	9866.67	60.00	17733.33
		12.72	0.54	118.75	4.36	9400.00	39.75	21200.00
	26	12.88	0.49	44.00	1.69	8140.00	46.00	6820.00
		13.02	0.50	62.40	2.33	11900.00	44.80	6660.00
		13.16	0.51	59.20	2.18	11460.00	44.20	5740.00
		13.3	0.51	44.67	1.97	9900.00	38.33	5083.33
		13.44	0.51	74.60	2.63	13500.00	42.40	9560.00
		13.58	0.51	88.40	2.97	13220.00	41.00	12200.00
	27	13.72	0.51	113.20	3.70	12820.00	36.00	19460.00
		13.86	0.50	98.20	3.03	11960.00	35.80	16480.00
		14.00	0.48	103.20	2.73	12420.00	40.40	13820.00
		14.14	0.47	161.75	3.59	18050.00	44.00	19475.00
	28	14.24	0.49	95.00	2.64	11840.00	40.40	13060.00
		14.38	0.48	97.17	3.04	11833.33	32.50	11616.67
	29	14.52	0.51	127.25	2.93	13900.00	42.00	15100.00
		14.66	0.46	96.60	2.38	14900.00	37.20	9660.00
		14.8	0.43	81.40	2.02	13460.00	40.40	9260.00
		14.94	0.48	54.00	1.71	8400.00	46.20	7860.00
		15.08	0.47	58.00	1.69	7980.00	48.80	5600.00
		15.22	0.44	34.14	1.34	5157.14	35.29	3385.71
	30	15.32	0.47	41.33	1.40	6166.67	40.17	4416.67
		15.46	0.48	88.75	1.98	13050.00	48.00	7075.00
		15.6	0.54	104.40	2.26	14520.00	42.80	7300.00
		15.7	0.50	114.80	1.89	16340.00	37.80	8300.00
		15.88	0.48	104.33	2.05	13300.00	29.33	7883.33
31	16.02	0.45	103.67	1.72	14566.67	27.00	7033.33	

Zona	Tramo	Prof. (m)	Fe/AL	Ca/Ti	Ca/Mg	Sr/Ti	Fe/Ti	Mn/Ti
4	13	5.74	0.48	371.00	12.79	10000.00	74.50	52500.00
		5.88	0.48	61.67	3.19	3966.67	67.33	10766.67
	14	6.00	0.47	327.50	11.29	8950.00	75.50	42100.00
		6.14	0.47	29.00	1.07	4300.00	87.50	13800.00
		6.28	0.48	74.00	1.54	8540.00	133.00	23100.00
		6.42	0.50	68.00	1.39	8150.00	131.00	25700.00
	15	6.57	0.47	28.00	1.06	4040.00	80.00	13300.00
		6.71	0.45	23.50	0.87	3830.00	85.50	11850.00
		6.85	0.47	50.00	1.02	7910.00	142.00	27400.00
		6.99	0.49	50.00	0.98	7960.00	151.00	28000.00
		7.13	0.50	26.50	0.96	4045.00	91.00	10500.00
	16	7.27	0.49	30.00	0.90	4160.00	99.00	20850.00
		7.41	0.52	74.00	2.74	5150.00	70.00	14350.00
		7.55	0.53	53.50	1.95	4400.00	73.00	21400.00
	17	7.69	0.48	510.00	15.22	15950.00	63.50	43050.00
		7.85	0.49	167.00	5.06	8700.00	85.50	25150.00
		7.99	0.59	24.50	0.80	3825.00	82.50	13900.00
	18	8.13	0.53	34.67	1.25	4433.33	82.00	16600.00
		8.3	0.51	23.00	1.30	3733.33	66.00	7000.00
		8.44	0.49	22.00	1.52	3200.00	52.75	5675.00
		8.58	0.46	24.00	1.75	3325.00	48.50	5125.00
		8.72	0.43	14.00	1.15	2200.00	45.00	3260.00
		8.86	0.39	17.00	0.98	3290.00	50.00	2900.00
		9.00	0.43	21.00	0.68	3570.00	69.50	8200.00
	19	9.14	0.43	18.00	0.63	3370.00	60.50	6050.00
		9.28	0.57	160.25	8.66	8325.00	59.00	22600.00
		9.42	0.52	206.67	8.61	10866.67	63.00	29866.67
		9.56	0.50	205.00	6.41	11100.00	89.50	29300.00
		9.7	0.49	184.33	8.64	7600.00	53.67	20033.33
		9.84	0.44	30.00	1.02	4835.00	59.00	14150.00
		9.98	0.48	31.00	0.76	4595.00	94.00	14450.00
	20	10.12	0.50	165.67	5.58	10900.00	60.33	32833.33
		10.23	0.47	29.33	1.44	3140.00	58.33	9866.67
		10.37	0.45	111.67	4.04	6733.33	58.33	16900.00
	21	10.51	0.55	24.67	3.52	4566.67	22.00	5200.00
		10.57	0.47	93.33	5.09	5733.33	51.33	16566.67
		10.64	0.55	14.00	2.43	3075.00	15.50	2400.00
		10.69	0.61	14.75	2.01	2058.33	13.67	2533.33
	22	10.82	0.48	50.50	2.30	6150.00	57.50	7950.00
		10.95	0.45	83.00	3.95	6366.67	61.00	16233.33
		11.09	0.45	122.00	3.73	15700.00	58.00	11466.67
		11.23	0.45	113.67	3.07	16100.00	62.67	12033.33
11.37		0.46	79.50	2.39	10925.00	58.75	13475.00	
11.51		0.47	96.00	2.17	11700.00	64.33	21366.67	
		11.65	0.44	49.75	1.47	7250.00	48.75	19250.00

