



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES  
UNIDAD MORELIA**

**“ESTUDIO PALEOAMBIENTAL DEL  
HOLOCENO EN EL LAGO LA  
COLORADA, JALISCO, MÉXICO”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**LICENCIADO EN GEOCIENCIAS**

P R E S E N T A:  
LUIS ANDRES ESPINO BARAJAS

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Gabriel Vázquez Castro

MORELIA MICHOACÁN.

DICIEMBRE DEL 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCES  
DIRECTORA  
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
P R E S E N T E

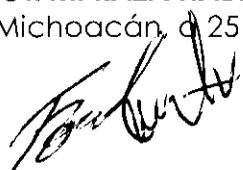
Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 09** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **28 de septiembre del 2016**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el Examen Profesional del alumno **Luis Andrés Espino Barajas**, con número de cuenta **413085162**, de la **Licenciatura en Geociencias**, con la tesis titulada: "**ESTUDIO PALEOAMBIENTAL DEL HOLOCENO EN EL LAGO LA COLORADA, JALISCO, MÉXICO**" bajo la dirección como **tutor** del Dr. Gabriel Vázquez Castro.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy  
Vocal: Dra. Isabel Israde Alcantará  
Secretario: Dr. Gabriel Vázquez Castro  
Suplente: Dra. Berenice Solís Castillo  
Suplente: Mtro. Felipe García Tenorio

Sin otro particular quedo de usted.

**A T E N T A M E N T E**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Morelia, Michoacán, a 25 de noviembre de 2016.



**DR. FERNANDO ANTONIO ROSETE VERGÉS**  
**SECRETARÍA GENERAL**

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Licenciatura en Geociencias y a mi tutor el Dr. Gabriel Vázquez Castro por la dirección y compromiso durante la realización de mi tesis, también, por su consideración y apoyó, tanto en el aspecto personal como profesional. Por todo ello y por su confianza en mi trabajo, infinitas gracias.

Al honorable comité de sinodales el Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy, Dra. Isabel Israde Alcántara, Dra. Berenice Solís Castillo y Mtro. Felipe García Tenorio que fueron lectores y críticos fundamentales para observar las lagunas, problemas y alcances de la investigación. Agradezco profundamente su tiempo y su disposición para nutrir esta investigación.

Al proyecto PAPIIT (IA104815) por el apoyo financiero para la investigación y desarrollo de la misma. Al proyecto PAPIME (PE112816) por la beca para la terminación de la tesis.

A los siguientes laboratorios de la Universidad Nacional Autónoma de México. Laboratorio de Suelos y Aguas del Centro de Investigaciones

en Geografía Ambiental por brindarme un lugar para realizar análisis de laboratorio. Al Laboratorio de Estudios Paleoambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Morelia por facilitarme un espacio para trabajar y en la extracción y análisis de las muestras de sedimentos. Al Laboratorio de Paleoambientes del Instituto de Geología, por facilitarnos el laboratorio y el equipo para los análisis de FRX. Al Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental del Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, por facilitarnos los equipos para realizar la susceptibilidad magnética. Al Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán por la facilidad en la realización de las secciones delgadas de roca.

Al Dr. Priyadarsi Roy, por su apoyo en el laboratorio de FRX, al Mtro. Neftalí Razo Pérez por su apoyo en el uso del laboratorio de química de la ENES Morelia. A Ricardo Enrique Núñez Ramírez por su apoyo en fotografías de núcleos.

A mi mamá Martha Barajas Díaz por apoyarme incondicionalmente durante todos mis estudios, por la educación, sus enseñanzas, por

apoyarme en mis decisiones y mostrarme que nada se regala en esta vida, Muchaaas Graciaaas!

A mis hermanos Roberto, Gloria, Roció y Juan José, por brindarme esos momentos felices con sus travesuras, por enseñarme lo bonito de la vida que alguna vez olvidamos y darme muchos motivos para salir adelante.

A mi mejor amiga Luz María, por apoyarme incondicionalmente desde el primer día en que nos conocimos, por esos momentos hermosos que hemos compartido, por tu apoyo y comprensión, Gracias!

A mi primo José y su mama María por apoyarme en mi estancia en la ciudad durante todo el tiempo de mis estudios; a Éster y Roberto por apoyarme en todo momento y preocuparse por mí. Gracias!.

A mi amigo Lupe por ayudarme con el proceso de petrografía.

A la Dra. Sol por apoyarme durante toda la carrera y por ser una excelente persona. Gracias.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Investigaciones paleoclimáticas en México.....	1
1.2 Estudios previos en Jalisco.....	2
1.3 Planteamiento del problema.....	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general.....	3
1.4.2 Objetivos particulares.....	4
2. GENERALIDADES.....	5
2.1. Localización y vías de acceso.....	5
2.2. Fisiografía.....	6
2.3. Clima y vegetación.....	7
2.4. Características morfológicas del lago.....	8
2.5. Características geológicas regionales.....	9
2.5.1 Unidad 1. Secuencia volcánica del Cretácico (KsPpaTR).....	9
2.5.2 Unidad 2. Secuencia volcánica Neógeno-Cuaternario (NplQptB).....	10
2.5.3 Unidad 3. Secuencia volcánica del Neógeno (NmplTR).....	10
2.5.4 Unidad 4. Secuencia Andesítica – Basáltica del Neogeno - Cuaternario (NplQptA-B).....	11
2.5.5 Unidad 5. Secuencia Basáltica – Andesítica del Cuaternario, Pleistoceno (QptBA).....	11
2.5.6 Unidad 6. Secuencia Dacíticas del Cuaternario, Pleistoceno	

	(QptDa).....	11
	2.5.7 Unidad 7. Secuencia Riolítica Pleistocénica (QpITR).....	12
	2.5.8 Unidad 8. Secuencia Aluvial del Cuaternario (Qhoal).....	12
3.	METODOLOGÍA.....	14
3.1.	Elaboración del mapa geológico.....	14
3.1.1	Muestreo de rocas.....	15
3.1.2	Petrografía.....	15
3.2.	Colecta de núcleos .....	16
3.3.	Análisis iniciales.....	19
3.3.1.	Descripción estratigráfica y sedimentológica.....	19
3.3.2.	Datación por <sup>14</sup> C.....	21
3.4.	Fluorescencia de rayos X.....	22
3.5.	Susceptibilidad magnética.....	23
4.	RESULTADOS.....	25
4.1.	Base de datos digitales.....	25
4.2.	Petrografía de las rocas volcánicas del área de estudio.....	27
4.3.	Estratigrafía del lago La Colorada.....	28
4.4.	Cronología.....	34
4.5.	Fluorescencia de rayos X.....	36
4.6.	Susceptibilidad magnética.....	43
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	47
5.1.	Modelo de edades.....	47
5.2.	Correlación estratigráfica e interpretación de facies.....	50
5.3.	Correlación magnética.....	55
5.4.	Correlación integral.....	57

5.5.	Efectos morfológicos producidos por el volcanismo local.....	59
5.6.	Interpretación geoquímica.....	60
5.6.1.	Componentes clásticos.....	62
5.6.2.	Componentes biogénicos.....	66
5.6.3.	Otros componentes.....	68
5.7.	Interpretación paleoambiental.....	66
6.	CONCLUSIONES.....	73
7.	ANEXOS.....	78
7.1.	Anexo (A) Descripción petrográfica.....	78
7.2.	Anexo (B) Características sedimentológicas.....	86
7.3.	Anexo (C) Ambiente sedimentario lacustre.....	90
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Mapa de ubicación de la zona de estudio. A) Se observa la ubicación regional del área de estudio en la República Mexicana. B) Modelo Digital de Elevaciones (MDE) el cual muestra las vías de acceso del área de estudio, la equidistancia de curvas de nivel es cada 300 m, el color verde indica zonas de menor elevación y el rojo las más elevadas.....	5
<b>Figura 2.2.</b> Mapa de ubicación del área de estudio dentro de la provincia de la FVT. Se muestra el límite estatal del estado de Jalisco.....	6
<b>Figura 2.3.</b> Se observa con barras la precipitación media mensual para todo el año (CONAGUA), en el eje Y se muestra la precipitación media en mm. Con una curva se muestra la temperatura (°C) media mensual para todo el año en el eje Y derecho se muestra la escala de temperatura.....	7
<b>Figura 2.4.</b> Se muestran las características topográficas del lago, utilizando las curvas de nivel (curvas a cada 10 m). Puntos de muestreo de los núcleos.....	9
<b>Figura 2.5.</b> Mapa geológico de la zona Etzatlán –Magdalena.....	13
<b>Figura 3.1.</b> Puntos de muestreo de rocas para la elaboración de un mapa geológico.....	16
<b>Figura 4.1.</b> Fotografía digital mostrando los cuatro núcleos de sedimentos colectados en el lago La Colorada. Se observan las diferentes tonalidades a lo largo de los cuatro núcleos. Escala grafica en cm.....	26
<b>Figura 4.2.</b> Columnas estratigráficas de los núcleos LC-14-I, LC-14-II, LC-15-I y lc-15-II.....	29
<b>Figura 4.3.</b> En la siguiente figura se muestran las características texturales graficadas a profundidad en cada uno de los núcleos analizados.....	32
<b>Figura 4.4.</b> Modelo de edad para los sedimentos del lago La Colorada realizado a partir del fechamiento por 14C (89 cm edad obtenida 2077 BP).....	35
<b>Figura 4.5.</b> Variación de los elementos mayores con respecto a la profundidad.....	40
<b>Figura 4.6.</b> Variación de los elementos traza con respecto a la profundidad.....	42

<b>Figura 4.7.</b> Susceptibilidad Magnética ( $\kappa$ ) observada en los cuatro núcleos perforados en el lago La Colorada.....	44
<b>Figura 4.8.</b> Susceptibilidad Magnética ( $\kappa$ ) observada en el núcleo LC-15-II, se puede observar el perfil dividido por zonas, dependiendo del comportamiento.....	46
<b>Figura 5.1.</b> Se presentan algunos lagos donde se han realizado estudios en México. Con una cruz roja se especifican e lago en estudio La Colorada (LC). Los demás con puntos son los lagos Santiagillo (SN), Las Cruces (L), Santa María del Oro (SMO), Juanacatlan (Ju), Etzatlán-Magdalen (E-M), Zacapu (Zc), Pátzcuaro (Ptz), Zirahuen (Zr), Cuitzeo (Ctz) y Chalco (Ch).....	49
<b>Figura 5.2</b> Correlación estratigráfica.....	54
<b>Figura 5.3</b> Correlación magnética.....	56
<b>Figura 5.4</b> Se muestran diferentes graficas como la susceptibilidad magnética, Elementos mayores y elementos menores. En el eje y se muestra las edades calibradas en años AP...58	58
<b>Figura 5.5</b> Se muestra como los flujos (unidad 5 (B-A)) de lava procedente del volcán Tequila, tienen un efecto fundamental en la morfología del lago. Se observa como este flujo rodea completamente el lago de SE a NW.....	60
<b>Figura 5.6</b> Graficas de Fe, Ti y $\kappa$ , representando los elementos clásticos que ingresan al lago a lo largo del tiempo.....	63
<b>Figura 5.7</b> Graficas de Fe vs. Ti, Ti vs. $\kappa$ y Fe vs. $\kappa$ , donde se observa los factores de correlación entre los diferentes indicadores de entrada de materiales terrígenos a la cuenca.....	65
<b>Figura 5.8</b> Graficas de componentes biogénicos en la secuencia (Si/Ti y S/Ti) a lo largo del tiempo (años calibrados AP).....	67
<b>Figura 5.9.</b> Graficas de otros componentes geoquímicos (Sr/Ti y Mn/Ti). Edades calibradas en años AP.....	69

<b>Figura 5.10.</b> Cocientes utilizados en la interpretación paleoambiental, indicadores de condiciones oxido-reductoras, precipitación de carbonatos y presencia de sílice de origen biogénico.....	72
<b>Figura A1.</b> Roca andesita- basalto, con textura porfirítica. Se Observa un cristal de plagioclasa en luz natural y Luz polarizada.....	78
<b>Figura A2.</b> Roca andesita- basalto, con textura porfirítica. Se observan cristales de plagioclasa embebidos en una matriz, también se puede observar sericita que es un mineral secundario de alteración.....	79
<b>Figura A3.</b> Toba Riolítica, se observa un fragmento de roca en color negro, también se pueden notar una gran cantidad de poros.....	80
<b>Figura A4.</b> Fotografía de Toba Riolítica en luz natural y nicoles cruzados, se observa un fragmento de roca en color pardo, también se pueden notar una gran cantidad de poros.	
<b>Figura A5.</b> Fotografía de un basalto en luz natural y nicoles cruzados, presenta textura microlítica. Se pueden observar una gran cantidad de microlitos de plagioclasas.....	81
<b>Figura A6.</b> Roca andesita- basalto, con textura microcristalina. Presenta un grado de alteración muy fuerte, contiene fragmentos de cristales como plagioclasas y feldespatos, se pueden observar esferulitas.....	82
<b>Figura A7.</b> Roca basalto presenta textura porfídica y microlítica. Se observan minerales grandes embebidos en una matriz microlítica (Plagioclasas), y estas presentan un grado de oxidación.....	83
<b>Figura A8.</b> Fotografías de un basalto en luz natural y nicoles cruzados, presenta textura microlítica.....	83
<b>Figura A9.</b> Toba vítrea presenta textura vesiculada o piroclastica, está compuesta principalmente de vidrio, con algunos cristales de plagioclasa.....	84
<b>Figura A10.</b> Riolita, presenta textura fluidal algunos cristales de plagioclasa. La imagen fue tomada con nicoles cruzados.....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1.</b> Resultado del fechamiento por $^{14}\text{C}$ realizados en el núcleo LC-15-II, y sus equivalencias en años calendáricos.....	36
<b>Tabla 4.2.</b> Resultados de los análisis de FRX para elementos Mayores.....	37
<b>Tabla 4.3.</b> Resultados de los análisis de FRX para elemento traza.....	39
<b>Tabla 7.2.1.</b> Características texturales del núcleo LC-14-I.....	86
<b>Tabla 7.2.2.</b> Características texturales del núcleo LC-14-II.....	86
<b>Tabla 7.2.3.</b> Características texturales del núcleo LC-15-I.....	87
<b>Tabla 7.2.4.</b> Características texturales del núcleo LC-15-II.....	88

# **ESTUDIO PALEOAMBIENTAL DEL HOLOCENO EN EL LAGO LA COLORADA, JALISCO, MÉXICO**

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se plantea un modelo de cambios paleoambientales para los últimos 2,200 años cal AP, en la región de Etzatlán, Jalisco, con base en estudios sedimentológicos, estratigráficos, de Fluorescencia de Rayos X y susceptibilidad magnética.

Con base en la estratigrafía, los núcleos colectados se caracterizan por presentar dos tipos de facies predominantes, una de tipo clástica compuesta por sedimentos limo-arcillosos y otra de turba compuesta por tallos, hojas y restos vegetales. Las características sedimentológicas y estratigráficas permiten determinar que los materiales han sido acarreados por una distancia muy corta, ya que se observan partículas muy angulosas y subangulosas. El origen de las mismas, es por acarreo superficial dentro de la misma cuenca y una mínima cantidad posiblemente es acarreada por el viento. Estas características nos han permitido también determinar el aumento y/o disminución de energía en las corrientes que permitieron el acarreo de los materiales al lago. La tasa de sedimentación promedio para el sitio es de 0.42 mm/año, similar a lo registrado en el lago de Pátzcuaro, sin embargo, se encuentra en un rango intermedio en comparación con las tasas registradas en otros lagos de México.

La susceptibilidad magnética ha sido un buen indicador para estimar la componente detrítica que ingresó al lago a lo largo del tiempo. Los análisis de Fluorescencia de Rayos X, permitieron el cálculo de cocientes geoquímicos que han sido de gran utilidad para inferir características paleoambientales de acuerdo a lo siguiente: precipitación de carbonatos en dos máximos encontrados en 1900 y 750 años cal AP, que sugieren un tirante de agua bajo en el lago; .alrededor de 1300 años cal AP, se sugiere estabilidad en el lago, propicia para el desarrollo de organismos (posiblemente diatomeas); finalmente, para los últimos 300 años de la secuencia, se sugiere un lago eutrófico, con condiciones reductoras en la interfase agua-sedimentos. Por último cabe destacar que con el presente trabajo se pudo realizar también un mapa geológico detallado de la región en estudio de gran utilidad en la interpretación paleoambiental.

HOLOCE PALEOENVIRONMENTAL STUDY IN LAKE LA COLORADA, JALISCO,  
MEXICO

Abstract

In the present work a model of paleoenvironmental changes is proposed for the last 2,200 years cal BP, on the Etzatlán region, Jalisco, which is based on sedimentological, stratigraphic, X-ray Fluorescence and magnetic susceptibility analysis.

Based on the stratigraphy, collected cores are characterized by two predominant types of facies, one of them is a clastic facies composed by clay-silt sediments; the other is a peat facies, composed of stems, leaves and vegetal remains. Sedimentological and stratigraphic characteristics allow to determine that materials have been carried by a very short distance, due to very angular and subangular textures of the observed particles. The origin of that particles, is associated to surface runoff within the basin and a little amount possibly is carried by the wind. These characteristics also have allowed us to determine the increase and/or decrease of energy currents that permit the movement of materials to the lake. The average sedimentation rate for the study site is 0.42 mm/year, similarly to that recorded in the Lake Patzcuaro, however, it has an intermediate range in comparison with rates recorded in other Mexican lakes.

Magnetic susceptibility has been a good tool to estimate the detritic component entering to the lake along the time. X-ray fluorescence analysis, allowed the calculation of geochemical ratios of big utility for inferring the next paleoenvironmental characteristics: carbonate precipitation at two maximums found at 1900 and 750 cal. years BP, suggesting a Low lake level in the lake; about 1300 cal. years BP, it is suggested stability on the lake, producing the development of organisms (possibly diatoms); for the last 300 years of the sequence, an eutrophic lake is suggested, with reducing conditions at the water-sediment interface. Finally, it should be noted that with the present work a detailed geological map of the study region was produced, and was of a big utility for the paleoenvironmental interpretation.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Investigaciones paleoclimáticas en México**

Los estudios relacionados con los cambios ambientales en sedimentos lacustres en México ha quedado manifestada en los diferentes lagos que están distribuidos en todo el país, entre algunos de ellos, Cuenca de México (Caballero y Ortega, 1998; Lozano et al., 1993; Lozano y Sosa., 2015; Lozano y Ortega, 1994; Ortega, 1992; Ortega et al., 2000), Zacapu (Ortega et al., 2002), Pátzcuaro (Bradbury, 2000; Fhisher et al., 2003) Desierto de Chihuahua (Urrutia et al., 1997; Priyadarsi et al., 2013), Etzatlán-Magdalena (Vázquez et al., en revisión), Santiaguillo (Priyadarsi et al., 2015), Laguna Juanacatlán (Matcalfe et al., 2010), Santa María del Oro (Vázquez et al., 2008) y Cuitzeo (Israde et al., 2002).

En estos estudios las principales aplicaciones han sido la correlación de registros de una misma región utilizando diferentes métodos para la identificación de facies en la sedimentación de dichos lagos, como las técnicas de magnetismo, geoquímicas y sedimentológicas. Estas en conjunto describen las diferentes fases de erosión y sedimentación, incrementos en las corrientes fluviales, variación en los niveles lacustres, cobertura vegetal y las perturbaciones que causan los primeros asentamientos en los sistemas naturales.

## **1.2 Estudios previos en Jalisco**

Desde el punto de vista paleoambiental y paleoclimático del Cuaternario existen pocos trabajos de esta región hasta el momento. Tal es el caso de la Etzatlán-Magdalena al Norte (Vázquez et al., en revisión) y la Laguna Juanacatlán (Metcalf et al., 2010) al Occidente del Estado de Jalisco. Otro tipo de estudios en la zona son de carácter regional y referente a los depósitos del volcán Tequila (Frey y Lange, 2011; Wallace y Carmichael, 1994) y por lo tanto, no aportan gran información acerca de las características particulares del lago, pero nos permiten reconocer los materiales sedimentarios que llegan al lago. Algunas de las primeras publicaciones que tratan de la geología regional (Ferrari, 2000) y otros enfocados con la geología estructural (Martínez y Mendoza, 2016), aunque estos se encuentran más enfocados al aspecto de la tectónica regional. Cabe mencionar que estos trabajos presentan información referente a los aparatos volcánicos que rodean al lago.

Se puede notar la escases de literatura relacionada con esta región y en particular para el área del lago y sus alrededores, por tal motivo en este trabajo se presenta de manera general, las características geológicas de la cuenca lacustre y su entorno.

### **1.3 Planteamiento del problema**

La falta de estudios en los depósitos lacustres de lagos en Jalisco, se debe a la escases de núcleos perforados en dicho estado. Establecer las características sedimentológicas, geoquímicas y geofísicas de los depósitos, resulta muy importante el conocimiento de las facies y características paleoambientales. Cabe señalar, que en la región han existido asentamientos humanos desde hace aproximadamente 3000 años, lo que permite relacionar este tipo de estudios con incógnitas asociadas al desarrollo de culturas antiguas, su interacción con el medio ambiente y la influencia que este tuvo en el comportamiento de las sociedades, como con la alteración producida en el ambiente por dichas actividades humanas.

### **1.4 Objetivos**

#### *1.4.1 Objetivo general*

El objetivo principal es reconstruir las condiciones ambientales del Holoceno con base en los registros lacustres del lago La Colorada, estado de Jalisco.