Zona	Tramo	Prof. (m)	Fe/AL	Ca/Ti	Ca/Mg	Sr/Ti	Fe/Ti	Mn/Ti
5	9	3.9	0.48	23.00	1.07	3385.00	95.00	23850.00
		4.00	0.47	36.50	1.12	4900.00	98.00	13850.00
		4.1	0.45	45.00	1.29	5350.00	98.50	14300.00
		4.2	0.46	42.00	1.24	5300.00	104.00	15900.00
	10	4.29	0.41	25.75	1.49	2925.00	59.00	7125.00
		4.39	0.44	34.50	2.09	3150.00	55.00	8000.00
		4.49	0.45	39.75	2.65	3475.00	53.50	8900.00
		4.59	0.49	39.33	2.03	4266.67	63.67	10500.00
		4.68	0.44	78.00	5.47	4075.00	45.75	11600.00
	11	4.8	0.49	21.50	1.48	2650.00	41.00	11025.00
		4.94	0.46	34.00	1.15	4400.00	81.00	18150.00
		5.08	0.45	33.50	1.18	4165.00	76.50	15450.00
		5.22	0.46	35.50	1.27	4515.00	72.50	17900.00
	12	5.34	0.48	26.00	1.44	3123.33	66.00	9800.00
		5.48	0.48	39.67	2.38	2843.33	55.00	13300.00
		5.62	0.48	17.00	1.02	2476.67	55.00	9600.00

Zona	Tramo	Prof. (m)	Fe/AL	Ca/Ti	Ca/Mg	Sr/Ti	Fe/Ti	Mn/Ti
6	6	2.03	0.45	22.00	1.13	3450.00	82.00	12600.00
		2.17	0.45	21.50	1.23	3270.00	75.50	12550.00
		2.31	0.47	19.00	1.03	3085.00	91.00	17250.00
		2.45	0.46	17.50	1.00	2855.00	91.50	34100.00
	7	2.58	0.54	20.50	1.21	2985.00	73.50	24150.00
		2.68	0.47	32.50	1.91	3740.00	70.50	23300.00
		2.78	0.45	24.50	1.40	3250.00	73.50	19700.00
		2.88	0.46	26.00	1.27	3515.00	82.50	12050.00
		2.98	0.48	20.00	1.07	2853.33	76.33	10100.00
		3.08	0.65	27.00	1.08	4150.00	122.50	12950.00
		3.18	0.41	12.20	1.05	1876.00	51.60	6260.00
		3.28	0.49	28.50	1.04	4285.00	123.00	65000.00
	8	3.42	0.46	54.00	0.92	7900.00	187.00	48900.00
		3.56	0.47	24.50	0.98	3540.00	90.50	20450.00
		3.7	0.49	26.00	1.00	3875.00	94.50	26300.00
		3.85	0.50	22.00	0.90	3290.00	87.00	12750.00

Zona	Tramo	Prof. (m)	Fe/AL	Ca/Ti	Ca/Mg	Sr/Ti	Fe/Ti	Mn/Ti
7	1	0	0.50	11.67	2.26	1100.00	40.83	5300.00
		0.13	0.50	7.60	1.31	1190.00	53.00	6360.00
		0.26	0.42	7.17	1.79	971.67	37.50	8733.33
	2	0.40	0.44	11.50	1.70	1812.50	51.75	7800.00
		0.54	0.49	9.75	1.86	1382.50	48.50	23150.00
		0.68	0.50	6.17	1.76	1046.67	33.67	8083.33
	3	0.80	0.39	14.33	1.59	2246.67	65.00	9833.33
		0.94	0.43	14.33	1.79	2160.00	60.67	12066.67
		1.08	0.45	14.00	1.83	2250.00	57.67	10033.33
	4	1.18	0.43	14.00	1.35	2230.00	68.33	11100.00
		1.32	0.44	19.00	1.36	3025.00	90.50	20350.00
		1.46	0.46	19.50	1.50	2860.00	80.00	20700.00
	5	1.63	0.51	21.00	1.50	3315.00	83.00	26450.00
		1.77	0.44	10.00	1.08	1622.50	55.75	18375.00
		1.91	0.45	21.00	1.14	3340.00	96.00	15450.00