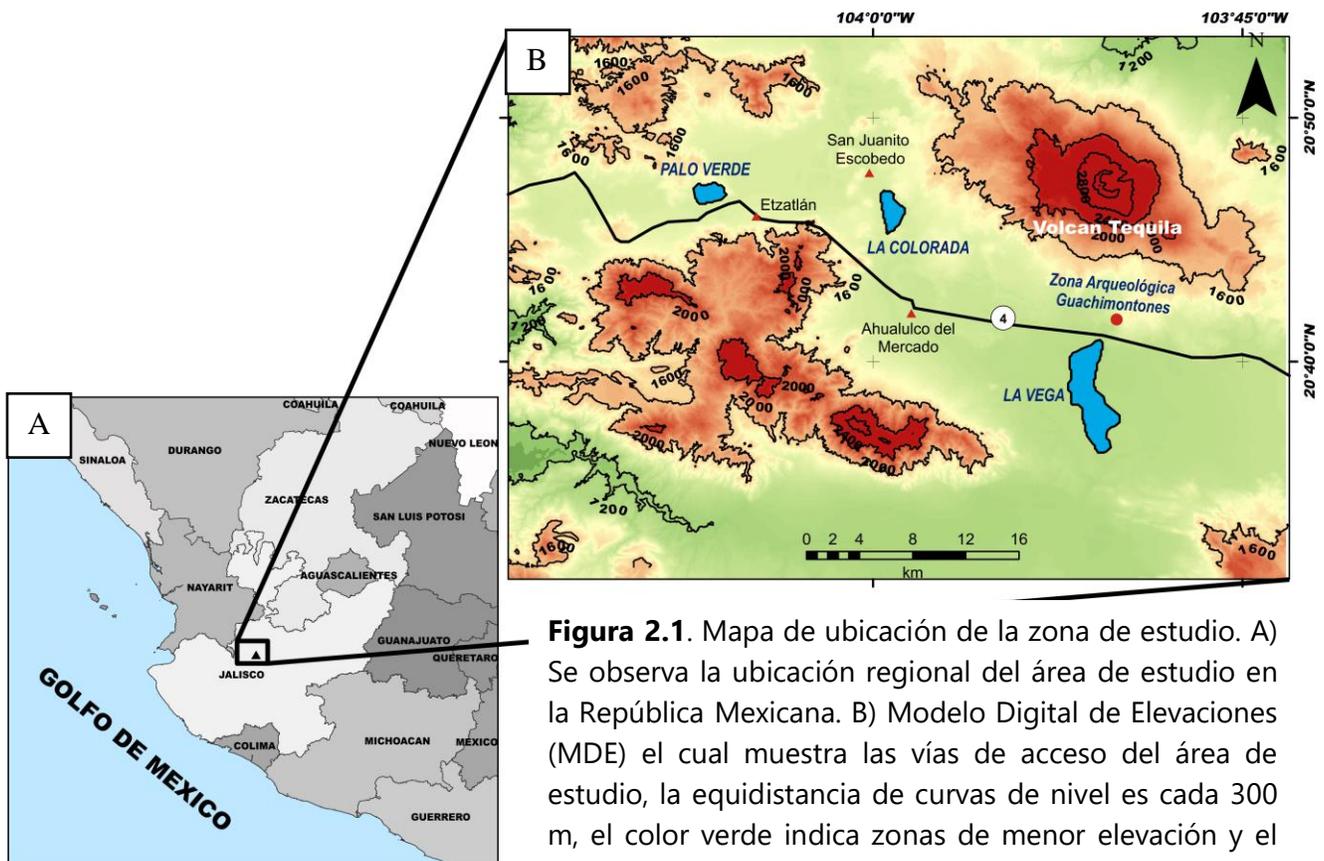
*1.4.2 Objetivos particulares*

1. Elaborar un mapa geológico detallado de la zona.
2. Extraer sedimentos del fondo lacustre.
3. Determinar algunas características sedimentológicas y estratigráficas de los materiales obtenidos en el lago La Colorada.
4. Caracterizar los sedimentos con base en fluorescencia de rayos X y susceptibilidad magnética ( $\chi$ ).
5. Revisar las implicaciones paleoambientales con los resultados obtenidos.
6. Correlacionar algunos datos obtenidos con los registros lacustres de otras regiones de México.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1 Localización y vías de acceso

El lago La Colorada ( $20^{\circ} 46' 7.64''$  N y  $103^{\circ} 59' 12.53''$  W; 1357 m.s.n.m.) se localiza en la parte occidental del estado de Jalisco, al W del volcán Tequila a una distancia aproximada de 15 km. Este se encuentra entre los poblados Etzatlán y Teuchitlán, y las vías principales de acceso las constituyen la Carretera Guadalajara-Tepic No. 15, seguido de la Tepic-Guadalajara No. 70 y finalmente se toma la Carretera Libre El Refugio–San Marcos (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Mapa de ubicación de la zona de estudio. A) Se observa la ubicación regional del área de estudio en la República Mexicana. B) Modelo Digital de Elevaciones (MDE) el cual muestra las vías de acceso del área de estudio, la equidistancia de curvas de nivel es cada 300 m, el color verde indica zonas de menor elevación y el rojo las más elevadas

## 2.2 Fisiografía

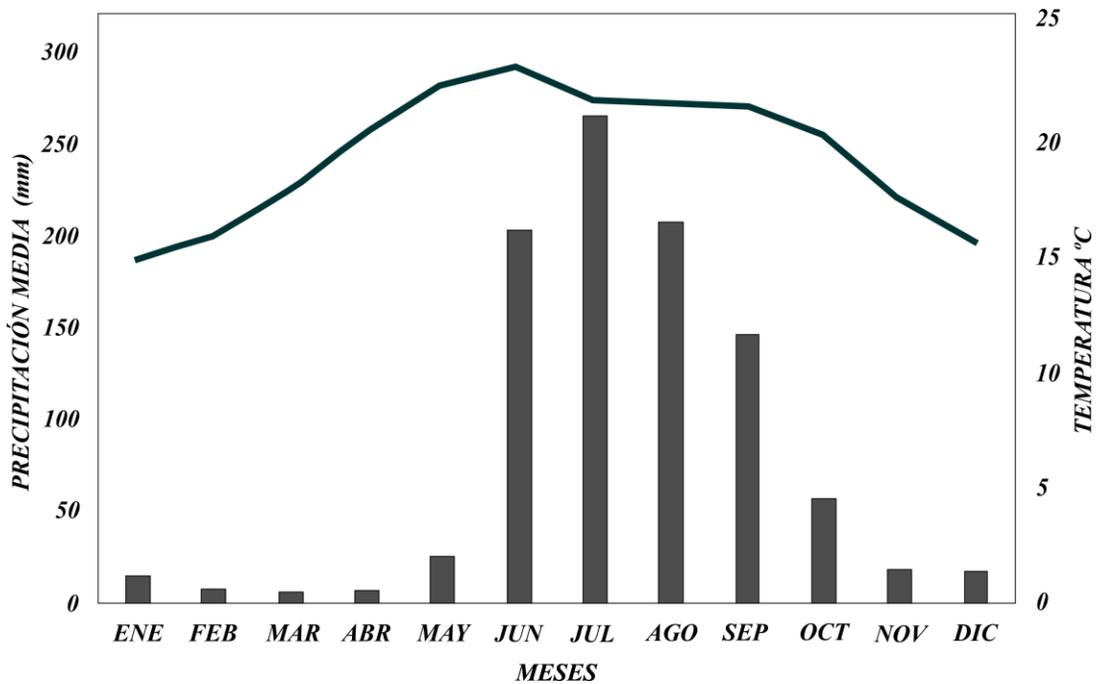
La región se localiza en la parte occidental de la Provincia Fisiográfica Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). La FVT se localiza entre los paralelos 19° y 21 ° N con un ancho entre 50 y 150 km, orientación general EW de 950 km aproximadamente y cubre una área de 158,515.98 km<sup>2</sup> (CONABIO, 1990). Esta provincia presenta grandes aparatos volcánicos de tipo estratovolcán con erupciones de tipo explosivo (Ferrari, 2000), planicies muy extensas donde se ubican lagos, y llanuras aluviales, aunque localmente se presentan lomeríos de aproximadamente 100 m de elevación.



**Figura 2.2.** Mapa de ubicación del área de estudio dentro de la provincia de la FVT. Se muestra el límite estatal del estado de Jalisco.

### 2.3 Clima y vegetación

El clima predominante en Jalisco es en su mayoría templado-lluvioso, con lluvias en verano (Cw), según la clasificación de Koppen, Aunque a lo largo del año se pueden encontrar otros tipos de climas dependiendo de la zona como el sub-húmedo y semicálido. La zona se caracteriza por una temperatura media anual de 19.1 °C (CONAGUA 1986-2007) aunque las temperaturas son variables a lo largo del año. La temperatura del mes más frío es de ca. 15 °C y la del mes más cálido ca. 23 °C. La precipitación media anual es de 77.1 mm/mes (CONAGUA 1986-2007).



**Figura 2.3.** Se observa con barras la precipitación media mensual para todo el año (CONAGUA), en el eje Y se muestra la precipitación media en mm. Con una curva se muestra la temperatura (°C) media mensual para todo el año en el eje Y derecho se muestra la escala de temperatura.

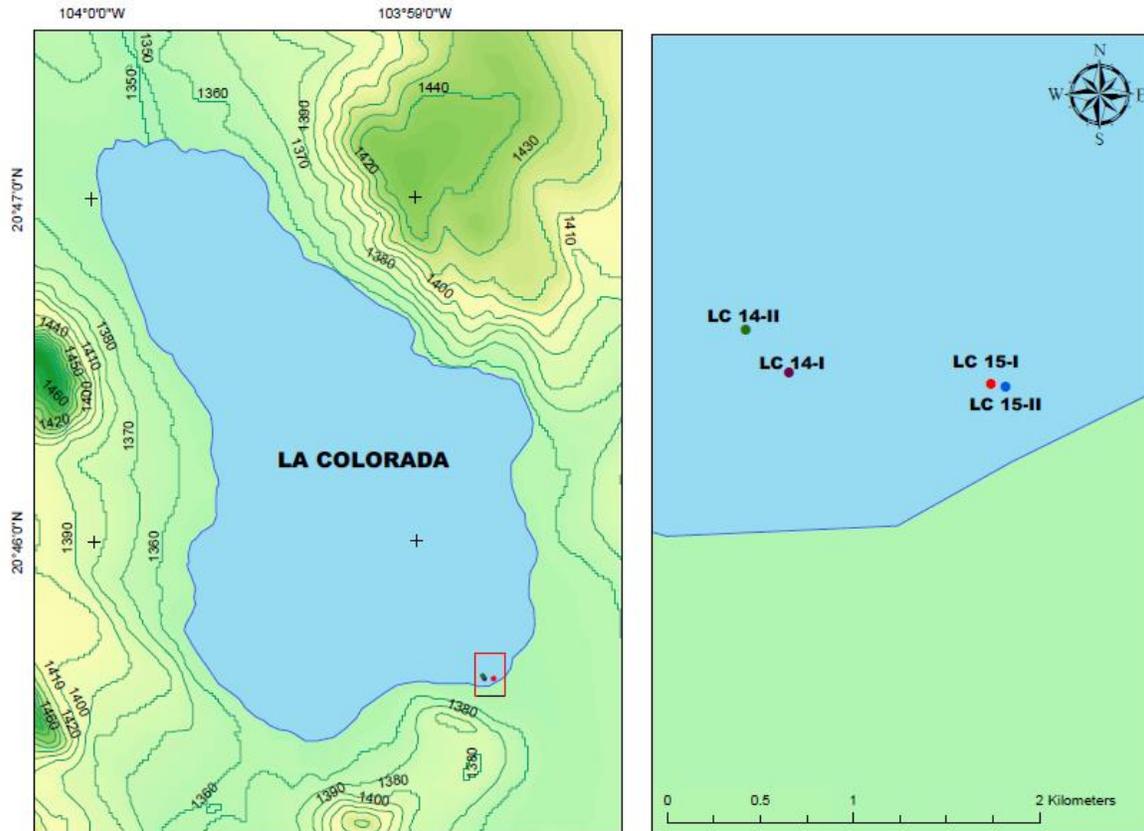
El clima en el área de estudio es el adecuado para que crezca una gran variedad de flora y fauna. El factor principal que causa la distribución de la flora en la región es el clima. Podemos encontrar bosque de encino, bosque de encino-pino, selva caducifolia, selva de Mezquital, pastizal y zonas de cultivo (INEGI, 2015). El lago cuenta con varios ríos y arroyos que lo alimentan: como Los Osotes (NE), Los Laureles (N), Los Robles (N), Los Rosillos (S), La Candelaria (S), El Aguacate (SW) y en tiempo de lluvias, algunos otros ríos intermitentes.

#### **2.4 Características morfológicas del lago**

El cuerpo lacustre se encuentra dentro de una depresión natural producto de un entrampamiento que se encuentra a 1357 m.s.n.m, con un diámetro irregular entre 1 y 2 km y una profundidad máxima de ca. 12 m. El área que representa el espejo de agua en etapas de precipitación máxima es de 4.4 km<sup>2</sup> (Figura 2.4). El lago presenta una forma de tipo elipsoidal con eje mayor orientado NW-SE de 3.5 km de longitud y eje menor de 2.2 km en dirección NE-SW.

Internamente el lago se encuentra modelado por la topografía circundante, que ocasiona pendientes suaves en la mayor parte del mismo y la zona profunda en su

porción centro sur. La morfología en la parte interna es controlada también por el aporte de sedimentos que ingresan en época de lluvias al mismo.



**Figura 2.4.** Se muestra las características topográficas del lago, utilizando las curvas de nivel (curvas a cada 10 m). Puntos de muestreo de los núcleos.

## 2.5 Características geológicas regionales

### 2.5.1 Unidad 1. Secuencia volcánica del Cretácico (KsPpaTR)

La secuencia cretácica (SGM, 2008) se compone de Tobas Riolíticas, estas rocas se encuentran aflorando unos 5 km al SW del Lago La Colorada (Figura 2.5). La

descripción petrográfica de estas rocas presenta cristales de cuarzo, feldespatos potásico y en menores cantidades anfíboles.

### *2.5.2 Unidad 2. Secuencia volcánica Neógeno-Cuaternario (NplQptB)*

Esta secuencia se compone de rocas de tipo basáltico, con edades de  $0.14 \pm 0.012$  (Ma),  $1.13 \pm 0.159$  (Ma) y  $3.891 \pm 0.035$  (Ma) (Catarine et al., 2005) se encuentran a unos 12 km al N del poblado de Etzatlán (Figura 2.5), estas rocas presentan tanto fenocristales como micro cristales en su mayoría de plagioclasas con cantidades menores de ortopiroxeno. Las lavas del sur son típicamente vesicular, escasamente porfirítica y tienen una masa basal microcristalina, mientras que en el este son vítrea y en general similares a las lavas del volcán principal.

### *2.5.3 Unidad 3. Secuencia volcánica del Neógeno (NmplTR)*

Secuencia compuesta de ignimbritas y depósitos volcanoclásticos de edades 26.7 – 4.4 Ma (Wallace y Carmichael, 1994). Estas rocas se encuentran aflorando a 9 km al E del lago; al N del mismo a 4 y 7 km cerca del poblado de San Juanito Escobedo y al W a 15 km del lago cerca del poblado Santa Rosalia.

*2.5.4 Unidad 4. Secuencia Andesítica – Basáltica del Neogeno - Cuaternario (NplQptA-B)*

Esta secuencia está representada por rocas andesíticas y basálticas, que se componen de un 8 – 25% de cristales (fenocristales y micro cristales), la mayoría de plagioclasas con cantidades menores de ortopiroxeno, augita, titanomagnetita e ilmenita (Wallace y Carmichael, 1994). Estas rocas se encuentran en un pequeño afloramiento a 7 km al N del lago.

*2.5.5 Unidad 5. Secuencia Basáltica-Andesítica del Cuaternario, Pleistoceno (QptBA)*

Secuencia compuesta por basaltos ligeramente alcalinos a traquiandesitas. Estos flujos presentan edades de 1.6 – 0.53 Ma (Wallace y Carmichael, 1994). Los flujos antes mencionados se encuentran rodeando el lago y también se encuentran al NE a unos 12 km del lago. Estos flujos provienen del vulcanismo mono genético de la zona.

*2.5.6 Unidad 6. Secuencia Dacíticas del Cuaternario, Pleistoceno (QptDa)*

Secuencia de dacitas de horblenda, que fueron expulsadas por fracturas en el flanco occidental del volcán Tequila. Presentan edades de 1.120 y 0.2 Ma. y

contienen 64 – 67 % en peso de SiO<sub>2</sub> (Holli M. Frey, Rebecca A. Lange, 2011). Estos flujos son posteriores al edificio principal del volcán Tequila (Wallace y Carmichael, 1994) y se encuentran aflorando a 3 km al E del lago.

#### *2.5.7 Unidad 7. Secuencia Riolítica Pleistocénica (QplTR)*

Esta secuencia se compone de depósitos de riolita y obsidiana que varían en edad de 0.9 a 0.23 Ma (Harris, 1986). De acuerdo a su composición química forman un conjunto heterogéneo de rocas que consisten de riolitas, riolitas peraluminosas, metaluminosas y peralcalinas (Wallace y Carmichael, 1994). Estas se encuentran aflorando a aproximadamente 7 km al NE del lago y a 2 km al S del poblado La Magdalena Juanito Escobedo. Sin embargo, esta secuencia representa la mayor parte de las rocas de la región.

#### *2.5.8 Unidad 8. Secuencia Aluvial del Cuaternario (Qhoal)*

Secuencia compuesta de materiales detríticos principalmente compuestos de rocas volcánicas, que proceden de la zona circundante. Su edad es Holoceno y actualmente se encuentran rellenando las depresiones, representando grandes planicies de hasta 20 km de extensión.

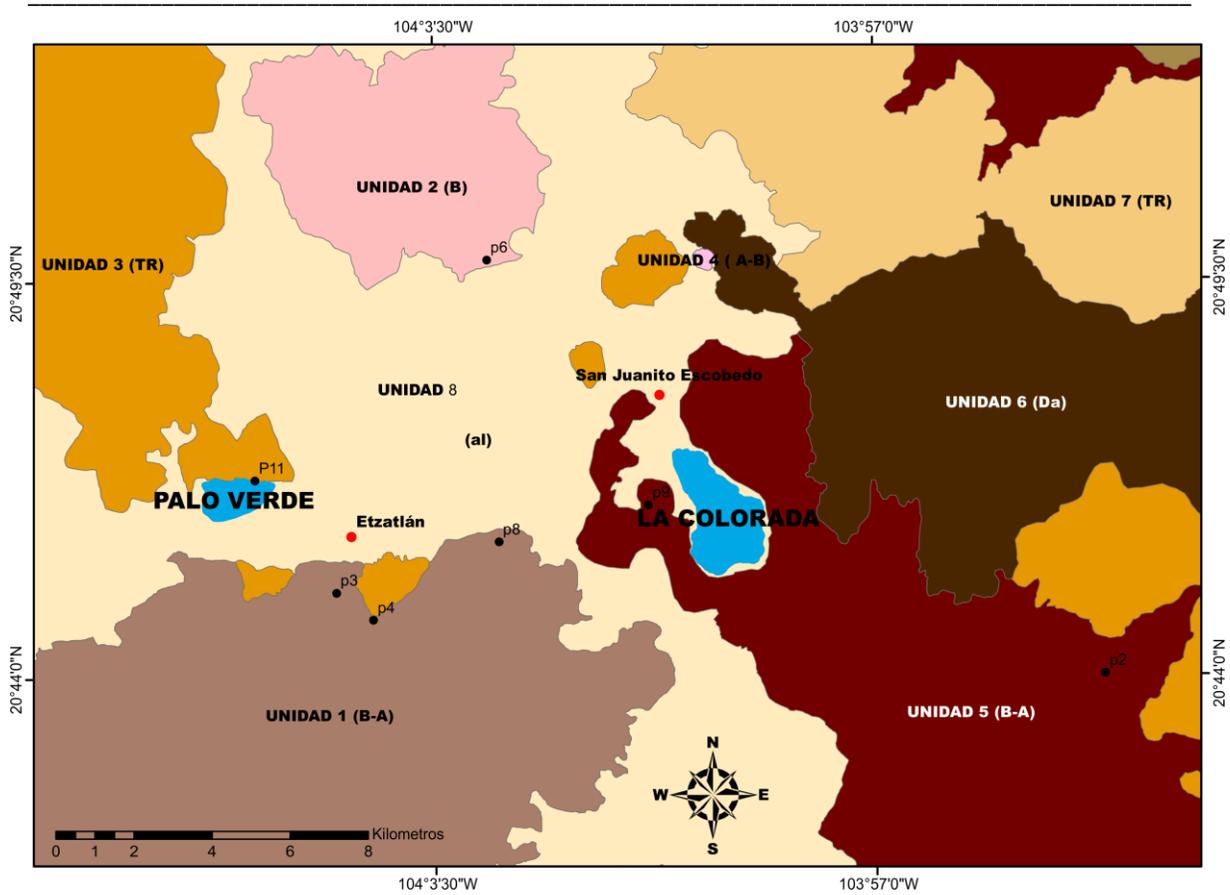


Figura 2.5. Mapa geológico de la zona Etzatlán –Magdalena.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Elaboración del mapa geológico**

Este producto del presente estudio se llevó a cabo en tres etapas fundaméntales. La primera de estas consistió en la elaboración de un mapa geológico preliminar utilizando el Modelo digital de elevación y curvas de nivel de la región proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2016), las ortofotos (INEGI, 1996 y 1999) y el mapa geológico previo realizado por Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2008), Google Earth (GE, 2016). Este mapa preliminar se elaboró haciendo uso del software ArcMap 10.2.

La segunda etapa consistió en una visita a campo, en la cual se colectaron las muestras de las diferentes unidades litológicas de la región Etzatlán-Magdalena y se elaboraron láminas delgadas para ser descritas en un microscopio petrográfico (descrito más adelante).

La última etapa consistió en la comparación de las unidades descritas inicialmente con estos datos para actualizar o verificar la información del mapa preliminar y de esta forma obtener un mapa Geológico más detallado.

### *3.1.1 Muestreo de Rocas*

Se realizó una visita en marzo del 2016 a la zona Etzatlán-Magdalená para la obtención de rocas. El muestreo se llevó a cabo recorriendo los caminos en la zona, con la intención de localizar afloramientos (Figura 3.1); se obtuvieron un total de 9 muestras de diferentes sitios, las cuales fueron rotuladas y transportadas al Laboratorio de paleoambientes de la ENES Morelia, UNAM.

Posteriormente se realizó la elaboración de secciones delgadas de cada una de las muestras en el laboratorio de Petrografía del Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán.

### *3.1.2 Petrografía*

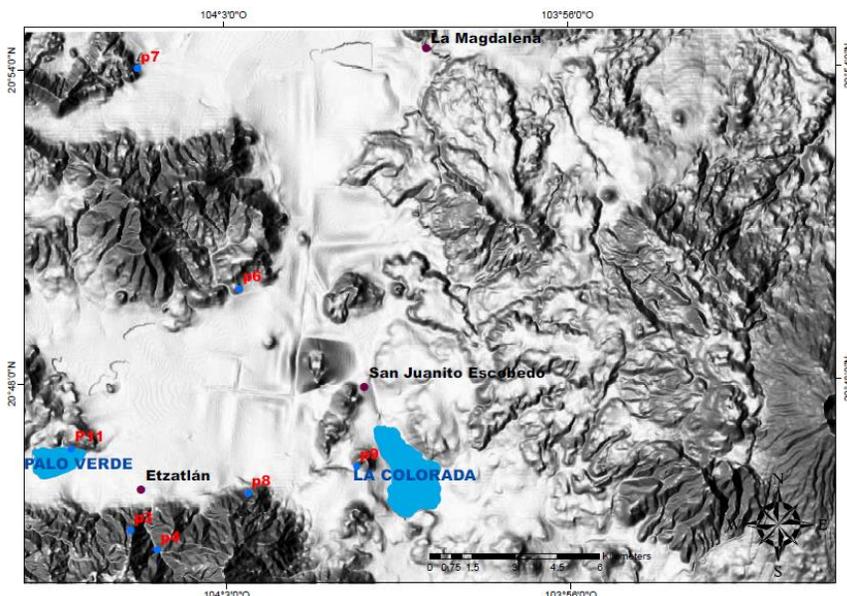
El proceso de petrografía empieza con elaborar láminas de rocas que se desean analizar. El procedimiento de laminación es muy sencillo: inicialmente se obtiene un testigo en forma de cubo del tamaño de un portaobjetos, enseguida se desbasta una de las caras pasando el testigo por los abrasivos más gruesos, después se pega en el portaobjetos y se deja reposar por unas horas, posteriormente, se adelgaza utilizando una cortadora de disco de diamante y

finalmente, se desbasta pasando por los diferentes abrasivos (240, 400, 600, 1000 y 5 micras) hasta finalizar en 30 micrómetros de espesor.

El mineral que sirve como indicador es la plagioclasa: cuando esta presenta tonos de gris, la lámina esta lista. Las descripciones de cada una de las láminas se muestran en los resultados (Anexo 1a)

### **3.2 Colecta de núcleos**

Se realizaron varias visitas a la región de Etzatlán para la obtención de sedimentos en el cuerpo lacustre La Colorada, la primera se llevó a cabo en septiembre de 2014 y las sucesivas en agosto y diciembre del 2015. La perforación se llevó a cabo en la parte más somera del lago La Colorada. Los sitios perforados se encuentran en la porción S del lago. El tirante de agua bajo el cual se realizó la obtención del material es de ca. 1 m, a unos 50 m de la orilla del lago.



**Figura 3.1.** Puntos de muestreo de rocas para la elaboración de un mapa geológico.

Los núcleos de sedimentos se obtuvieron mediante un procedimiento manual, utilizando una técnica de percusión. Los materiales que se utilizaron para las perforaciones son los siguientes: tubos de 8 pulgadas de PVC, martillo de goma para aplicar percusión, una tabla de longitud 50 cm y grosor de 5 cm. Se colocó el tubo de PVC de forma vertical en la zona idónea para la perforación, es decir, donde la pendiente del lago sea muy baja. Es recomendable evitar la presencia de sedimentos del tamaño de gravas (>4 mm) y contar con poco viento y oleaje en el lago. En seguida se colocó una tela y una tabla encima del tubo, esto para amortiguar el golpe y disminuir las posibilidades de astillarlo. La tabla fue sujeta por dos personas, que estaban ubicadas en los extremos al mismo tiempo una tercera persona aplicará percusión, golpeando fuertemente la tabla colocada sobre el tubo, hasta alcanzar la máxima penetración.

Una vez alcanzada la profundidad de 1 m se procedió a retirar el núcleo, para ello es necesario sellar la parte superior del tubo con una bolsa de plástico, para generar succión y evitar la pérdida de sedimentos contenidos dentro del mismo. Para la extracción se coloca un objeto (madera, varilla) perpendicular al tubo (palanca) y se sujeta con cintas que permiten altas tensiones; en seguida se colocan

personas (las que sean necesarias) en cada uno de los extremos de la palanca y de forma conjunta se aplica fuerza hacia arriba hasta extraer el núcleo.

Después de la extracción, se deja estabilizar el tubo de forma vertical por unos minutos, con el objetivo de que las partículas suspendidas en el agua contenida dentro del tubo se sedimenten; en seguida se retira el agua, se corta la parte del tubo que no contiene sedimento. Finalmente el extremo superior del tubo se tapa con esponja y sellado con una bolsa de plástico y cinta en ambos extremos, para conservar la humedad de los sedimentos. El tubo se seca y se etiqueta con el lugar, fecha, coordenadas geográficas y una flecha que indica la parte inferior del mismo.

Posteriormente los núcleos fueron trasladados al laboratorio de paleoambientes de la ENES Morelia, donde fueron almacenados en un refrigerador a 4 °C, para conservar la humedad y condiciones de temperatura similares al sitio de muestreo. A continuación se cortaron los núcleos longitudinalmente (dos mitades). Al cortar el PVC se debe cuidar que el disco no toque el sedimento, ya que esto puede ocasionar que el núcleo se contamine. Se puede utilizar una navaja en caso de que no se haya cortado completamente el mismo. Enseguida se coloca una cuerda de nylon en la ranura entre ambas mitades del tubo y se recorre a lo largo de todo el núcleo para cortar el sedimento. Para separar las caras del núcleo es necesario colocar la ranura en forma vertical y separarlas hacia ambos lados con cuidado, lo

que permite tener cada mitad en una canaleta de PVC independiente; ambas caras del núcleo se limpian de forma lateral por medio de una espátula. De estas dos caras, una de ellas se utiliza para hacer el submuestreo, para los diferentes análisis a realizar, la otra es fotografiada y guardada como testigo.

Los núcleos se obtuvieron de las siguientes coordenadas: La Colorada 2014-I (20°45'34.87"N, 103°58'47.67"W), La Colorada 2014-II (20°45'35.33"N, 103°58'47.97"W), La Colorada 2015-I (20°45'34.70"N, 103°58'46.11"W) y La Colorada 2015-II (20°45'34.73"N, 103°58'46.22"W) (Figura 2.4).

### **3.3 Análisis iniciales**

#### *3.3.1 Descripción estratigráfica y sedimentológica*

Se realizó una descripción de las características estratigráficas de los cuatro núcleos (LC-14-I, LC-14-II, LC-15-I y LC-15-II). Se requirió de dos equipos, microscopio estereoscópico marca OLYMPUS SZX7 y petrográfico marca NIKON ECLIPSE 50iPOL, después se elaboraron un total de 23 frotis con una pequeña cantidad de material para su descripción. El microscopio estereoscópico fue utilizado para la descripción de las características texturales de los sedimentos, mientras que el

petrográfico se requirió para observar las características ópticas de los sedimentos y determinar su composición.

Este análisis se realizó utilizando un mínimo de muestra de unos cuantos miligramos. las características que se determinaron fueron las siguientes: esfericidad, redondez, características superficiales, fábrica, madurez, clasificación, forma, porcentaje de arcilla, limo y arena, utilizando las clasificación de Arche, 2010.

Para la determinación del tamaño de las partículas se utilizó la clasificación de Wentworth, 1922, que establece los rangos de tamaños corresponden a las partículas de arcilla, limo y arcilla en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). Para la determinación del color se utilizó la tabla de colores Munsell (2000), en la determinación del espesor de los estratos se utilizó la clasificación de Boggs (1995).

Las partículas detríticas encontradas presentan, en general, características típicas de un depósito con materiales que fueron transportados desde distancias relativamente cortas, ya que las partículas van de muy angulosas a subredondeadas. El origen probable de las partículas es por acarreo superficial dentro de la misma cuenca. A continuación se presenta la descripción de cada una de las facies de la columna.

### 3.3.2 *Datación por $^{14}\text{C}$*

La escala del tiempo se estableció a través de una muestra tomada a una profundidad de 89 cm en el núcleo LC-15-II (núcleo de mayor longitud). La datación se llevó a cabo en la Universidad de Branch, Florida, por Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory. Para realizarla se extrajo una pequeña muestra de 4.7 g de sedimento total rico en materia orgánica en la parte central del núcleo. Se tuvo particular cuidado para evitar cualquier tipo de contaminación en la toma de la muestra y obtener una datación confiable.

La datación por radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ), es uno de los métodos más utilizados para generar cronologías de Cuaternario tardío en los últimos 50,000 años (Bernal, 2010): se emplea para fechar la mayoría de las reconstrucciones climáticas para el Holoceno y el Pleistoceno tardío (Bard, 1998; Lowe y Walker, 2000; Hajdas, 2009). Este método es muy importante en los trabajos paleoambientales, es crucial poder referir a la escala temporal cambios ambientales estudiados en diferentes registros y distribuidos en diferentes latitudes y el radiocarbono es la principal herramienta que se ha utilizado para fechar la mayoría de las reconstrucciones climáticas para el Holoceno y el Pleistoceno tardío (Bard, 1998; Lowe y Walker, 2000; Hajdas, 2009).

La tasa de sedimentación (velocidad de sedimentación) se obtiene a partir de la ecuación  $d/t$ , donde  $d$  representa la distancia entre dos fechas conocidas y  $t$  el tiempo ocurrido entre ambos puntos, reportándose en unidades de mm/año.

### **3.4 Fluorescencia de Rayos X (FRX)**

El estudio se llevó a cabo en un espectrómetro de masas de marca Niton FXL-FM-XRF Analyzer. Este cuenta con un detector de diámetro grande por deriva de silicio optimizado geométricamente. El equipo utilizado se encuentra en el laboratorio de paleoambientes del Instituto de Geología de la UNAM. El equipo cuenta con diferentes muestras de calibración y el laboratorio cuenta con calefacción, lo cual en conjunto nos proporciona las mejores condiciones para obtener resultados confiables.

La FRX es un método analítico para determinar la composición química de todo tipo de minerales. Los materiales para este proceso deben estar en forma de sólidos. La FRX puede ser usada en ocasiones para determinar el espesor y la composición de capas y recubrimientos (Brouwer, 2010).

Esta técnica provee análisis geoquímicos, de elementos mayores y traza. Para ello se requirieron muestras de ca. 4-5 gr de sedimento; se analizaron un total de 23

muestras en las cuales se midió todo el espectro de elementos químicos y finalmente se eliminaron los que están por debajo del límite de detección.

Las muestras se obtuvieron cada cuatro centímetros de distancia a lo largo del núcleo (LC-14-I y LC-15-II), se secaron en un horno a 50 C° durante tres días, se trituraron a 40  $\mu\text{m}$ , haciendo uso de un mortero de ágata. Finalmente se colocó la muestra en un porta muestras con una película fotográfica que permite al lector del escáner una detección homogénea del material.

### **3.5 Susceptibilidad magnética**

La Susceptibilidad magnética ( $k$ ) se midió cada 2 cm a lo largo de los cuatro núcleos (LC-14-I, LC-14-II, LC-15-I y LC-15-II). El equipo consta de un riel de madera (conformado solo por materiales no magnéticos) un sensor en forma de anillo (Modelo MS2C de 10 mm de diámetro), un susceptibilímetro (MS3) y una PC. Inicialmente el equipo tiene que estabilizarse durante un lapso de 15 minutos; para verificar que el equipo está calibrado se utiliza una muestra con valores conocidos proporcionados por el fabricante (Bartington). Las mediciones se llevaron a cabo de la cima a la base, desplazando cada núcleo individualmente sobre el riel y se tomaron las lecturas correspondientes.

La  $k$  en los núcleos depende de las concentraciones de minerales magnéticos (ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos) que la componen.

Los sedimentos tienen una respuesta magnética relativamente baja, en comparación con otro tipo de rocas: por ejemplo volcánicas que presentan respuestas más altas. No obstante, el equipo que se utilizó es capaz de detectar fracciones muy pequeñas de minerales magnéticos.

La magnetización inducida consiste en exponer un material a un campo magnético ( $H$ ), este adquiere una magnetización inducida ( $M_i$ ); ambos parámetros se relacionan por medio de la susceptibilidad magnética ( $k$ ) de acuerdo a la siguiente ecuación  $k = M_i/H$ , por lo que es adimensional y se reporta en el sistema internacional (SI). La  $k$  se define como la magnetización adquirida por unidad de campo, en otras palabras es la facilidad con la que un material puede magnetizarse (Evans y Heller, 2003) o la magnetizabilidad de una sustancia bajo la presencia de una campo magnético externo (Thompson y Oldfield, 1986).

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Base de datos digitales**

Se realizó una base de datos compuesta de todas las fotos tomadas en las secciones de núcleo, antes de ser muestreados para las distintas técnicas de estudio. Esta consta de fotografías digitales que permiten su fácil manejo en cualquier aparato (computadora, celular, tableta, etc.). Cada imagen abarca de forma individual los núcleos y los relativos acercamientos por secciones (Figura 4.1), permitiendo tener un registro que quedará como testigo de cómo se encontraba el sedimento en el momento de abrir los tubos de PVC. Esta base de imágenes servirá para observar las características tales como tonalidades de los sedimentos, laminaciones, etc. En la figura 4.1 se muestra la imagen correspondiente a los cuatro núcleos colectados (LC-14: I y II, LC-15: I y II). Todas las descripciones correspondientes a la estratigrafía se llevaron a cabo directamente en los núcleos, ya que en ellos se pueden observar con mayor detalle las características.



**Figura 4.1.** Fotografía digital mostrando los cuatro núcleos de sedimentos colectados en el lago La Colorada. Se observan las diferentes tonalidades a lo largo de los cuatro núcleos. Escala grafica en cm.

## **4.2 Petrografía de las rocas volcánicas del área de estudio**

Se realizaron nueve muestras para petrografía para diferenciar unidades litológicas cartografiadas en el mapa 3.1. Las principales unidades analizadas fueron la 1, 2, 3 y 5, las unidades restantes, 4, 6, 7 y 8 no se realizó el nuevo estudio petrográfico debido a la ausencia de afloramientos accesibles durante el trabajo de campo a causa entre otros factores de la alta densidad de vegetación y a la presencia suelos en la zona de estudio.

A partir del análisis de rocas en ocho secciones delgadas obtenidas de las diferentes unidades de la región Etzatlán-Magdalena (Anexo 1a), así como de los sedimentos de la región, se han registrado nueve unidades geológicas, ocho de estas asociadas a procesos ígneos y una asociada a depósitos de origen sedimentario reciente (Figura 2.5).

La unidad de basalto-andesita (Unidad 5, muestra P2) presenta textura holocristalina, con cristales de plagioclasa y olivino, mientras que la unidad constituida principalmente de andesita-basalto (unidad 1, muestra P3 y P8) presenta textura holocristalina, compuesta de minerales como plagioclasa (oligoclasa), olivino y minerales secundarios como sericita y óxidos de hierro. La muestra P9 (depósitos de caída) se encuentra cubriendo la unidad 5, presenta textura holohialina (compuesta esencialmente de vidrio), tiene escasos minerales

de plagioclasas y contiene muchas vesículas. Otra unidad de este tipo es la 2 (muestra P6) se observa una textura microlítica con minerales como plagioclasas, clinopiroxenos y olivino, aunque compuesta principalmente por microlitos de plagioclasa.

La unidad de Toba Riolítica o ignimbrita (Unidad 3, muestras P4 y P11) presenta una textura fluidal o criptocristalina, gran cantidad de poros; esta compuesta de cristales de plagioclasa, óxidos de hierro y fragmentos de otras rocas piroclásticas y estructuras tipo fiames.

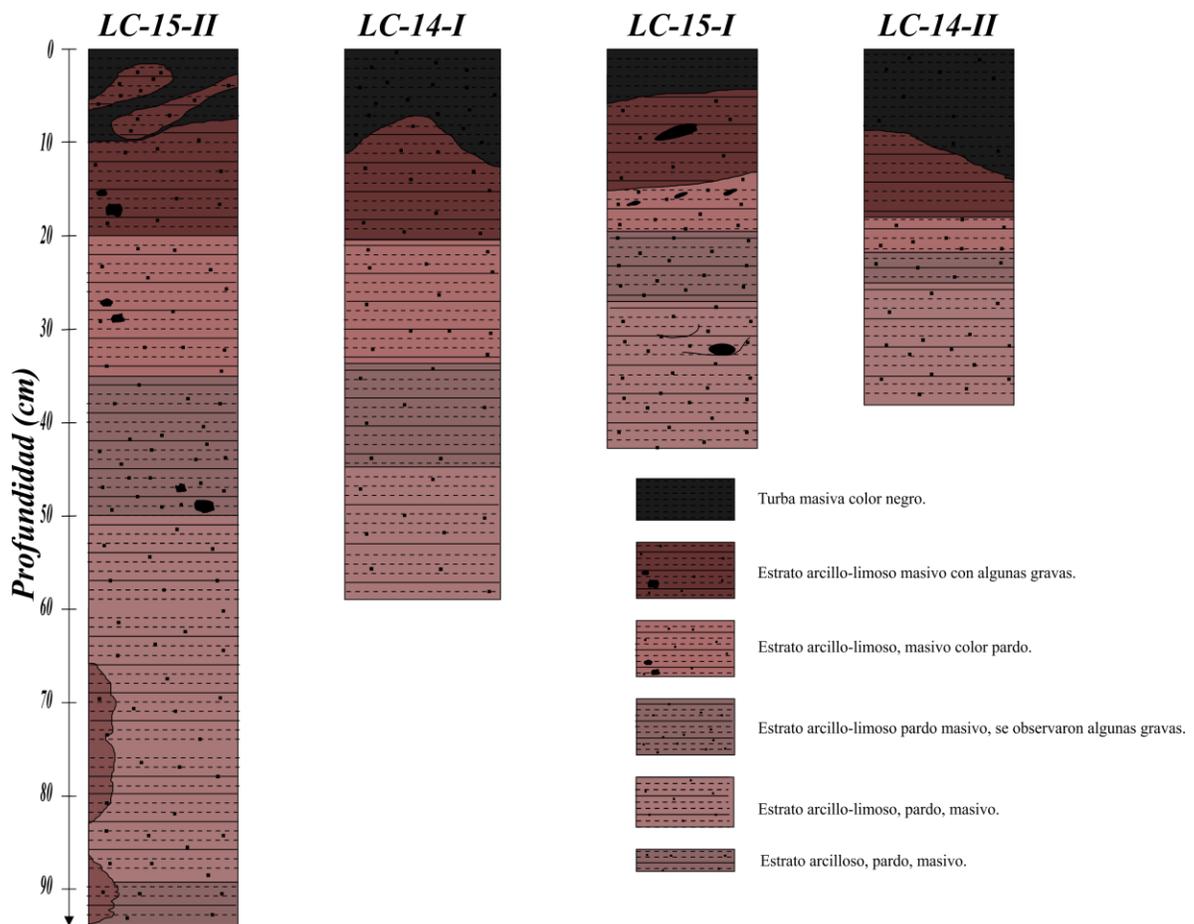
### **4.3 Estratigrafía del lago La Colorada**

Los núcleos recuperados presentan estratificación con espesores variables desde cinco hasta 20 cm, los contactos entre cada uno de estos son irregulares, rectos y la mayoría transicionales.

Los sedimentos consisten de partículas que se encuentran en el rango de tamaños de las arcillas a las arenas más finas y muy escasas arenas gruesas, y estas varían a lo largo de la columna en los diferentes núcleos. La litología se compone de diferentes tipos de materiales como turba (material vegetal, raíces, pastos, etc.), intercalaciones de arenas limosas, limos, limos arcillosos, arcillas limosas y arcillas,

formando una secuencia con facies de diferentes tonalidades, las cuales varían entre negro y pardo.

La columna estratigráfica que se presenta en este trabajo, es altamente detallada, se muestra cada uno de los estratos que se observan indicando su respectivo tamaño de partículas, un total de seis unidades con características litológicas diferentes (Figura 4.3), las cuales se describen a continuación:



**Figura 4.2.** Columnas estratigráficas de los núcleos LC-14-I, LC-14-II, LC-15-I y LC-15-II.

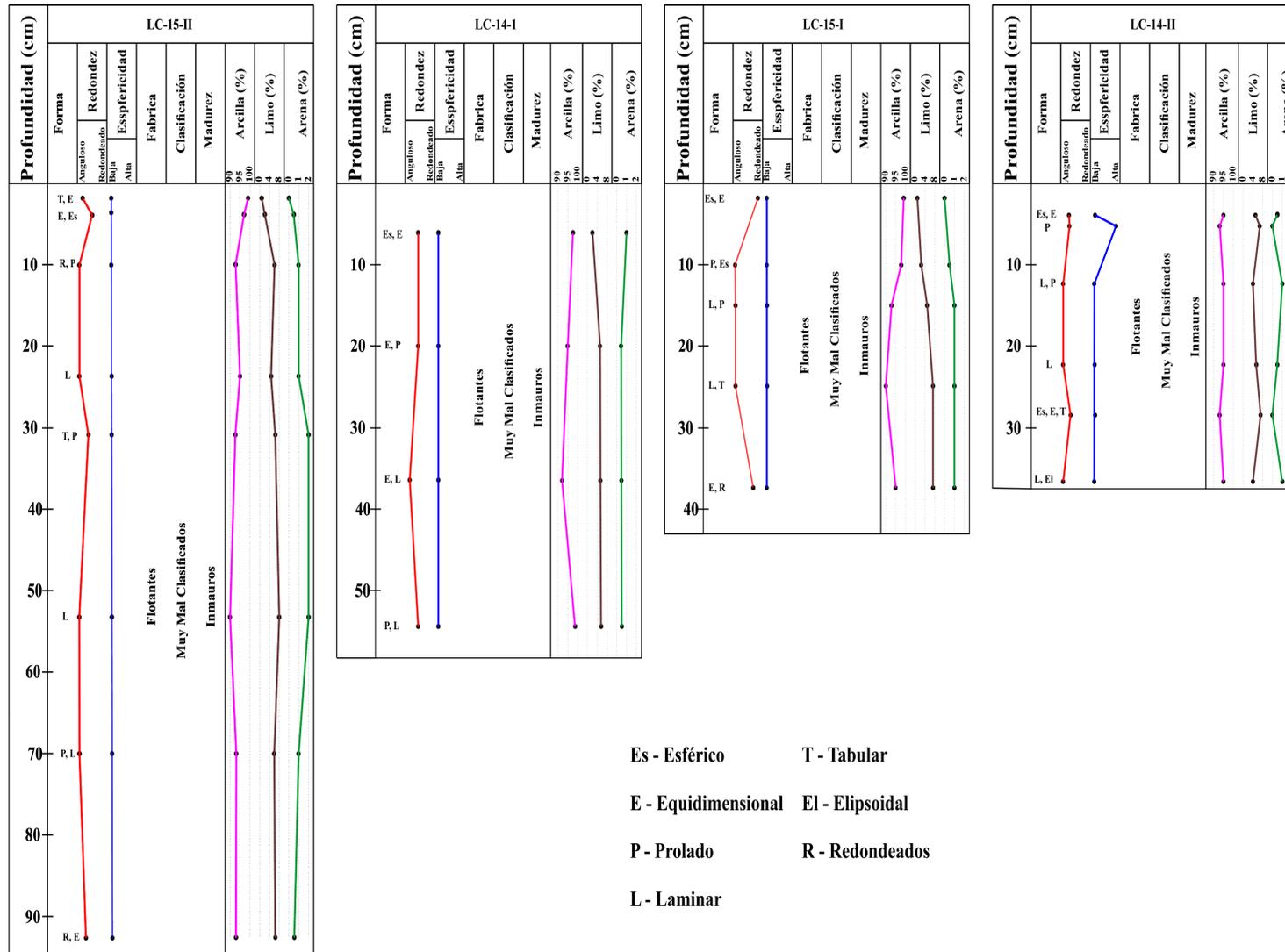
En términos generales se utilizó una columna maestra para la descripción, ya que son muy parecidos y permiten una buena correlación. la columna maestra se describe de la siguiente manera: primer unidad, abarca de los 0 a los 11 cm de profundidad y contiene principalmente arcilla (99%) y limos (1%), dentro de este intervalo se encontró una gran cantidad de materia orgánica (turba); la segunda unidad abarca de los 11 a los 20 cm, este intervalo está compuesto principalmente de arcilla (93%), limos (6%) y arena (1%); la tercera unidad, abarca de los 20 a los 35 cm, y presenta principalmente arcilla (94%), en menores proporciones limo (5%) y arenas (1%); la cuarta unidad va de los 35 a los 50 cm, contiene arcillas (93%), limos (6%) y arenas (1%); la quinta unidad se encuentra de 50 a 88 cm, conteniendo arcillas (90%), limos (8%) y arenas (2%); finalmente se encuentra la sexta unidad que es la base del núcleo perforado, a la cual corresponden arcillas (93%), limos (6.5%) y arenas (0.5%), (Figura 4.4).

A continuación se describen las unidades (columna maestra) de manera detallada de acuerdo a los parámetros sugeridos por el Limnological Research (Schnurrelverger et al., 2003):

Facie 1 (Arcillo-limoso, color 5YR3/1), Facie 2 (Arcillo-limoso, color 10YR2/2), Facie 3 (Arcillo-limoso, color 10YR3/1), Facie 4 (Arcillo-limoso, color 7.5YR3/3), Facie 5

(Arcillo-limoso, color 7.5YR2/1), Facie 6 (Turba, color N1.5/0). Una gran componente de estos sedimentos son partículas alóctona clásticas.

Las partículas detríticas encontradas presentan, en general, características típicas de un depósito que fue transportado de distancias muy cortas, que las partículas observadas son de muy angulosas a subredondeadas. El origen probable de las partículas, es por acarreo superficial dentro de la misma cuenca. A continuación se presenta la descripción para cada una de las facies de la columna.



**Figura 4.3.** En la siguiente figura se muestran las características texturales y sus componentes graficadas a profundidad en cada uno de los núcleos analizados.

Facies 1 (Arcillo-Limosa): Esta facie presenta un espesor de 6 cm (94 a 88 cm, LC-15-II), es un estrato masivo, color gris muy oscuro, con partículas angulosas equidimensionales. Contiene limos (93 %), Arcillas (6.5 %) y arenas (0.5 %).

Facie 2 (Arcillo-Limosa): Presenta un espesor de 38 cm (88 a 50 cm, LC-15-II), es un estrato masivo, color grisáceo oscuro, contiene partículas muy angulosas con esfericidad baja y forma laminar y prolada. Contiene limos (91.5 %), Arcillas (7 %) y Arenas (1.5 %) aunque también contiene algunas gravas.

Facie 3 (Arcillo Limosa): presenta un espesor de 15 cm (50 a 35 cm), es un estrato masivo, color pardo-grisáceo, contiene partículas subangulosas con esfericidad baja y forma laminar. Contiene Limos (93 %), Arcillas (6 %) y Arenas (1 %).

Facie 4 (Arcillo Limosa): Este estrato presenta un espesor de 15 cm (35 a 20 cm), es un estrato masivo, color amarillento oscuro, contiene partículas muy angulosas con esfericidad baja y forma laminar. Contiene Arcillas (95 %), Limos (4.5 %) y Arenas (0.5 %).

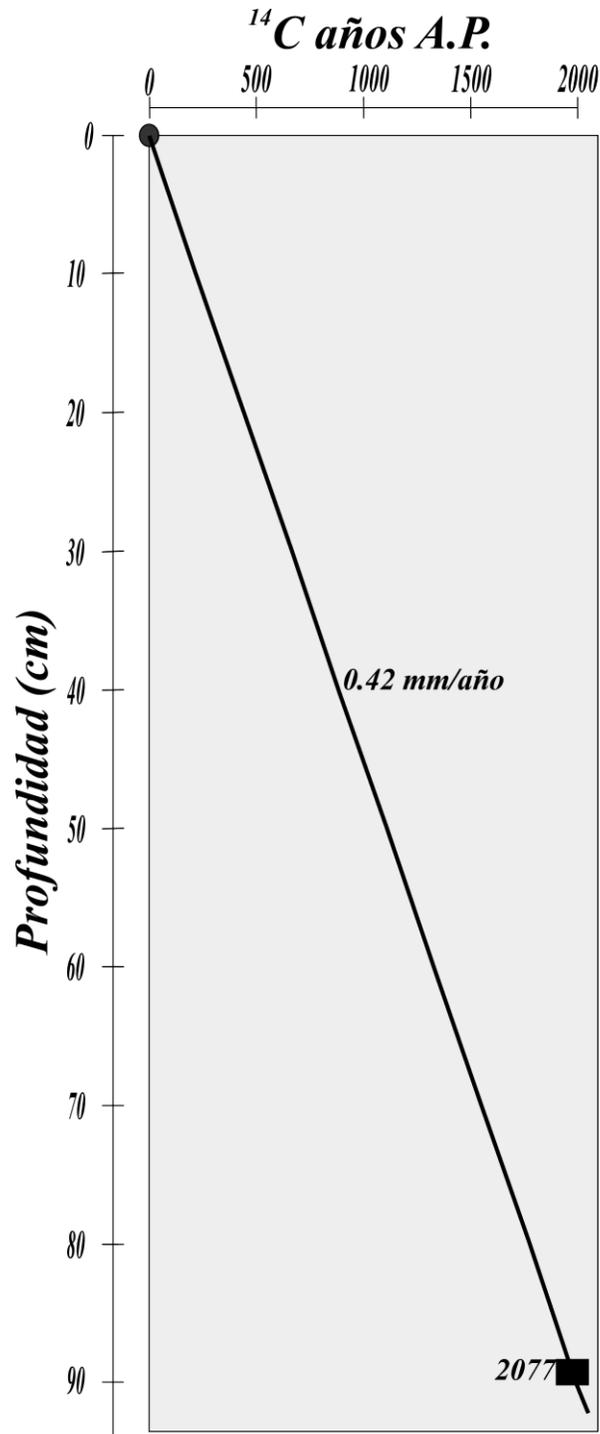
Facie 5 (Arcillo Limosa): Presenta un espesor de 10 cm (20 a 10 cm), es un estrato masivo, color gris oscuro, contiene partículas sub angulosas con esfericidad baja y formas redondeados y prolados. Contiene Arcillas (93 %), Limos (6 %) y Arenas (1 %).

Facie 6 (turba): Finalmente este presenta un espesor de 10 cm (10 a 0 cm), es un estrato masivo, color negro, contiene partículas angulosas con esfericidad baja y formas tabulares y equidimensionales, contiene arcillas (99%) y limos (1%).

#### **4.4 Cronología**

Se realizó una datación radiométrica por  $^{14}\text{C}$  en sedimentos orgánicos, procedentes de la columna correspondiente al núcleo LC-15-II. La datación que se presenta corresponde al núcleo de mayor longitud, y corresponde a los 89 cm de profundidad del perfil. En la figura 4.2 se muestra la posición estratigráfica de donde se llevó a cabo la datación. En la tabla 1 se muestra los resultados de la calibración llevada a cabo por medio del programa Calib 7.1 de Radiocarbon Calibration (Stuvier y Raimier, 1993; Remier et al., 2013).

Con base en la fecha obtenida de 2077 años cal AP para la profundidad de 89 cm, al extrapolar el dato a la profundidad de 95 cm se estima una edad de 2193 años para la base de la secuencia y una tasa de sedimentación de 0.42mm/año, para toda la secuencia.



**Figura 4.4.** Modelo de edad para los sedimentos del lago La Colorada realizado a partir del fechamiento por  $^{14}\text{C}$  (89 cm edad obtenida 2077 BP).

**Tabla 4.1.** Resultado de la datación por  $^{14}\text{C}$  realizados en el núcleo LC-15-II, y sus equivalencias en años calendáricos.

Núcleo LC-15-II				
Clave laboratorio	Profundidad (cm)	tipo de (muestra)	Edad Radiocarbono (Años AP)	Edad calibrada 2 sigma (Años calendáricos)
Beta-437116	89	S. Org.	2130 $\pm$ 30	87 – 78 DC (2000 - 2154 AP)

#### 4.5 Fluorescencia de rayos X

Esta técnica nos permite obtener la composición general de los sedimentos, en términos de los óxidos mayores presentes en una muestra, al igual permite obtener algunos elementos traza. En las tablas 4.2 y 4.3 se presentan los resultados de FRX para las 23 muestras de la secuencia maestra en sedimentos de los núcleos LC-14-I y LC-15-II.

Los datos geoquímicos se pueden presentar en distintos formatos (tipos de gráficas), como por ejemplo las de tipo X-Y, con diferentes elementos mayores o traza en los ejes coordenados, para ver la correlación entre los distintos elementos. También se presenta la variación de los elementos con respecto a la profundidad, de esta manera se puede comparar a lo largo del tiempo las relaciones existentes entre los distintos elementos para determinar su posible procedencia.

**Tabla 4.2.** Resultados de los análisis de FRX para elemento Mayores

Muestra	Profundidad (cm)	Fe %	Mn %	Ti %	Ca %	K %	Al %	P %	Si %	S %	Mg %
tr.1-04	4	2.435	0.012	0.521	0.401	0.801	11.030	0.169	20.670	0.440	1.136
tr.1-08	8	2.516	0.012	0.582	0.560	0.828	10.498	0.224	20.452	0.360	x
tr.1-12	2	2.440	0.012	0.581	0.548	0.837	11.594	0.245	21.249	0.269	0.964
tr.1-16	16	2.568	0.010	0.579	0.270	0.906	11.354	0.147	22.599	0.132	1.187
tr.1-20	20	2.849	0.010	0.585	0.245	0.827	10.735	0.145	22.621	0.115	0.411
tr.1-24	24	2.903	0.011	0.574	0.218	0.813	11.102	0.145	22.613	0.090	0.745
tr.1-28	28	3.019	0.017	0.575	0.203	0.768	11.189	0.114	22.535	0.063	x
tr.1-32	32	2.735	0.029	0.568	0.176	0.777	11.322	0.081	22.763	0.053	x
tr.1-36	36	2.767	0.019	0.584	0.200	0.795	11.325	0.075	23.304	0.054	0.612
tr.1-40	40	2.734	0.016	0.566	0.183	0.795	11.059	0.074	23.273	0.042	0.785
tr.1-44	44	2.735	0.015	0.570	0.182	0.798	10.805	0.072	23.097	0.043	0.749
tr.1-48	48	2.680	0.017	0.569	0.171	0.803	10.942	0.068	23.317	0.028	
tr.1-52	52	2.641	0.013	0.539	0.173	0.788	10.747	0.061	23.978	0.029	1.165
tr.1-56	56	2.546	0.013	0.509	0.162	0.779	10.244	0.063	24.403	0.026	0.491
'60-62	60-62	2.933	0.013	0.556	0.172	0.745	12.205	0.030	23.286	0.018	0.435
'64-66	64-66	2.958	0.011	0.563	0.198	0.749	12.382	0.070	23.700	0.021	x
'68-70	68-70	2.860	0.010	0.556	0.174	0.745	12.020	0.063	23.208	0.019	0.365
'72-74	72-74	2.786	0.014	0.524	0.173	0.724	11.943	x	23.262	0.016	0.468
'76-78	76-78	2.921	0.016	0.516	0.172	0.687	12.064	x	22.305	0.017	0.970
'80-82	80-82	2.906	0.019	0.537	0.190	0.668	12.124	x	22.664	0.016	0.909
'84-86	84-86	3.046	0.017	0.524	0.204	0.634	12.356	0.029	22.202	0.022	0.934
'88-90	88-90	2.847	0.014	0.528	0.296	0.626	12.654	0.034	22.393	0.023	x
'92-94	92-94	2.759	0.017	0.510	0.489	0.795	12.640	0.049	23.085	0.029	x

x – datos no registrados por el equipo.

El Si es el elemento más abundante en los sedimentos; el Al es el siguiente en proporción y en seguida se encuentra el Fe. En general los demás elementos restantes se presentan en una proporción más baja menor al 1%, algunos incluso en proporciones tan bajas que el equipo no permite su detección. De estos elementos que se presentan en menor proporción el Mn es el menos abundante y

su comportamiento es totalmente diferente al resto de los elementos analizados.

En la figura 4.5 se presentan las gráficas de los elementos mayores con respecto a la profundidad. Las gráficas que presentan un comportamiento similar son la del Fe, Ti, Al, S y Mg, el resto presenta un comportamiento sin ningún patrón aparente.

En los elementos traza, se encuentra en mayor cantidad el Zr, después el Ba, V y Zn, el resto presentan contenidos muy bajos. Las gráficas de los elementos traza se comportan ligeramente diferentes a lo largo del perfil. El Zr, Zn y Sr presentan un comportamiento similar como se observa en la Figura 4.3.

**Tabla 4.3.** Resultados de los análisis de FRX para elemento traza

Muestra	Profundidad (cm)	Zr ppm	Y ppm	Sr ppm	Rb ppm	Zn ppm	Cr ppm	V ppm	Ba ppm
tr.1-04	4	491.789	40	67.852	41.090	124.414	70	160	x
tr.1-08	8	505.074	40	76.204	41.090	124.414	70	170	236.986
tr.1-12	2	505.074	40	84.556	41.090	124.414	50	150	335.031
tr.1-16	16	544.929	30	67.852	50.370	103.928	60	160	x
tr.1-20	20	505.074	40	59.500	41.090	103.928	70	150	x
tr.1-24	24	518.359	30	59.500	41.090	103.928	70	150	295.813
tr.1-28	28	531.644	30	59.500	41.090	93.685	70	140	256.595
tr.1-32	32	518.359	30	51.148	41.090	93.685	70	150	374.249
tr.1-36	36	531.644	30	59.500	41.090	93.685	70	150	x
tr.1-40	40	518.359	30	59.500	41.090	93.685	60	140	256.595
tr.1-44	44	518.359	30	59.500	41.090	93.685	70	150	335.031
tr.1-48	48	505.074	30	59.500	41.090	93.685	70	140	335.031
tr.1-52	52	531.644	30	59.500	41.090	83.442	70	140	354.64
tr.1-56	56	478.504	30	59.500	41.090	93.685	70	130	393.858
'60-62	60-62	624.639	40	51.148	41.090	103.928	90	150	x
'64-66	64-66	598.069	40	51.148	41.090	103.928	70	140	x
'68-70	68-70	584.784	40	51.148	41.090	93.685	80	150	x
'72-74	72-74	598.069	40	51.148	41.090	93.685	70	130	x
'76-78	76-78	664.494	40	51.148	41.090	103.928	100	150	295.813
'80-82	80-82	624.639	40	59.500	41.090	103.928	90	150	x
'84-86	84-86	664.494	50	59.500	41.090	103.928	90	150	x
'88-90	88-90	730.919	80	76.204	41.090	114.171	90	140	315.422
'92-94	92-94	730.919	130	92.908	41.090	114.171	90	140	256.595

x – datos no registrados por el equipo.

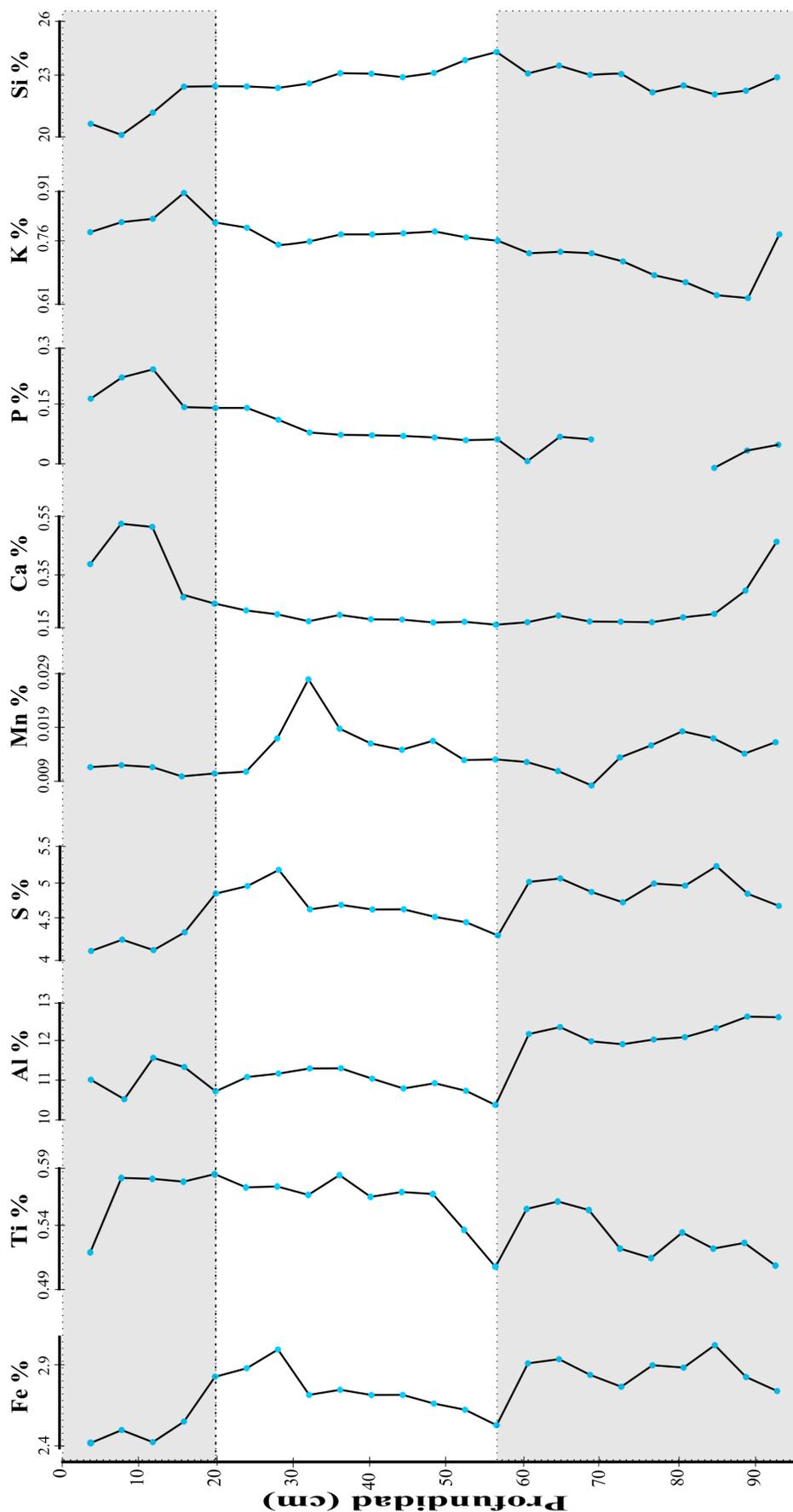


Figura 4.5 Variación de los elementos mayores con respecto a la profundidad.

De acuerdo al patrón de los elementos en general, se puede dividir la secuencia en tres grandes zonas de acuerdo a lo que se describe a continuación:

Zona 3: Se presenta de los 94 a los 56 cm, se observó un comportamiento similar en los elementos mayores Fe, Ti, Al, S y Mn, este grupo de elementos presentan disminución de valores de la base a cima del intervalo de forma oscilante, con el valor más bajo en su cima. Los elementos Ca, P, K presentan valores altos en la base, los cuales disminuyen rápidamente y se mantienen casi constantes hasta la cima del intervalo. El Si se presenta de forma oscilante (22.3% – 24.4%) y relativamente estable en todo el intervalo. Por otro lado, los elementos traza que se agrupan en esta zona son Zr, Zn, Cr y V, estos se presentan de forma oscilante pero al mismo tiempo disminuyen gradualmente hacia la cima de la zona. El Y y Sr presentan valores altos y disminuyen drásticamente para mantenerse en relativamente constantes hasta la cima del intervalo, el Rb se mantiene constante con valores de 41 ppm a lo largo de la zona. Cabe mencionas que el Ba y P se obtuvieron pocos valores ya que las concentraciones de estos elementos son mínimas y por lo tanto su gráfica es muy oscilante. Zona 2: Intervalo de los 56 a los 20 cm los elementos mayores Fe, Ti, Al, S y Mn presenta valores que aumentan de la base a la cima, algunos de estos elementos lo hacen de forma oscilante (Fe, Ti, S y Mn), El Al se mantiene en el rango de 10.38 a

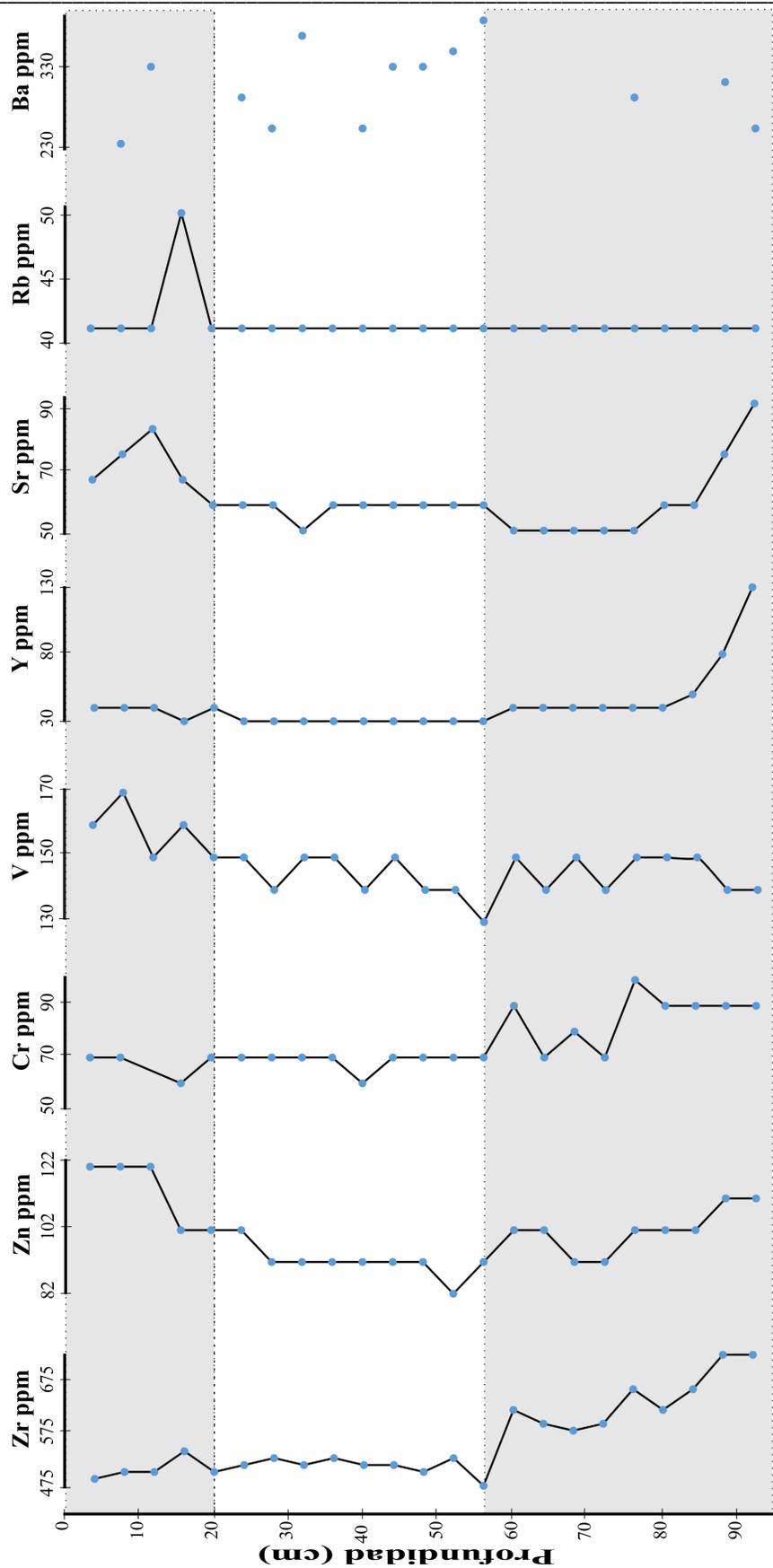


Figura 4.6. Variación de los elementos traza con respecto a la profundidad

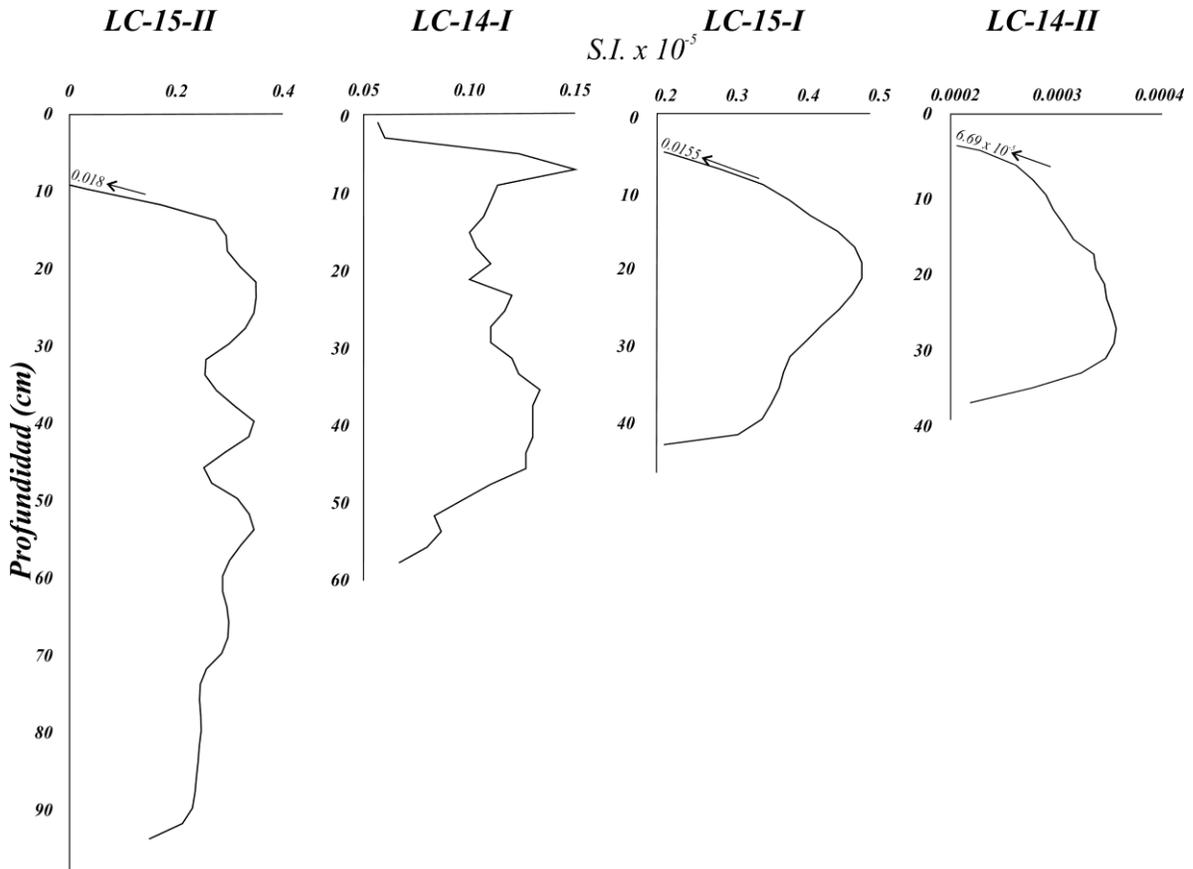
11.32 % en este intervalo, el resto de elementos mayores Ca, P, K y Si se comportan de estable sin oscilaciones en el intervalo. Los elementos traza Zr, Zn y V, se comportan de manera oscilante con tendencia a disminuir hacia la cima del intervalo, el Cr, Y, Sr y Rb presentan valores constantes en esta zona del perfil y finalmente el Ba disminuye drásticamente de los 56 a los 40 cm (394 a 256 ppm).

Zona 1: Ocurre de los 20 a los 0 cm de profundidad, en esta los elementos mayores Fe, Ti, S, K y Si disminuyen hacia la cima, el Al, Ca y P presentan oscilaciones mientras que el Mn se mantiene constante en el intervalo. En el caso de los elementos traza Zr presenta una disminución hacia la cima de 492 a 545 ppm, el Y y Cr presentan un ligero aumento y se mantienen constantes en la cima. El V y Sr presentan mucho mayor aumento y se mantienen constantes hacia la cima. El Rb, presenta un máximo al 18 cm único en toda la gráfica de profundidad. Por último el Ba presenta oscilaciones en todo el intervalo.

#### **4.6 Susceptibilidad Magnética**

En la figura 4.7, se muestran los cuatro perfiles de la susceptibilidad magnética (k), esta se midió en todos los núcleos extraídos (LC-14: I y II, LC-15: I y II). Se muestra

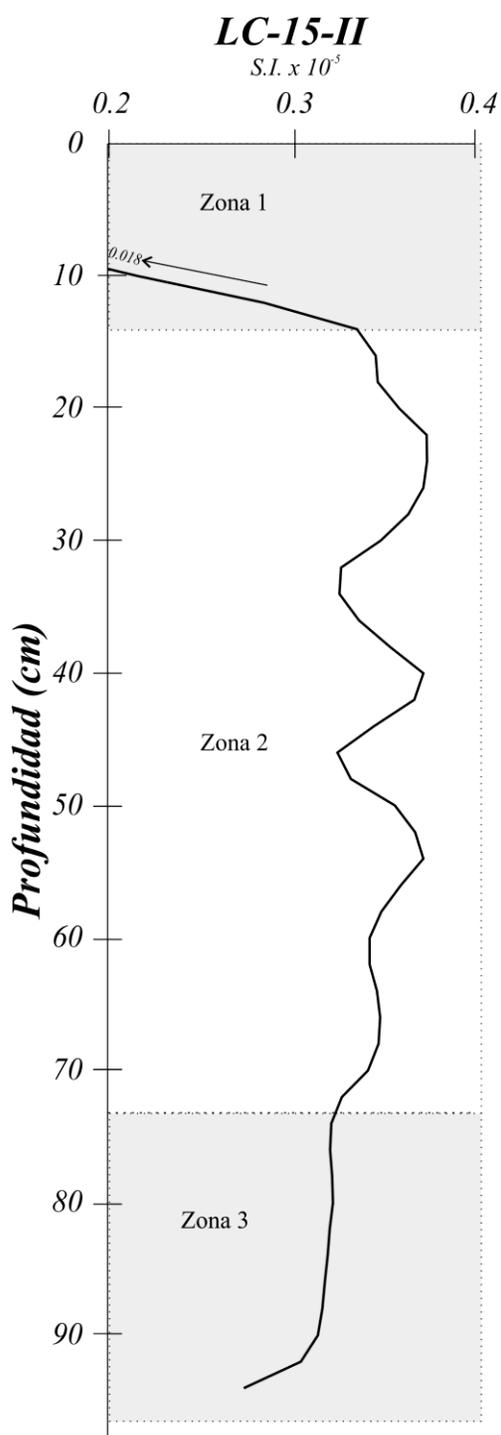
la variabilidad en la concentración de los minerales magnéticos a lo largo de la secuencia estudiada.



**Figura 4.7.** Susceptibilidad Magnética ( $\kappa$ ) observada en los cuatro núcleos perforados en el lago La Colorada.

A continuación se realizará una descripción de la  $\kappa$ , con base en la gráfica del núcleo:

LC-15-II, debido a que es el que presenta la mayor longitud de la secuencia de estudio (Figura 4.8), en este se encontraron diferentes zonas con valores de  $\kappa$  promedios distintos. Se puede observar tres zonas representativas, la primera (Zona 3) se observa en el intervalo de los 94 a los 74 cm, inicia con valores muy bajos cercanos a cero y un incremento repentino hasta valores promedio  $0.31 \text{ SI} \times 10^{-5}$ , los valores oscilan entre los 0.13 a 0.32 , la segunda zona que se identificó (Zona 2) se encuentra de los 74 a los 14 cm, en esta se presentan oscilaciones de baja amplitud a lo largo del perfil, que varían entre 0.32 a  $0.37 \text{ SI} \times 10^{-5}$ , finalmente se encuentra la tercera zona de los 14 a los 0 cm (Zona 1), en esta zona se observa una rápida disminución de los valores desde 0.33 a  $0.018 \text{ SI} \times 10^{-5}$ .



**Figura 4.8.** Susceptibilidad Magnética ( $\kappa$ ) observada en el núcleo LC-15-II, se puede observar el perfil dividido por zonas, dependiendo del comportamiento

## **5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos de la aplicación de las diferentes técnicas utilizadas en el trabajo para la caracterización de los sedimentos, y las implicaciones paleoambientales que pueden tener dichas características. En primer lugar se discuten las implicaciones asociadas con la sedimentación de varios lagos, posteriormente la correlación estratigráfica, geoquímica y magnética, se analizan los parámetros en términos paleoambientales.

### **5.1 Modelo de edades**

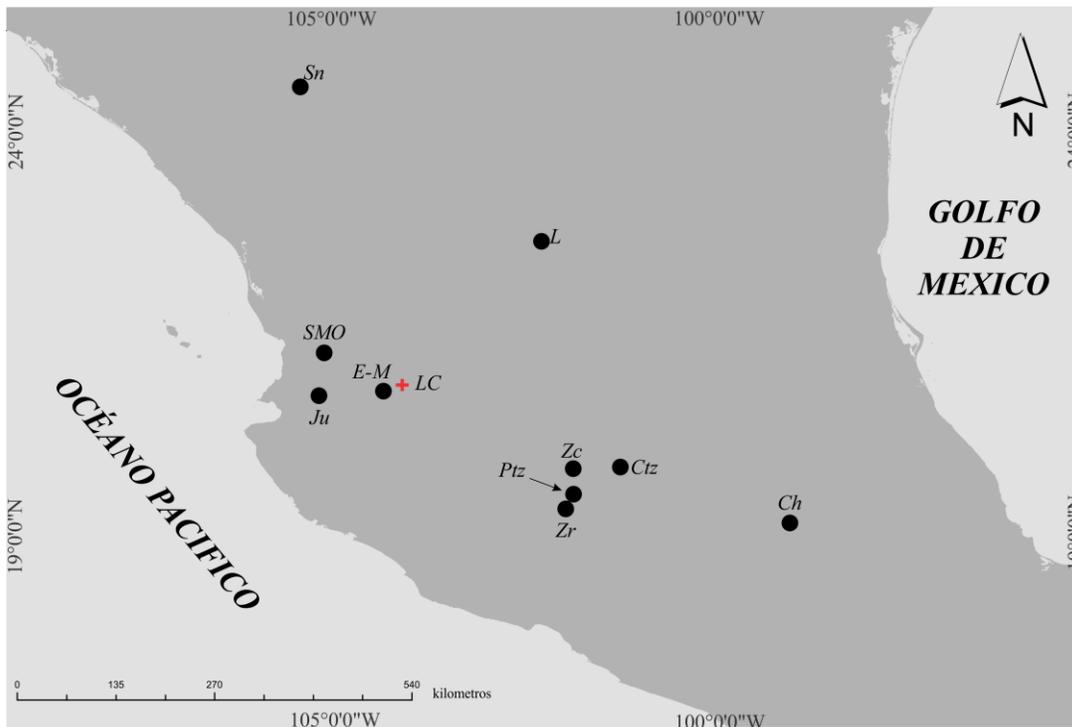
El modelo de edad fue definido de acuerdo a la edad obtenida por el método de radiocarbono, seleccionada, calibrada y convertida en años calendáricos (AC-DC) y antes del presente (AP). El cálculo de las tasas de sedimentación se realizó con base en la datación obtenida (Tabla 4.1). Las tasas de sedimentación dependen de distintos factores como las características propias del sistema lacustre, el contexto geológico, la biota y su dinámica ecológica, la morfología del lago (Arche, 2010). La diversificación de las corrientes y la morfología del lago serán las principales responsables de la forma de deposición que habrá dentro del mismo, como jerarquización de los materiales y principalmente de las entradas de sedimento con las que este cuenta (Arche, 2010).

Finalmente, con base en la edad y obtenida y a la tasa de sedimentación se proponen edades relativas para los perfiles de los núcleos (LC-14-I, LC-15-I Y LC-14-II).

La tasa de sedimentación calculada para el lago La Colorada es de 0.42 mm/año (Figura 4.2). Al comparar con otros lagos en Jalisco (Figura 4.9), las tasas de sedimentación resultan ser muy similares como en el Etzatlán-Magdalena (el más cercano) con una tasa de 0.14 mm/año en promedio (Vázquez et al., en revisión) y la Laguna de Juanacatlan de 1.14 mm/año (Metcalf et al., 2010). Con respecto a otros estados de la república aledaños (Figura 5.1), se tiene el registro de Santa María del Oro (Nayarit), con una tasa de sedimentación promedio de 5.24 mm/año (Vázquez et al., 2008), Zirahuen con 0.80 mm/año (Vázquez et al., 2010), Cuitzeo con 1.10 mm/año (Israde et al., 2002), Pátzcuaro con 0.31 mm/año (Bradbury et al., 2000) y Zacapu con 4.65 mm/año (Ortega et al., 2002). Para regiones más alejadas como en el estado de Durango, se tiene el paleolago Santiaguillo con 0.72 mm/año (Priyadarsi et al., 2015), Las Cruces (San Luis Potosí) con 0.45 mm/año (Priyadarsi et al., 2013) y el lago de Chalco (México) con 0.80 mm/año (Lozano et al., 1993).

Al analizar la tasa de sedimentación de los diferentes lagos mencionados, los que presentan tasas de sedimentación entre 0 y 0.5 mm/año, las que se encuentran entre 0.5 y 1.5 mm/año y las que son > a 1.5 mm/año. Con base en esta

separación arbitraria, el lago La Colorada con 0.42 mm/año se encuentra en el primer rango de sedimentación al igual que el de Etzatlán-Magdalena, Pátzcuaro y Santiagillo, (Vazquez et al., 2016, en revisión; Bradbury et al., 2000; Priyadarsi et al., 2015). De lo anterior se puede argumentar un rasgo común con su ubicación en planicies extensas rodeados por algunas montañas o cerros, aunque La Colorada sale de este patrón por estar rodeada completamente por un flujo de lava, procedente del volcán Tequila. Este grupo de lagos se encuentran en el Centro-Oeste de México, la precipitación anual y la vegetación son muy parecidas y esto posiblemente influye para que tengan tasas de sedimentación muy similares.



**Figura 5.1.** Se presentan algunos lagos donde se han realizado estudios en México. Con una cruz roja se señala e lago en estudio La Colorada (LC). Los demás con puntos son los lagos Santiagillo (SN), Las Cruces (L), Santa María del Oro (SMO), Juanacatlan (Ju), Etzatlán-Magdalena (E-M), Zacapu (Zc), Pátzcuaro (Ptz), Zirahuen (Zr), Cuitzeo (Ctz) y Chalco (Ch).

Por otro lado, el segundo grupo de lagos con tasas entre 0.5 y 1.5 mm/año, Juanacatlán, Zirahuen, Cuitzeo, Santiaguillo y Chalco tienen más aporte de sedimentos ya sea por ríos o aporte eólico, p. e. el lago de Cuitzeo presenta tasas de sedimentación promedio de 1.1, posiblemente porque esta cuenca es una planicie muy extensa también rodeada de aparatos volcánicos, al ser de gran dimensión permite la entrada de ciertos arroyos a la misma.

El tercer grupo con tasas > 1.5 mm/año son los lagos de Santa María del Oro (SMO) y Zacapu. Estos se caracterizan por estar asociados a aparatos volcánicos, SMO es un lago de origen calderico y Zacapu se encuentra en un cráter, lo que sugiere que su ubicación dentro del aparato volcánico proporcione mayor material sedimentario.

## **5.2 Correlación estratigráfica e interpretación de facies**

La estratificación/laminación se determinó con base al espesor de los paquetes individuales, siguiendo la clasificación propuesta por Boggs (1995) los estratos son paquetes con espesor > 1 cm, mientras que las láminas tienen espesores < 1 cm, la

naturaleza de los contactos entre los estratos se describió en función de espesor y el color de los mismos.

Dentro de los sedimentos estudiados se han podido identificar varias facies, que se encuentran distribuidas a lo largo de toda la columna bajo distintas combinaciones, estas indican cambios en la forma de depositación de los sedimentos, lo anterior implica cambios en algunos factores dentro de la cuenca.

Los sedimentos presentan una distribución muy uniforme a lo largo de la secuencia recuperada. Los espesores de los estratos son variables, desde algunos cm (ca. 3 cm) hasta decenas de cm (ca. 38 cm). Están compuestos por arenas, limos y arcillas. Para simplificar y facilitar el análisis de estos sedimentos se han agrupado en dos facies principales (Figura 5.2), que incluyen: facies detríticas y facies de turba, se puede observar un comportamiento lateral de estas facies en los diferentes perfiles. Conforme más alejado esta del límite de costa, más finas se hacen los estratos.

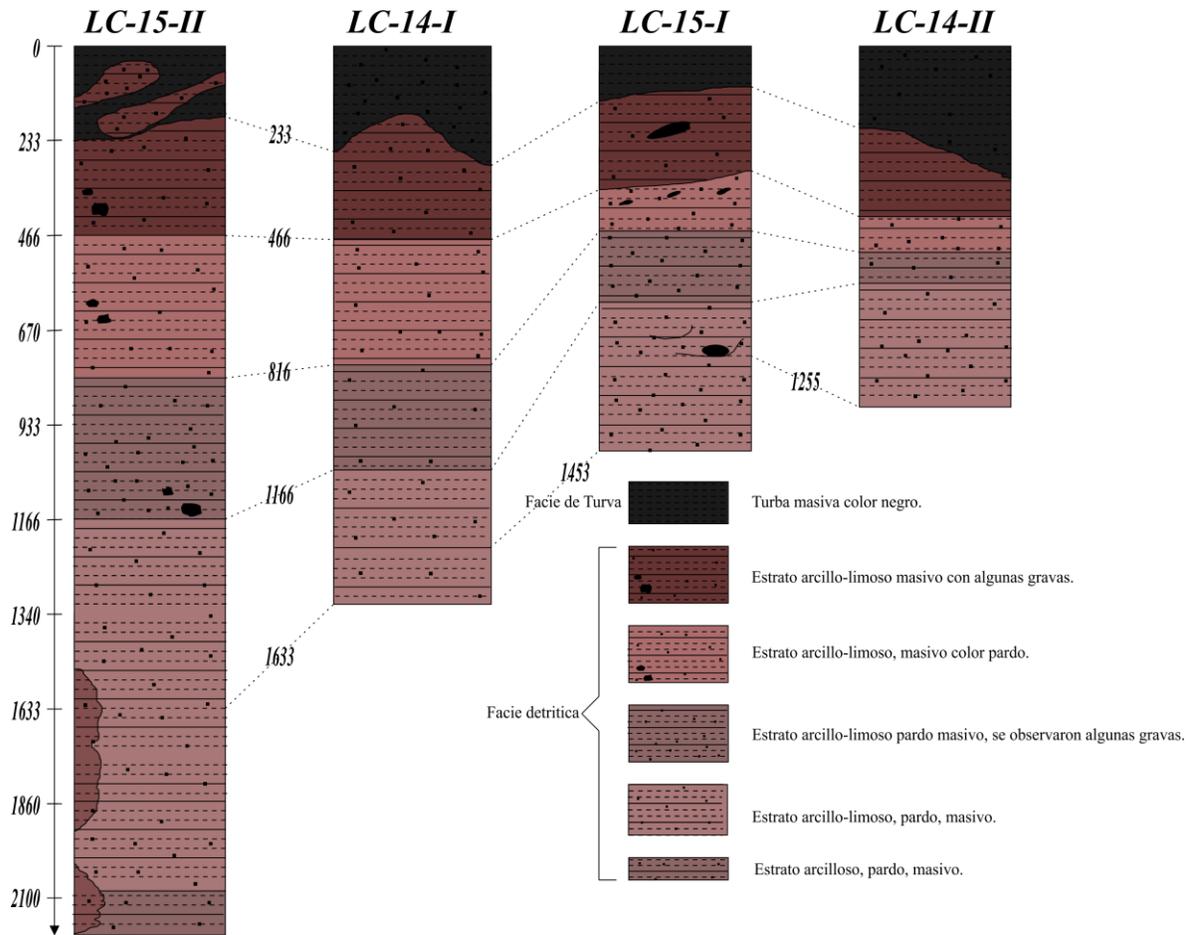
En el núcleo LC-15-II en el intervalo de 2193 a 1 156 años cal AP, siguiendo un patrón acorde a lo observado en el lago con sedimentación más abundante en los bordes del mismo, presenta una gradación inversa, este tipo de gradación se presenta cuando en el medio sedimentario existe una turbulencia al momento de la depositación también puede presentarse por condiciones fuera del lago, como un aumento en el aporte de sedimentos, debido a que el drenajes incrementa su

energía y capaz de transportar materiales más gruesos. Lo anterior se observado porque aunque son escasas van aumentando las partículas gruesas (Arenas de 0.5 % a 2%, limos de 6.5 % a 8%, Tabla 7.2.1). Internamente se puede diferenciar dos estratos, esto con base en la coloración, que puede ser un factor importante, ya que nos habla de la cantidad de materia orgánica que había al momento de la depositación del sedimento. Esto nos da un panorama relacionado con la vegetación fuera y dentro del lago que pudo haber sido más. Uno de los estratos dentro de esta zona. Abarca de los 2193 a los 2053 años cal AP que contiene una mayor cantidad de materia orgánica, es que un estrato masivo color gris muy oscuro, con 0.5 % de arenas y 6.5% de limos y el resto de arcillas, este estrato solo se presenta en el perfil LC-14-II (Figura 7.2.1). Sin embargo el estrato superior (LC-15-II, "2053 a 1166 años cal AP", LC-14-I, "1633 a 1166 años cal AP", LC-15-I, "1453 a 1166 años cal AP", LC-14-11, "1255 a 1166 años cal AP", Figura 5.2). Se correlaciona lateralmente entre los diferentes núcleos, aunque el espesor de los estratos disminuye en función de la distancia de la línea de costa del lago.

De los 1166 a los 233 años cal AP, se encontró una gradación normal, lo que se puede interpretar como un evento de cambio el aporte de sedimentos hacia el lago de mayor energía en la base del intervalo a menor energía en la cima. Dentro de este intervalo de gradación se pudieron diferenciar tres estratos detríticos, estos

se definieron principalmente por su color, el primer estrato se definió de los 1166 a 816 años cal AP, en este estrato se observa como la gradación pasa de inversa a normal, lo que implica que hubo un cambio en las condiciones de aporte de sedimentos, como podría ser que la precipitación fue bajando progresivamente y las corrientes disminuyeron su energía dando como resultado un acarreo de partículas cada vez más pequeñas (este estrato es masivo, color pardo-grisáceo, contiene partículas subangulosas con esfericidad baja y forma laminar. Con limos (93 %), arcillas (6 %) y arenas (1 %)). El segundo estrato observado va de los 816 a 466 años cal AP, este presenta otra disminución en el tamaño de las partículas, lo que concuerda con que la disminución de la energía de los cauces (estrato masivo, color amarillento oscuro, contiene partículas muy angulosas con esfericidad baja y forma laminar, contiene arcillas (95 %), limos (4.5 %) y arenas (0.5 %)). El tercer estrato abarca de los 466 a 233 años cal AP, este presenta un aumento en la cantidad de arenas con respecto al estrato anterior (estrato masivo, color gris oscuro, contiene partículas sub angulosas con esfericidad baja y formas redondeado y prolado. contiene arcillas (93 %), limos (6 %) y arenas (1 %)). Lo anterior sugiere un ligero aumento en la energía de las corrientes que alimentan el lago, para este intervalo de tiempo.

Finalmente, en la parte superior de la secuencias, la facies de turbosas, correspondiente a los 233 años cal AP al presente, considerando la cima como el año 2015, fecha de obtención del núcleo más largo, como la cima. Este rango de



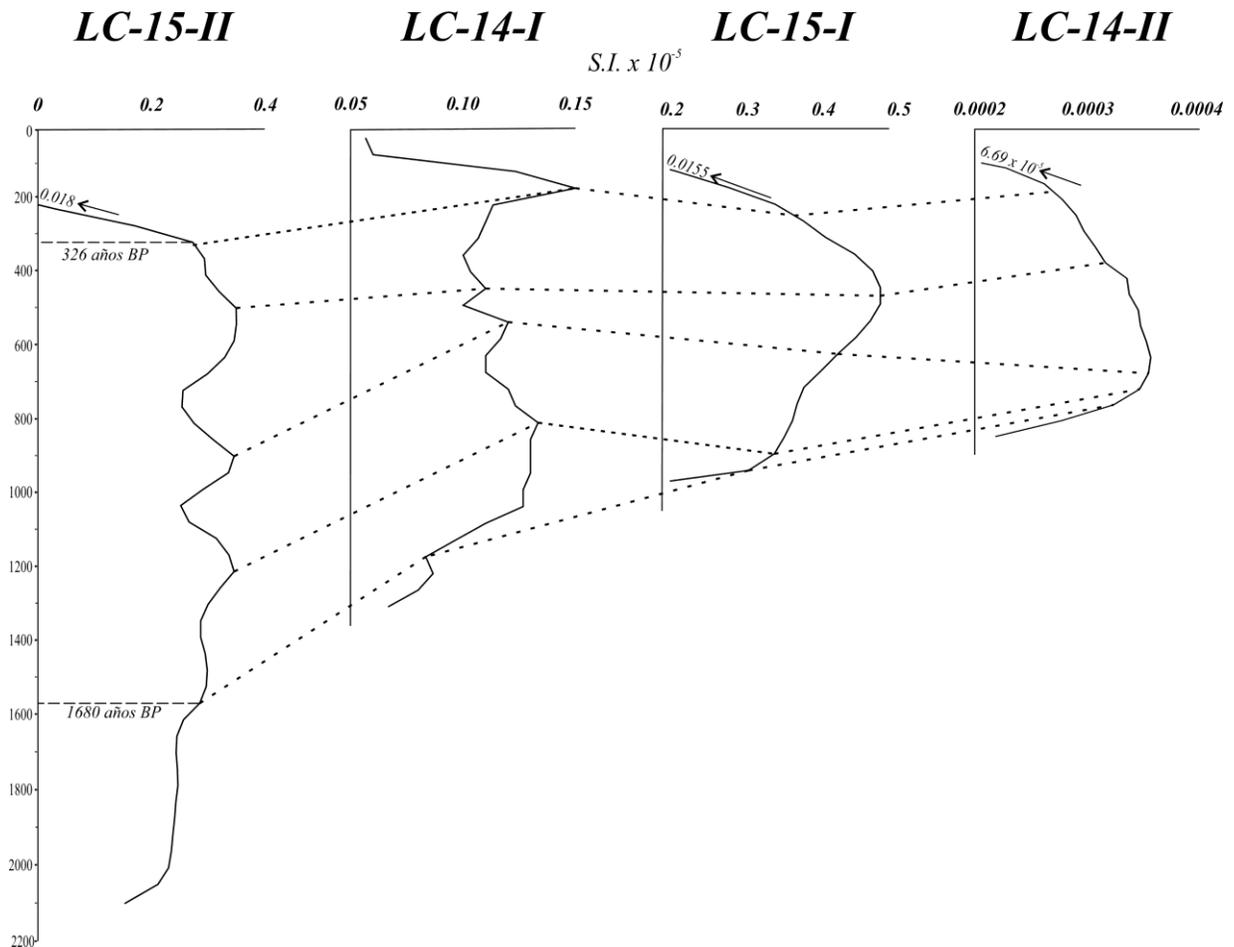
**Figura 5.2** Correlación estratigráfica.

tiempo sugiere un aumento considerable en la cantidad de MO que se sedimenta en el lago, posiblemente asociada a un mayor desarrollo de vegetación acuática en el lago o una mayor erosión de los alrededores del lago, producto de una intensificación de las actividades de deforestación que permiten más acarreo a la cuenca. El contacto irregular entre esta unidad y la inferior en todos los núcleos indican una deformación producida en los materiales superiores por el proceso de perforación.

### **5.3 Correlación Magnética**

La curva de susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ) (figura 5.2), es utilizada como indicador de la concentración de minerales ferromagnéticos, que a su vez dependen entre otras cosas, de la actividad volcánica, la erosión (p. e. aporte de minerales ferromagnéticos detríticos) y la dinámica interna del antiguo cuerpo lacustre, la susceptibilidad magnética señala notables variaciones que pueden ser debidas en tres eventos principales: el primero ocurre de los 2193 a los 1680 años cal AP, dentro del intervalo se observa un aumento rápido en la susceptibilidad magnética, (de 2193 a 2100 años cal AP aumenta la  $\kappa$  de 0.27 a 0.31 SI) y se mantiene constante hasta 1680 años AP, lo que sugiere un evento en el que no hubo gran variabilidad en las condiciones de sedimentación de la cuenca (condiciones que

también están relacionadas con el acarreo de partículas desde los alrededores. El segundo intervalo se encuentra de los 1680 a 326 años cal AP, este presenta pocas variaciones en la curva de  $\kappa$ , lo que podemos interpretar como escasos cambios en la sedimentación y en la energía de los cauces, aunque también los materiales pueden provenir de una fuente eólica. El intervalo superior de los 326 años cal AP al presente, representa un intervalo donde los detríticos disminuyen considerablemente y por eso disminuye la susceptibilidad magnética.

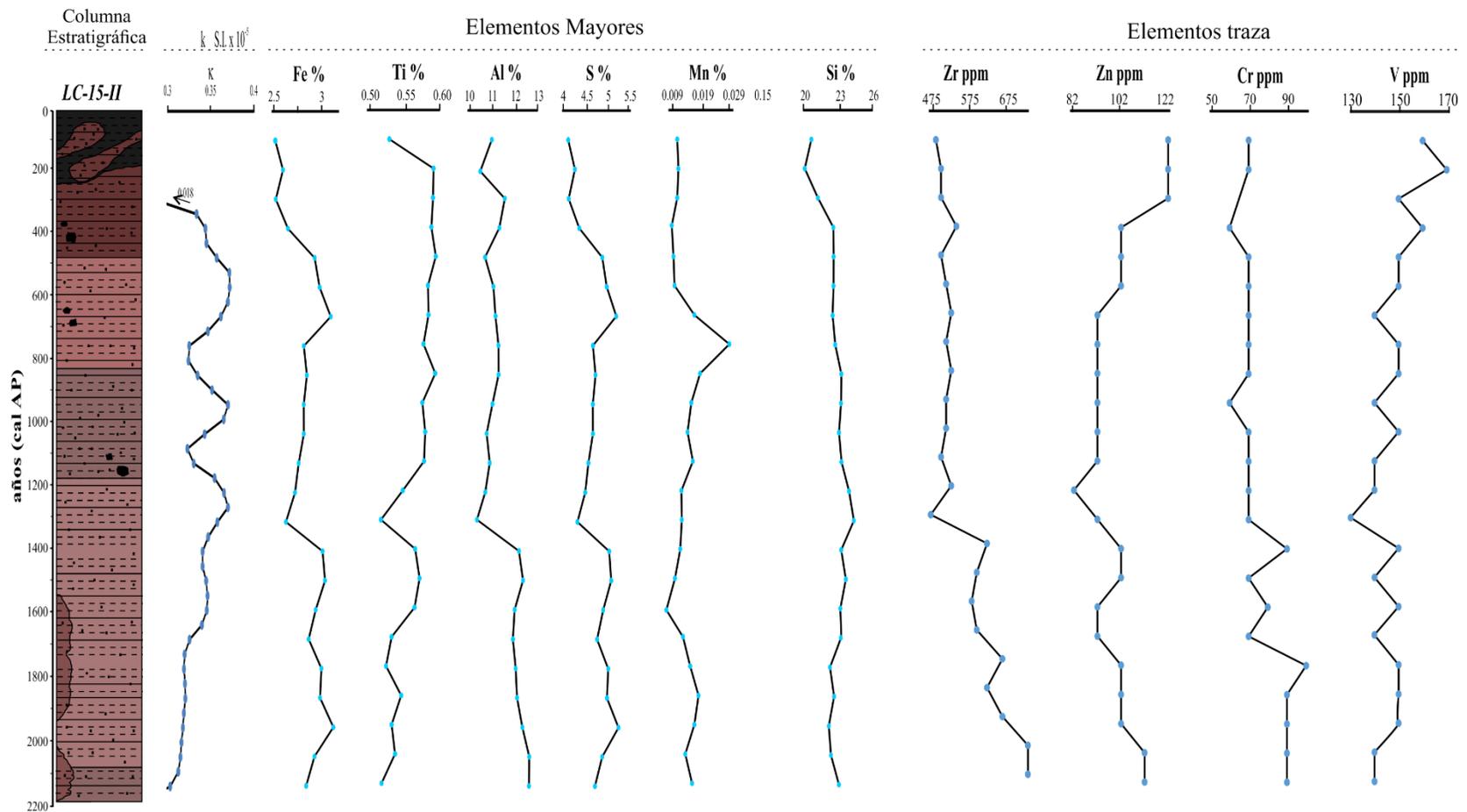


**Figura 5.3** Correlación magnética

#### **5.4 Correlación integral**

Del análisis de ambos tipos de correlaciones laterales entre núcleos, por un lado utilizando las características texturales y expresando en intervalos de facies, y por otro lado utilizando las características magnéticas de los sedimentos, basada en los diferentes patrones de crestas y valles como respuesta a la concentración de minerales magnéticos, se puede observar que ambas correlaciones no marcan un empalme, en principio debido a que se están utilizando propiedades distintas, como normalmente sucede en todas las correlaciones, sin embargo, la tendencia general de los acuíñamientos de las unidades son similares.

Por otro lado, las unidades o intervalos definidos a partir de cada una de estas propiedades (características texturales y  $\kappa$ ), no presentan intervalos idénticos, ni tampoco al ser comparadas con las unidades descritas a partir de los elementos mayores y traza realizados por FRX (Figura 4.2 y Figura 4.3, mostrados más adelante), presenta un comportamiento normal, debido a que están indicando propiedades distintas dentro de una columna sedimentaria, por tanto cada una de las propiedades que se miden no muestran variabilidad en intervalos similares puesto que se miden propiedades de distinta índole, aunque queda claro que deberían de guardar una relación en algo, como en este caso las unidades más o menos son de dimensiones parecidas (Figura 5.3).

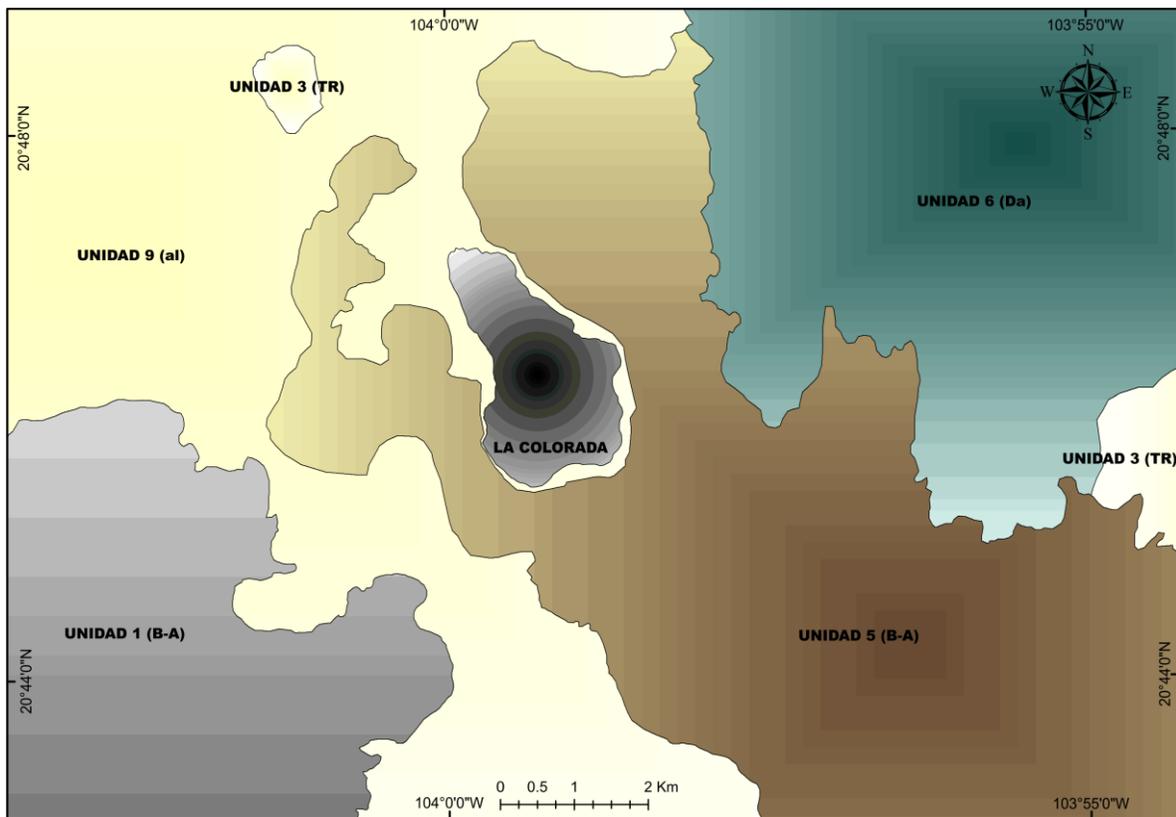


**Figura 5.4.** Las gráficas muestran la susceptibilidad magnética, los porcentajes de elementos mayores y las concentraciones en ppm de elementos traza. En el eje y se muestran las edades calibradas en años AP.

## **5.5 Efectos morfológicos producidos por el vulcanismo local**

El origen de la cuenca lacustre del presente estudio se debe a varios factores entre ellos la actividad volcánica de la región producida en este caso por el volcán Tequila al este del lago, que produjo el desarrollo de aparatos volcánicos y derrames en diferentes episodios, generando la morfología que se observa actualmente. Los flujos lávicos que rodean el lago tienen edad de 1.6 a 0.53 Ma (Wallace y Carmichael, 1994) y dentro de la porción SW del mismo se encuentra el cuerpo lacustre La Colorada, con una profundidad máxima actual de 12 m. La edad de estos flujos ha permitido estimar que existan posibilidades de tener sedimentos tan antiguos como el Holoceno en su totalidad.

Se propone que este lago se formó por un entrampamiento producido por un flujo lávico (por lo tanto el lago es de origen volcánico) hacia el sur del volcán Tequila y por vulcanismo monogenético andesítico-basáltico al sur del lago que bordeó otros flujos más antiguos, pudiendo alcanzar esta región girando hacia el NW, lo que permitió la formación de esta represa natural dentro de dos brazos de lava (Figura 5.4).



**Figura 5.5.** Se muestra como los flujos (unidad 5 [B-A]) de lava procedente del volcán Tequila, tienen un efecto fundamental en la morfología del lago. Se observa como este flujo rodea completamente el lago de SE a NW.

## 5.6 Interpretación geoquímica

En este apartado se discuten algunos elementos y cocientes geoquímicos, así como sus implicaciones ambientales en la cuenca del lago La Colorada. Estos se encuentran organizados de acuerdo a su interpretación dentro de la secuencia, ya

sea la componente de origen clástica, la de origen biogénica y algunos otros que regularmente son de utilidad en las interpretaciones paleoambientales. El análisis en tiempo de los sedimentos, permite regularmente identificar los cambios ambientales, relacionados con las condiciones que controlan el desarrollo de zonas con laminaciones o en su defecto con intervalos masivos.

Los elementos utilizados en este análisis corresponden principalmente con elementos compatibles, los cuales favorecen la fase solida de una roca, esto quiere decir que son resistentes a diferentes procesos de intemperismo y a la alteración hidrotermal (Rollinson, 1993 y Jenner 1996) determina del grupo de elementos propuestos por Rollinson, que los elementos menos móviles al intemperismo son: Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, P y Y, motivo por el cual se utiliza aquí el Ti para determinación de terrígenos acarreados a la cuenca.

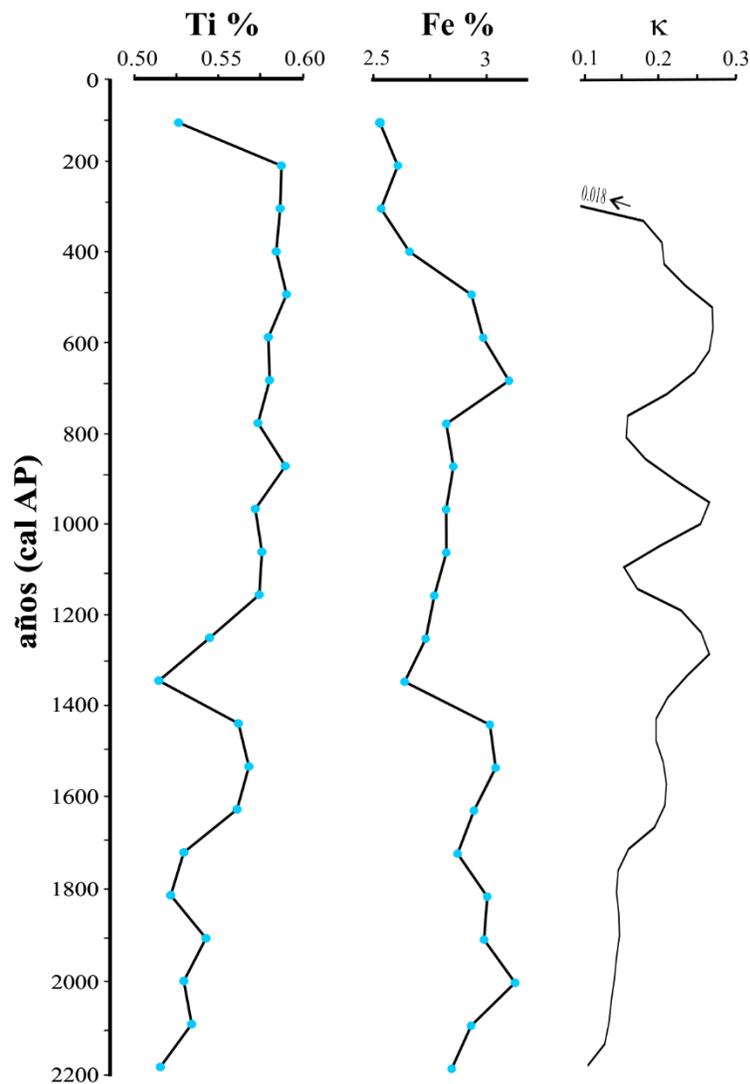
Para el caso de los lagos, los elementos que se consideran conservativos (compatibles), debido a que se encuentran estables en casi la mayoría de los ambientes sedimentarios, son Al, Ti y Zr, estos representan la fracción detrítica alóctona en un lago. El Fe y el Mn son dos elementos principales que se encuentran en los lagos, ya que su abundancia está directamente relacionada con la condiciones oxido-reductoras (Moreno et al., 2007) de la cuenca y las del cuerpo de agua. Considerando que la distancia que han sido transportados estos

sedimentos es muy corta. Para el presente estudio los sedimentos no son muy antiguos (edad máxima de 2193 años), es muy poco probable que haya habido grandes cambios en la composición original de las partículas por diversos procesos.

#### *5.6.1 Componentes clásticos (Fe, Ti y $\kappa$ )*

Los elementos químicos Fe y Ti, han sido ampliamente utilizados como indicadores de aporte terrígeno en cuencas sedimentarias lacustres (Vázquez et al., 2010 y; Roy et al., 2013), estos en conjunto con la susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ), han mostrado en diversos estudios que pueden ser utilizados como representativos de los componentes clásticos que ingresan a un lago. El aumento en la componente clástica por lo regular se representa como crestas de aumento de cada uno de estos parámetros. En el caso de la susceptibilidad magnética resulta ser un método con mucho potencial debido a la alta resolución que se puede obtener, ya que el número de muestras que se pueden medir es mucho mayor por su bajo costo de operación una vez contando con el equipo necesario. En la gráfica de la Figura 5.1 puede observarse la comparación entre ambos elementos químicos y la susceptibilidad magnética, donde las curvas de Fe y Ti, presentan tendencias parecidas, sin embargo, no son del todo iguales además de que la resolución en ambas es relativamente baja debido al bajo número de muestras procesadas,

asociadas al alto costo de la técnica. En el caso de la curva de susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ) esta tiene mayor número de inflexiones (crestas y valles), debido al mayor número de puntos muestreados y aunque no son del todo iguales, se correlaciona de manera muy alta con la curva de Fe a lo largo del tiempo.



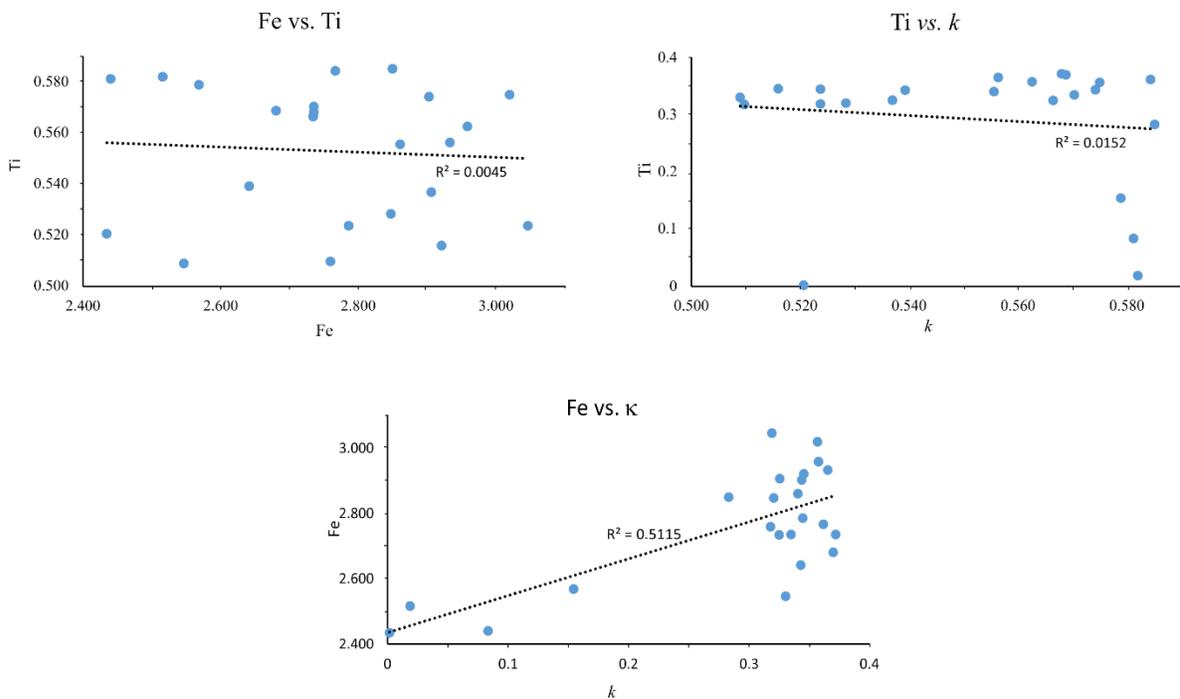
**Figura 5.6** Graficas de **Fe**, **Ti** y  $\kappa$ , representando los elementos clásticos que ingresan al lago a lo largo del tiempo.

En la Figura 5.5 se puede observar que los intervalos de aporte terrígeno fueron variando a lo largo del tiempo incrementándose de base a cima y de forma muy paulatina al principio, pero incrementándose para edades más jóvenes de 1700 años cal AP y antes que 300 años cal AP, con cuatro puntos de máximo aporte en 1600, 1300, 900 y 500 años cal AP. Lo anterior sugiere un ingreso importante de materiales durante este gran intervalo de ca. 1400 años.

Estas gráficas que indican ingreso de terrígenos a la cuenca se presentan en forma de x-y (Figura 5.6), para poder determinar su factor de correlación entre ellas. Se elaboraron las gráficas de Fe-Ti, Ti- $\kappa$  y Fe- $\kappa$ , y se obtuvo lo siguiente.

En estas se puede determinar que el factor de correlación entre el Fe y Ti es muy bajo ( $R^2=0.0045$ ) y de hecho es posible observar una dispersión muy alta en los datos de la gráfica entre estos dos elementos, lo cual indicaría que ambos representarían cosas distintas y no necesariamente terrígenos. Sin embargo, en el caso de la gráfica de Ti vs.  $\kappa$ , a pesar de que el factor de correlación es también bajo ( $R^2=0.152$ ) esto se debe exclusivamente a que unos pocos datos del extremo inferior derecho se encuentran muy dispersos, pero la mayoría están muy cercanos a la línea de tendencia, lo que le da mayor un poco de confianza para utilizar ambas gráficas con el mismo objetivo de interpretación de terrígenos. Por último en la misma figura podemos observar la gráfica de Fe vs.  $\kappa$ , donde el factor de

correlación es de  $R^2=0.5115$ , este aunque es también bajo, aparentemente es el más alto de los tres, y se observa que ambos componentes pueden ser utilizados para interpretar la componente terrígena. Con lo anterior se puede concluir que la susceptibilidad magnética es una herramienta muy útil para la interpretación de ingreso de materiales terrígenos a la cuenca y en este caso nos da certeza del ingreso de materiales interpretado es confiable.



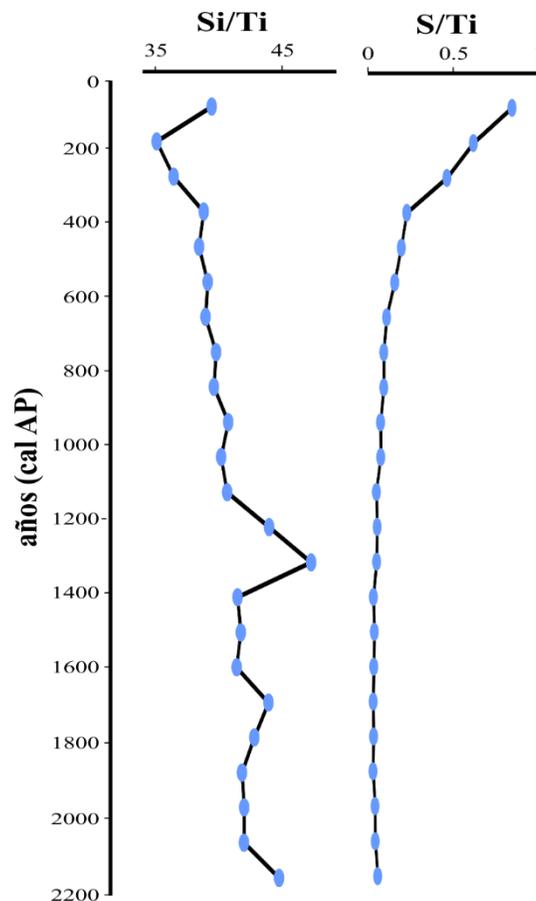
**Figura 5.7** Graficas de Fe vs. Ti, Ti vs.  $\kappa$  y Fe vs.  $\kappa$ , donde se observa los factores de correlación entre los diferentes indicadores de entrada de materiales terrígenos a la cuenca.

### *5.6.2 Componentes Biogénicos (Si/Ti y S/Ti)*

El cociente de Si/Ti ha sido empleado como indicador de componentes de origen biogénico (Moreno et al., 2007), en particular el Si al ser dividido entre el Ti elimina la componente volcánica asociada, y de esta forma el Si restante, corresponde al Si producido por organismos como podrían ser las frustulas de diatomeas que por lo regular tienen presencia en cuerpos lacustres de manera significativa. En la Figura 5.7 se muestra la gráfica en tiempo donde se observa la escasa variabilidad de este cociente en el tiempo, lo cual fue observado en algunos frotis de sedimentos analizados en la secuencia, en los que no se observó la presencia de diatomeas y posiblemente presenta escasa presencia de diatomeas en el pico observado a los 1300 años cal AP, lo que sugiere un ambiente lacustre poco propicio para su desarrollo, posiblemente por la baja cantidad de nutrientes necesarios para su proliferación a lo largo de esta secuencia.

En el caso del cociente S/Ti este ha sido utilizado para la identificación de intervalos con presencia de sulfuros de origen biogénico, por lo general piritita que incrementa su presencia cuando en sedimentos aumenta el contenido de materia orgánica (Moreno et al., 2007) (Figura 5.7). En esta secuencia se puede observar que su variabilidad prácticamente es nula a lo largo de toda la secuencia, con excepción del intervalo superior, aproximadamente los últimos 300 años de la

secuencia, donde los valores se incrementan ligeramente. Esto resulta ser congruente con la parte estratigráfica, ya que es el único intervalo donde aparece la facies de turba, la cual se compone de una gran cantidad de restos de hojas, tallos y materia vegetal acumulada y donde es común tener precipitación de sulfuros asociados a un ambiente anóxico que también está impidiendo el deterioro de esta materia orgánica depositada en el fondo del lago.



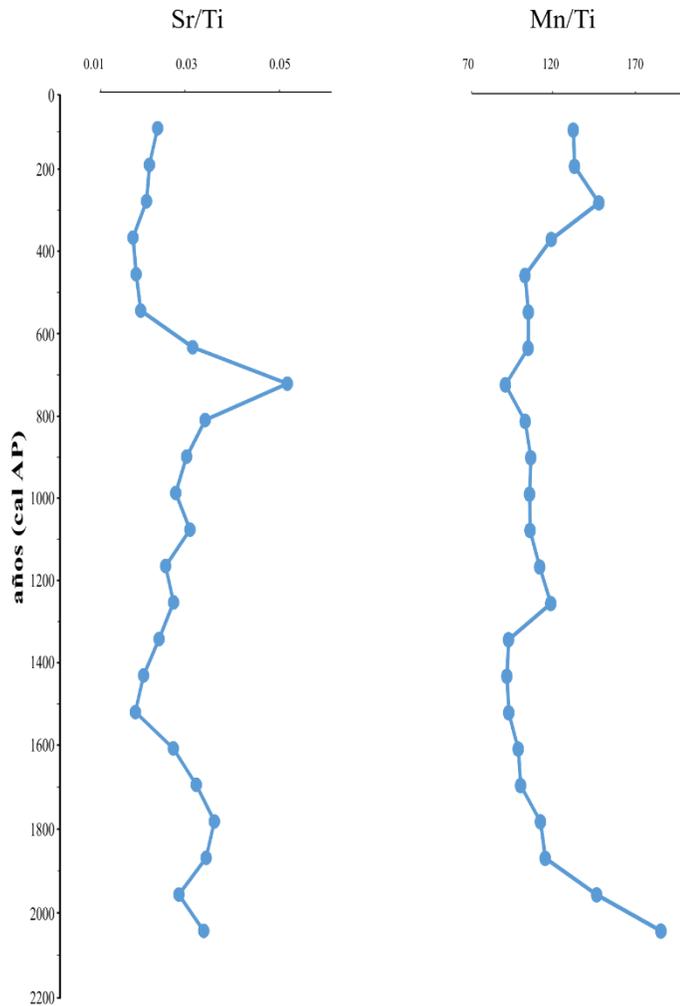
**Figura 5.8** Graficas de componentes biogénicos en la secuencia (Si/Ti y S/Ti) a lo largo del tiempo (años calibrados AP).

### 5.6.3 Otros componentes (*Sr/Ti* y *Mn/Ti*)

Finalmente, se presentan en esta interpretación dos cocientes más, el *Sr/Ti* que ha sido utilizado para determinar la presencia de precipitación carbonatos (p. e. calcita o aragonita) en una secuencia sedimentaria (Moreno et al., 2007) y el *Mn/Ti* se ha empleado para la determinación de condiciones oxidantes en la interface agua-sedimentos en el fondo del lago. En este caso (Figura 5.8) se puede observar como el *Sr/Ti* indica la posible presencia de carbonatos alrededor de los 1900 años cal AP y un máximo de ocurrencia a los 750 años cal AP, lo cual coincide con la reacción al ácido clorhídrico aplicado en las pruebas de laboratorio al analizar la columna estratigráfica, con lo cual podemos observar que es un buen indicador de la presencia de los mismos, sin embargo, se observa la presencia de escasas cantidades de carbonatos y esto también pudo observarse de manera semicuantitativa en los análisis de laboratorio.

El *Mn/Ti* (Figura 5.8) indicador de condiciones oxidantes en la interfase agua-sedimentos, sugiere las condiciones más oxidantes de la secuencia a los 750 años cal AP, lo que coincide con la precipitación de carbonatos en la secuencia y sugiere un tirante de agua bajo que permitió la oxigenación del fondo y además este tirante bajo de agua pudo propiciar la concentración de sales en el agua, permitiendo la precipitación de carbonatos. Se observa también que para la parte

superior de la secuencia, las condiciones son más reductoras, lo que coincide con la presencia de materia orgánica (turba) y posible presencia de sulfuros de origen autógeno.



**Figura 5.9.** Graficas de otros componentes geoquímicos (Sr/Ti y Mn/Ti). Edades calibradas en años AP.

## **5.7 Interpretación paleoambiental**

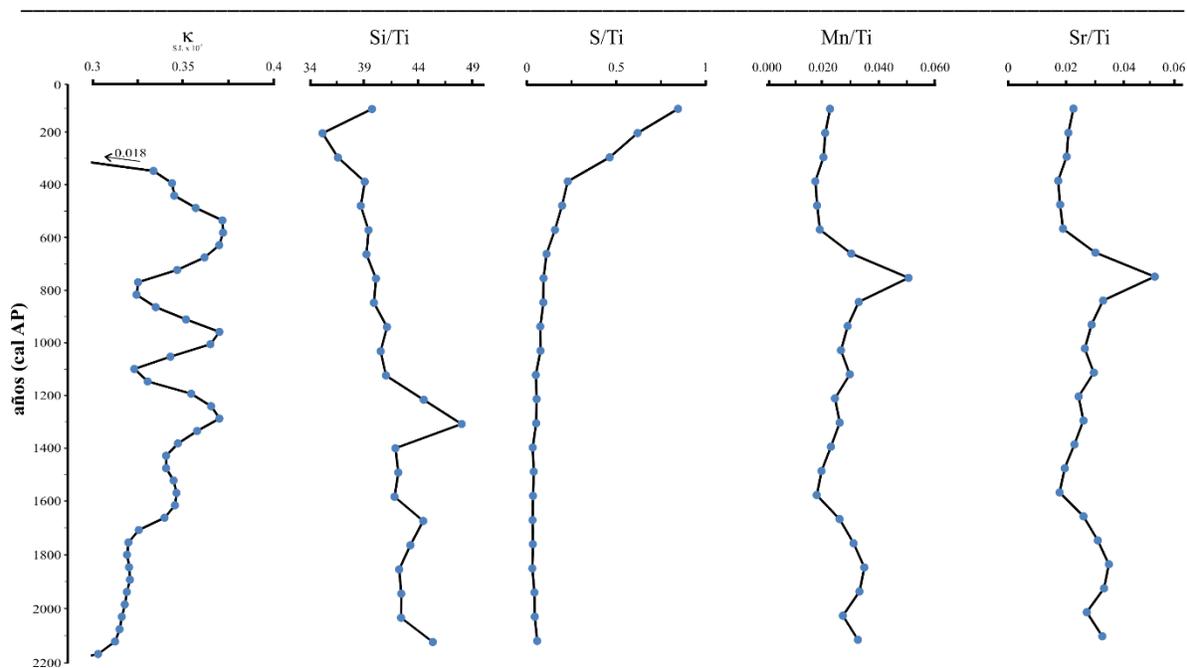
Los distintos cocientes entre elementos químicos (Figura 5.9), nos permiten relacionar algunos posibles eventos paleoambientales ocurridos en los sedimentos del lago La Colorada de acuerdo a lo que se indica a continuación.

Al analizar los eventos en tiempo de lo más antiguo a lo más reciente, se pueden identificar algunos procesos dentro de los sedimentos. El Sr/Ti indicador de precipitación de carbonatos sugiere la presencia de estos en los máximos encontrados en 1900 y 750 años cal AP, lo que coincide con dos intervalos de menor aporte terrígeno ( $< \kappa$ ) y que posiblemente propiciaron las características para su posible precipitación dentro del lago. El Mn/Ti indicador de condiciones oxidantes en la interfase agua-sedimentos, sugiere las condiciones más oxidantes de la secuencia a los 750 años cal AP, lo que coincide con la precipitación de carbonatos en la secuencia para este máximo y sugiere un tirante de agua bajo que permitió la oxigenación del fondo y además pudo propiciar la concentración de sales en el agua, permitiendo la precipitación de carbonatos (Figura 5.9).

Por otro lado, al alrededor de los 1300 años cal AP, donde se observa un máximo de Si/Ti, que coincide con un intervalo de baja susceptibilidad magnética ( $< \kappa$ ), sugiere posibilidades de que puedan desarrollarse algunas diatomeas durante este

intervalo de tiempo, debido a que al bajar los terrígenos se pueden dar las condiciones de menor turbidez del agua y brindar más estabilidad a la columna para permitir su desarrollo (Figura 5.9).

Por último, en el intervalo existente entre los 300 años cal AP y la cima de la secuencia se observa que el S/Ti aumenta, lo cual es congruente con el aumento de materia orgánica descrita en la estratigrafía (facies de Turba), esto resulta congruente con el posible desarrollo de sulfuros asociados a un ambiente anóxico en el fondo de lago, representados por el cociente S/Ti. Por su parte el Si/Ti en este mismo intervalo es el más bajo de la secuencia, claramente indicando que estas condiciones anóxicas (lago muy eutrófico), son las menos propicias para el desarrollo de diatomeas dentro del mismo. Además de que en general el lago no muestra características muy propicias a lo largo del tiempo para su desarrollo. Por su parte, el cociente de Mn/Ti para este mismo intervalo, resulta congruente al indicar baja oxigenación de fondo (reductor), lo que también apoya la idea de presencia de materia orgánica y sulfuros de origen autógeno (Figura 5.9). Es posible que este intervalo superior de la secuencia se encuentre antropizado y las condiciones no solo reflejan cuestiones paleoambientales.



**Figura 5.10.** Cocientes utilizados en la interpretación paleoambiental, indicadores de condiciones oxido-reductoras, precipitación de carbonatos y presencia de sílice de origen biogénico.

## **6. CONCLUSIONES**

En el presente estudio se realizó un análisis de sedimentos lacustres obtenidos de manera manual y utilizando un método de percusión en el lago La Colorada, ubicado en el estado de Jalisco, México. En este se llevaron a cabo estudios sedimentológicos, geoquímicos y magnéticos, a modo de ser utilizados para una interpretación paleoambiental del mismo. La importancia de este trabajo, radica en que presenta información sobre un registro sedimentario de los últimos ca. 2200 años para la región del Etzatlán, el primero en su tipo para esta zona del estado de Jalisco. A continuación se presentan los puntos más representativos del presente estudio.

### Caracterización Geológica regional

- Del análisis de rocas extraídas en afloramientos de la región, así como apoyados en un estudio de percepción remota con ortofotos escala 1:25,000, se realizó un mapa geológico detallado del área de estudio, el cual cuenta con mayor detalle que los existentes hasta el momento y resuelve algunas inconsistencias litológicas encontradas en mapas anteriores.

### Caracterización de los sedimentos

- A partir de la perforación de pozos en el lago La Colorada, se obtuvieron cuatro columnas de sedimentos (LC-14-1, 58 cm; LC-14-II, 38 cm; LC-15-I, 42 cm y LC-15-II, 94 cm). De estas cuatro perforaciones, se obtuvo una secuencia maestra que fue utilizada como referencia para la realización de los análisis en cuestión.
- Con base en una muestra de sedimento total obtenida en la base de la secuencia, se fecharon los materiales por el método de AMS 14C, pudiendo de esta forma asignar edades a los eventos encontrados en la secuencia. De esta forma, la edad estimada para la base de la secuencia es de ca. 2,200 años cal AP.
- Del análisis de sedimentos lacustres se realizó un estudio sedimentológico y estratigráfico que permite describir los eventos ocurridos en la secuencia en términos de sus características texturales y estructuras sedimentarias, permitiendo la determinación de intervalos con mayor o menor aporte de terrígenos y/o materia orgánica a lo largo del tiempo. De esta caracterización se encontró que los sedimentos se presentan una estratificación masiva con espesores de 3 cm hasta 38 cm.
- Se definieron dos facies fundamentales: de la base a la cima facies detrítica compuesta por arenas, limos y arcillas y facies de turba, compuesta por tallos, hojas y restos vegetales.

- La facies de turba se encuentra en un solo intervalo en la cima de la secuencia (233 a 0 años cal AP). El resto de la columna corresponde a la facies detrítica (2193 a 233 años BP).
- Las partículas detríticas encontradas presentan características típicas de un depósito que ha sido acarreado por una distancia muy corta, ya que se observan partículas muy angulosas y subangulosas. El origen de las mismas, es por acarreo superficial dentro de la misma cuenca y una mínima cantidad posiblemente es acarreada por el viento.
- De acuerdo a la distribución de los diferentes tamaños de partículas, se observa un intervalo de gradación inversa (94 a 50 cm) y otro de gradación normal (50 a 10 cm). Lo que muestra intervalos de aumento y/o disminución de energía en las corrientes que permitieron el acarreo de los materiales al lago.
- Con base en el fechamiento realizado fue posible definir una tasa de sedimentación promedio para el sitio de 0.42 mm/año, dato que resultó ser comparable con tasas de sedimentación registradas en otros lagos del país (centro-oeste).

Caracterización de acuerdo a sus propiedades magnéticas y geoquímicas

- Con base en los estudios de susceptibilidad magnética y de facies sedimentarias descritas en los núcleos, se pudo realizar una correlación estratigráfica de núcleos obtenidos dentro del lago en estudio.
- Los valores de susceptibilidad magnética son un indicador de la variabilidad en las concentraciones de minerales magnéticos a lo largo de la columna, y en este caso resultó ser de gran utilidad para estimar la componente detrítica que ingresó al lago a lo largo del tiempo.
- La susceptibilidad magnética muestra una correlación aceptable con el Ti, sugiriendo que ambos parámetros pueden ser utilizados para la determinación de materiales que ingresan a la cuenca por acarreo.
- Los análisis de Fluorescencia de Rayos X, permitieron el cálculo de cocientes geoquímicos que han sido de gran utilidad para inferir intervalos de la secuencia donde ha habido precipitación de carbonatos, condiciones oxidantes en el fondo, ocurrencia de sílice de origen biogénico y presencia de sulfuros.

#### Interpretación paleoambiental

- El análisis en tiempo de la secuencia permite distinguir varios eventos paleoambientales como se describe a continuación. Los indicadores sugieren la precipitación de carbonatos en dos máximos encontrados en 1900 y 750 años cal

AP, que sugieren un tirante de agua bajo que permitió la oxigenación del fondo y además pudo propiciar la concentración de sales en el agua.

- Por otro lado, al alrededor de los 1300 años cal AP, se sugiere la posibilidad condiciones de estabilidad en el lago, adecuadas para el desarrollo de organismos (posiblemente diatomeas), lo que es apoyado por la disminución en el aporte de terrígenos al lago, propiciando condiciones de menor turbidez del agua y mayor estabilidad a la columna de agua.
- Finalmente, para los últimos 300 años de la secuencia, se sugiere un lago eutrófico, de condiciones reductoras en la interface agua-sedimentos, aunque no se descarta la combinación con procesos antrópicos recientes para el intervalo.

## 7. ANEXOS

### 7.1 Anexo (A): Descripción petrográfica

**No. de muestra:** P2

**Localidad:** Etzatlán-Magdalena

**Tipo de Muestra:** Andesita –Basalto

**Minerales esenciales:** Plagioclasa 25%.

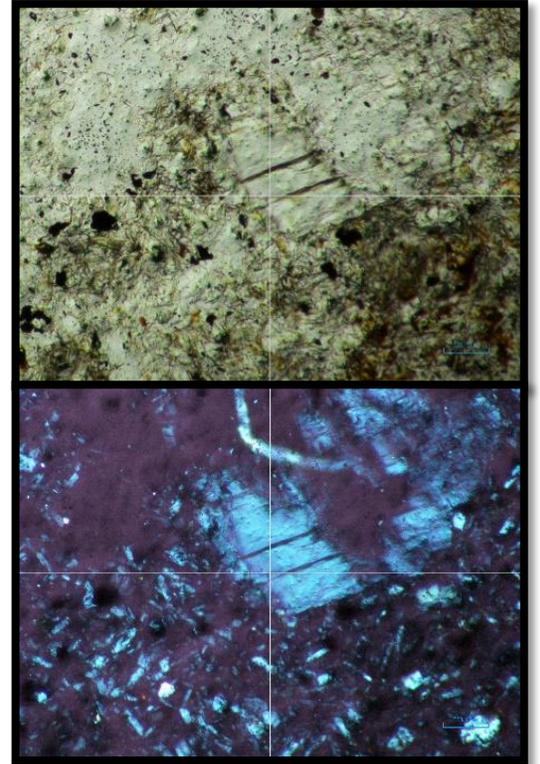
**Minerales accesorios:** Olivino 1-5%

**Minerales secundarios:** Óxidos de Hierro

**Textura:** afanítica y/o porfírica.

**Observaciones:** Lamina holocristalina, con cristales automorfos, presenta textura afanítica y/o porfírica los cristales de feldspatos se encuentran embebidos en una matriz microlítica de plagioclasas.

**Coordenadas geográficas del sitio:** 20°44'1.40"N,  
103°53'37.2"W.



**Figura A1.** Roca andesita- basalto, con textura porfírica. Se Observa un cristal de plagioclasa en luz natural y Luz polarizada.

**No. de muestra:** P3

**Localidad:** Etzatlán-Magdalená

**Tipo de Muestra:** Basalto-Andesita

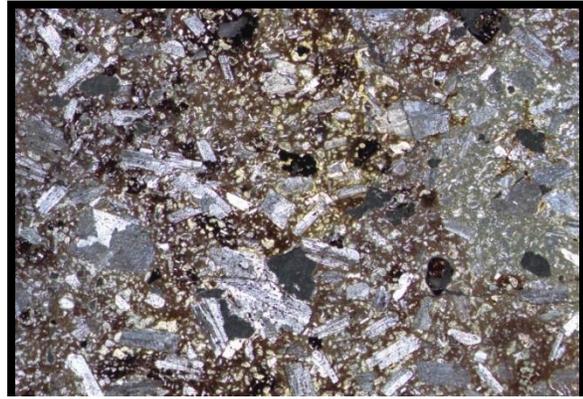
**Minerales esenciales:** Plagioclasa  
(Oligoclasa) 25%.

**Minerales accesorios:** Olivinos 1-5%

**Minerales secundarios:** sericita,  
óxidos de Hierro.

**Textura:** Porfirítica

**Observaciones:** Lamina holocristalina, presenta una textura fanerítica (Grano fino, 0.5 a 1 mm), de acuerdo a la fábrica, los cristales son euhedrales o automorfos (merocristalina). Compuesta por cristales (Plagioclasas) de tamaño fino embebidos en una matriz escasa, tiene textura porfirítica en algunas secciones, las plagioclasas se encuentran con una aureola de alteración compuesta de sericita.



**Figura A2.** Roca andesita- basalto, con textura porfirítica. Se observan cristales de plagioclasa embebidos en una matriz, también se puede observar sericita que es un mineral secundario de alteración.

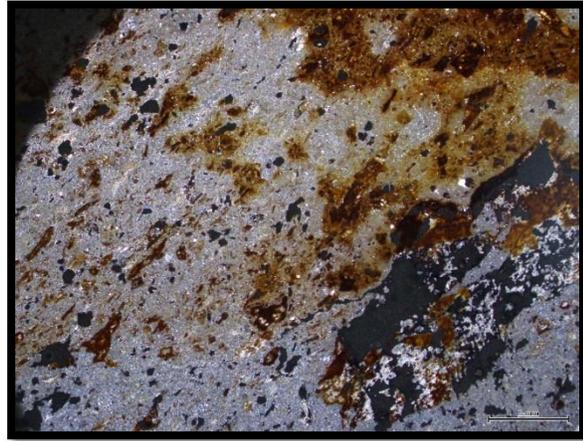
**Coordenadas geográficas del sitio:** 20°45'9"N, 104° 4'55.06"W.

**No. de muestra:** P4

**Localidad:** Etzatlán-Magdalena

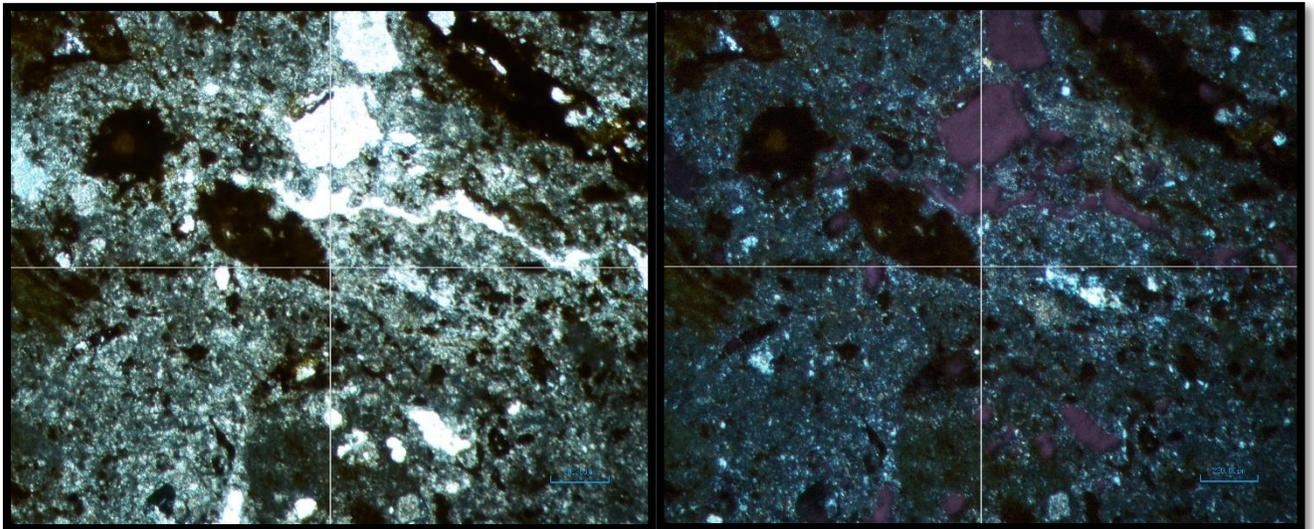
**Tipo de Muestra:** Toba Riolítica

**Observaciones:** Lamina con una gran cantidad de poros, compuesta de fragmentos de otras rocas piroclásticas y se observaron estructuras como fiames.



**Figura A3.** Toba Riolítica, se observa un fragmento de roca en color negro, también se pueden notar una gran cantidad de poros.

Fragmentos líticos (10-15%), cristales (20 %), vídrio (> 25%).



**Figura A4.** Fotografía de Toba Riolítica en luz natural y nicoles cruzados, se observa un fragmento de roca en color pardo, también se pueden notar una gran cantidad de poros.

**Coordenadas geográficas del sitio:** 20°44'46.9"N, 104° 4'23.1"W.

**No. de muestra:** P6

**Localidad:** Etzatlán-Magdalena

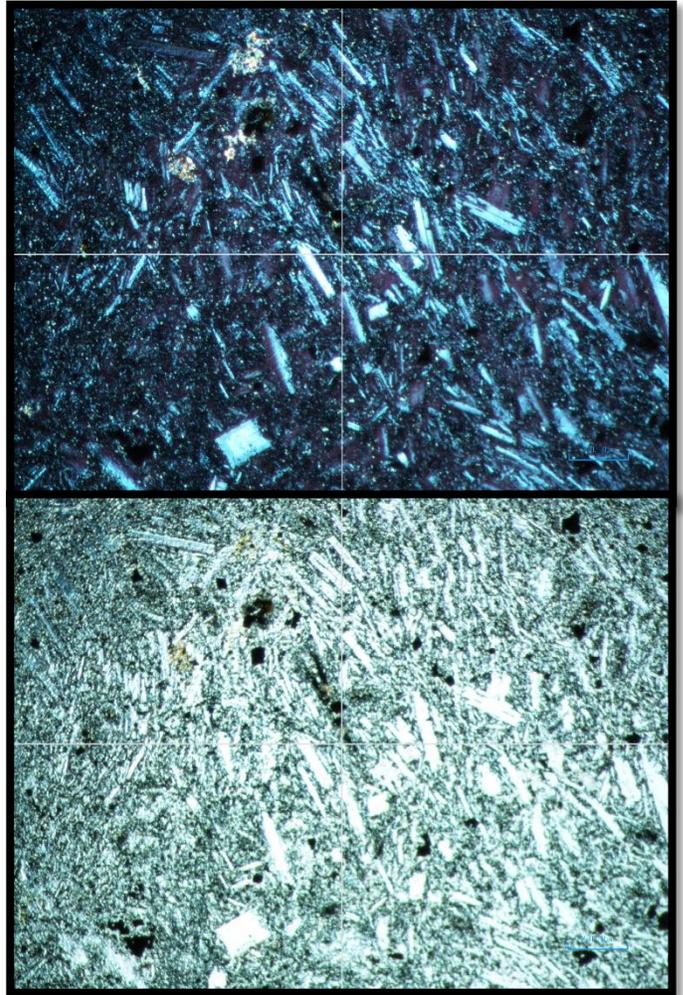
**Tipo de Muestra:** Basalto

**Minerales esenciales:** Plagioclasa 5%

**Minerales accesorios:** Clinopiroxeno (5%), olivinos (5%).

**Textura:** Microlítica

**Observaciones:** Lamina holocristalina, con base en la granularidad presenta textura microcristalina, está compuesta en su totalidad por microlitos de plagioclasa, aunque también contiene en menores cantidades clinopiroxeno y en menor abundancia olivinos, cuenta con una textura de tipo Microlítica o Pilotaxítica ya que los microcristales no están alineados en ninguna dirección.



**Figura A5.** Fotografía de un basalto en luz natural y nicoles cruzados, presenta textura microlítica. Se pueden observar una gran cantidad de microlitos de plagioclasas.

**Coordenadas geográficas del sitio:** 20°49'46.7"N, 104° 02'32.1"W.

**No. de muestra:** P7

**Localidad:** Etzatlán-Magdalena

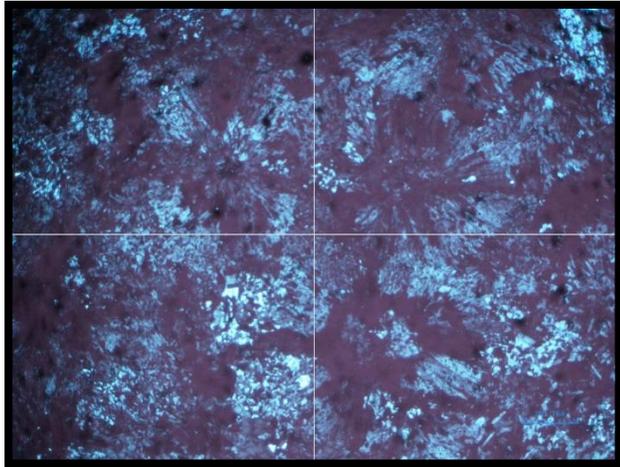
**Tipo de Muestra:** Andesita-Basalto

**Minerales esenciales:**  
Plagioclasas.

**Textura:** Holocristalina

**Observaciones:** Roca con alto contenido de sílice, contiene minerales como plagioclasa y

feldespatos, se observan estructuras como esferulitas y sufrió un proceso de desvitrificación. Esta roca presenta alto grado de alteración lo cual impide la fácil identificación de minerales esenciales.



**Figura A6.** Roca andesita- basalto, con textura microcristalina. Presenta un grado de alteración muy fuerte, contiene fragmentos de cristales como plagioclasas y feldespatos, se pueden observar esferulitas.

**Coordenadas geográficas del sitio:** 20°54'01."N, 104° 4'45.6"W

**No. de muestra:** P8

**Localidad:** Etzatlán-Magdalena

**Tipo de Muestra:** Basalto

**Textura:** Porfirítica, Microlítica.

**Minerales esenciales:** Plagioclasa 20-25%.

**Minerales secundarios:** Óxidos de Hierro

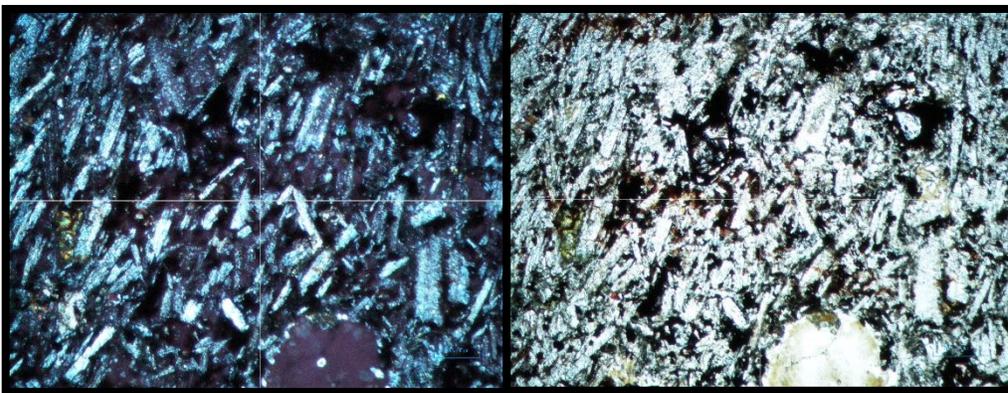
**Observaciones:** Lamina holocrisalina, en función de la

granuloaridad se observa textura por zonas fanerítica y microcristalina, compuesta de minerales como plagioclasa, feldespato y en menores cantidades, aunque estos minerales ya se encuentran afectados por procesos de oxidación, los poros de la roca se encuentran rellenos con un mineral secundario.



**Figura A7.** Roca basalto presenta textura porfídica y microlítica. Se observan minerales grandes embebidos en una matriz microlítica (Plagioclasas), y estas presentan un grado de oxidación.

**Coordenadas geográficas del sitio:** 20°45'53"N, 104° 02'33.1"W.



**Figura A8.** Fotografías de un basalto en luz natural y nicoles cruzados, presenta textura microlítica.

**No. de muestra:** P9

**Localidad:** Etzatlán-Magdalena

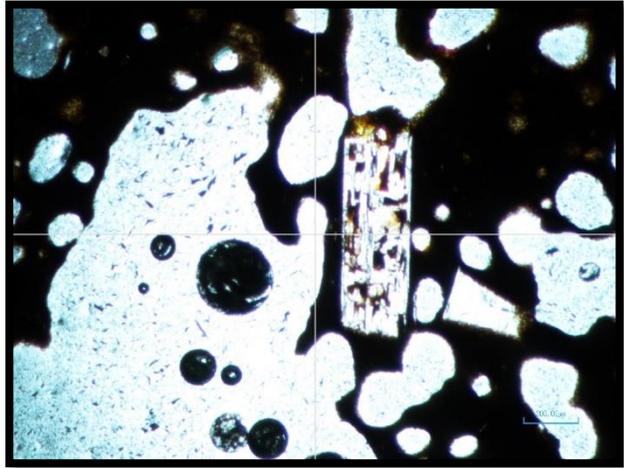
**Tipo de Muestra:** Riolita

**Minerales esenciales:** Plagioclasa, feldespatos

**Textura:** Vacuolar

**Observaciones:** lamina holohialina (compuesta esencialmente de vidrio), tiene escasos cristales de

plagioclasas, la roca contiene muchas vesículas, y con base a esto se le asignó una textura vacuolar y vítrea.



**Figura A9.** Toba vítrea presenta textura vesiculada o piroclástica, está compuesta principalmente de vidrio, con algunos cristales de plagioclasa.

**Coordenadas geográficas del sitio:** 20°46'25.1"N, 104° 00'20.6"W.

**No. de muestra:** P11

**Localidad:** Etzatlán-Magdalena

**Tipo de Muestra:** Riolita

**Minerales esenciales:** Plagioclasa

**Minerales Secundarios:** Óxidos de Hierro.

**Textura:** Fluidal y/o criptocristalina

**Observaciones:** lamina hipocristalina, con base en la granulometría presenta textura microcristalina, por otro lado con respecto a la fábrica se observa textura holocristalina. La identificación presento dificultades por la alteración de la roca.

**Coordenadas geográficas del sitio:** 20°46'42.8"N, 104° 5'55.0"W.



**Figura A10.** Riolita, presenta textura fluidal algunos cristales de plagioclasa. La imagen fue tomada con nicoles cruzados.

## 7.2 Anexo (B): Características sedimentológicas

En las siguientes tablas se muestran los resultados de las características texturales de los sedimentos analizados de los cuatro núcleos recolectados.

LC-14-I	M1-6cm	M2-20cm	M3-36cm	M4-55cm
Esfericidad	Baja	Baja	Baja	Baja
Redondez	subangulosas	subangulosos	Muy Angulosos	subangulosas
características superficiales	Translucidas	Translucidas	Translucidas	Translucidas
Fabrica	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes
Orientación	No	No	No	No
Madurez	Inmadura	Sub Madura	Inmadura	Inmadura
Clasificación	Muy Mal Clasificado	Muy Mal Clasificado	Muy Mal Clasificado	Muy Mal Clasificado
Forma	Esferica/Equidimensional	Equidimensional/Prolado	Equidimensional/Laminar	Prolado/Laminar
% arcilla	97	95	93	98
% limo	2	4.5	6.5	1.5
% arena	1	0.5	0.5	0.5

LC-14-II	M1-4cm	M2-6.5cm	M3-12cm	M4-22cm	M5-28.5cm	M6-37cm
Esfericidad	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Redondez	Anguloso	Muy anguloso	Muy angulosos	Muy Anguloso	Subangulosos	Muy anguloso
características superficiales	Tranlucidos	Tranlucidos	Tranlucidos	Tranlucidos	Tranlucidos	Tranlucidos
Fabrica	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes
Orientación	No	No	No	No	No	No
Madurez	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro	Submaduro	Inmaduro	Inmaduro
Clasificación	Muy Mal Clasificados					
Forma	Prolado/Esferica	Prolada	Laminar/Prolada	Laminar	Esferico/Tabular	Laminar/Elipsoidal
% arcilla	95	93	95	95	93	95
% limo	4.5	7	4	4.5	7	4
% arena	0.5	0	1	0.5	0	1

**Tabla 7.2.3. Características texturales del núcleo LC-15-I**

LC-15-I	M1-4cm	M2-6.5cm	M3-12cm	M4-22cm	M5-28.5cm
Esfericidad	Baja	Baja	Baja	Baja	Alta
Redondez	Redondeados	Muy angulosos	Muy anguloso	Muy anguloso	Subredondeados
características superficiales	Tranlucidos	Tranlucidos	Tranlucidos	Tranlucidos	Tranlucidos
Fabrica	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes
Orientación	No	No	No	No	No
Madurez	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro
Clasificación	Muy Mal Clasificado	Muy Mal Clasificado	Muy Mal Clasificado	Muy Mal Clasificado	Muy Mal Clasificado
Forma	Esferico/Equidimensional	Prolada/Esferico	Laminar/Prolado	Laminar	Equidimensional /Esferico
% arcilla	99	97	93	90	95
% limo	1	2.5	6	9	4
% arena	0	0.5	1	1	1

## DESCRIPCIÓN

Estrato 1 (Arcillo-Limosa): Estas facies presentan un espesor de 6 cm (94 a 88 cm), es un estrato masivo, color gris muy oscuro, con partículas angulosas equidimensionales. Contiene limos (93 %), Arcillas (6.5 %) y arenas (0.5 %).

Estrato 2 (Arcillo-Limosa): Presenta un espesor de 38 cm (88 a 50 cm), es un estrato masivo, color grisáceo oscuro, contiene partículas muy angulosas con esfericidad baja y forma laminar y prolada. Contiene limos (91.5 %), Arcillas (7 %) y Arenas (1.5 %) aunque también contiene algunas gravas.

Estrato 3 (Arcillo Limosa): presenta un espesor de 15 cm (50 a 35 cm), es un estrato masivo, color pardo-grisáceo, contiene partículas subangulosas con esfericidad baja y forma laminar. Contiene Limos (93 %), Arcillas (6 %) y Arenas (1 %).

**Tabla 7.2.4.** Características texturales del núcleo LC-15-II

LC-15-II	M1-1cm	M2-4CM	M3-10cm	M4-24cm	M5-31cm	M6-52cm	M7-70cm	M8-92cm
Esfericidad	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Redondez	Angulosos	Subredondeados	subangulosos	Muy Angulosos	subangulosos	muy angulosos	Muyangulosos	angulosos
características superficiales	No	Translucidas	Translucidas	Translucidas	Translucidas	Translucidas	Translucidas	Translucidas
Fabrica	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes	Flotantes
Orientación	No	No	No	No	No	No	No	No
Madurez	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro	Inmaduro
Clasificación	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado	Muy mal clasificado
Forma	Tabulares/Equidimensionales	Equidimensionales/esferico	Redondeados/prolado	Laminar	Tabular/Prolado	Laminar	Prolado/Laminar	Redondeados/Equidimensionales
% arcilla	99	97	93	95	93	90	93	93
% limo	1	2.5	6	4.5	6	8	6	6.5
% arena	0	0.5	1	0.5	1	2	1	0.5

Estrato 4 (Arcillo Limosa): Este estrato presenta un espesor de 15 cm (35 a 20 cm), es un estrato masivo, color amarillento oscuro, contiene partículas muy angulosas con esfericidad baja y forma laminar. Contiene Arcillas (95 %), Limos (4.5 %) y Arenas (0.5 %).

Estrato 5 (Arcillo Limosa): Presenta un espesor de 10 cm (20 a 10 cm), es un estrato masivo, color gris oscuro, contiene partículas sub angulosas con esfericidad baja y formas redondeados y prolados. Contiene Arcillas (93 %), Limos (6 %) y Arenas (1 %).

Estrato 6 (turba): Finalmente este presenta un espesor de 10 cm (10 a 0 cm), es un estrato masivo, color negro, contiene partículas angulosas con esfericidad baja y formas tabulares y equidimensionales. Contiene Arcillas (99 %) y Limos (1 %).

### **7.3 Anexo (C): Ambiente sedimentario lacustre**

Los lagos, entendidos como cuerpos de agua continental permanentes, constituyen en la actualidad el 1% de la superficie terrestre. Dados los múltiples factores geológicos y biológicos que ocurren en su origen, en su dinámica y en su evolución, los lagos se perfilan siempre en los textos científicos como sistemas naturales complejos, difíciles de definir, clasificar o modelizar de manera simple.

Según Lincoln et al. (1982) un lago es un cuerpo de agua estancada dulce o salina, sin corrientes apreciables, que suelen presentar una estrecha playa periférica carente de vegetación debido a la acción del oleaje.

Según Margalef (1983) los lagos son masas de agua que alcanzan o rebasan cierta profundidad mínima, suficiente para el establecimiento de una termoclina durante el periodo de estratificación.

Bates y Jackson (1987) define lago, como cualquier cuerpo de agua continental que ocupa una depresión en la superficie de la tierra y tiene un tamaño apreciable, mayor que un pond (charca) y demasiado profundo como para permitir la vegetación (excluyendo la vegetación subacuática) enraíce completamente en la zona cubierta por el agua en toda su extensión.

Por último González Bernáldez (1992) define lago como, una masa de agua continental de considerable tamaño, con menores características de flujo que el río y, a causa de su gran volumen, menor contacto relativo, y menos dependencia e interacción con el medio terrestre que la laguna y otros humedales.

En función de su origen los lagos pueden ser tectónicos, volcánicos, glaciares, kársticos, de actividad fluvial, de actividad eólica, formados por deslizamientos, por actividad costera, orgánicos, antropogénicos, de impacto meteorítico, (Hutchinson, 1957; Sly, 1978; Hakanson y Jansson, 1983; Cole, 1983; Burgis y Morris, 1987; Lerman et al., 1995), pudiendo agruparse toda esta variedad en dos tipos fundamentales, lagos originados por actividad geológica independiente del agua y lagos originados por la actividad del agua (Margalef, 1983). Los lagos también pueden ser clasificados en función de su morfometría, es decir, de la relación entre su extensión superficial y su profundidad. En función de su capacidad para estratificar la columna de agua pueden ser amícticos, monomícticos, dimícticos, polimícticos o meromícticos, permitiendo esto varias subclasificaciones dependientes de los mecanismos de mezcla o de los mecanismos que dan lugar a la meromixis en el caso de los lagos meromícticos (lagos permanentemente estratificados). En función del tipo de sedimentos que se acumulan en ellos pueden ser siliciclásticos, carbonáticos, salinos, orgánicos, o mixtos. En función del

contenido en materia orgánica y nutrientes en las aguas del lago pueden ser oligotróficos, distróficos o eutróficos. Dependiendo del cinturón climático en el que se ubican pueden ser glaciares, periglaciares, templados, subtropicales, tropicales, áridos o desérticos, con las variantes además introducidas por la posición altimétrica. Según su balance hidrológico pueden ser hidrológicamente abiertos, hidrológicamente cerrados perennes o hidrológicamente cerrados efímeros (Eugster y Kelts, 1983).

Al introducir la variable tiempo lo normal es encontrarse que los sistemas lacustres con tiempos de residencia media y larga cambian a lo largo de su historia geológica y ambiental y pueden pasar por etapas en las que sean hidrológicamente abiertos y otras cerrados, pueden alternativamente presentar o no estratificación en la columna de agua, eutrofizarse periódicamente, sufrir oscilaciones drásticas del nivel y el volumen de agua y responder a cambios climáticos de gran alcance que se producen en tiempos relativamente cortos, entre otras posibilidades. Son sistemas sedimentarios completamente diferentes de los marinos (tabla 9.2) no solo como sistemas ambientales sino también en todo lo que concierne a las características de la arquitectura estratigráfica de su registro. El alcance de su complejidad y su relevancia ha dado lugar al nacimiento de la

Limnogeología (Gierlowsk y Kelts., 1994) como disciplina específica de estudio de sistemas lacustres actuales y fósiles.

Es debido a todo esto que autores como Valero et al. (1992) y Gierlowski y Kelts (1994) conciben cada sistema lacustre como un entramado o red multidimensional formada por múltiples procesos y factores de control todos ellos relacionados entre sí de forma dinámica, que evolucionan a lo largo del tiempo de existencia de un lago, de modo que el cambio de uno o varios de los factores induce cambios en otros factores de control. La red comprende la participación en el sedimento de clásticos y químicos, la actividad biológica, la biota, la profundidad, la energía, la composición del agua, la concentración en solutos del agua, el tiempo de residencia, la productividad, la anoxia, la estratificación, los ciclos solares o la acción del viento, entre otros, todos ellos ligados de formas diversas al régimen climático y tectónico.

Esta concepción implica la existencia de un amplio espectro de sistemas lacustres diferentes, tantos como sistemas lacustres existen y han existido, de modo que un mismo sistema lacustre puede a lo largo de su desarrollo variar su lugar dentro de una misma clasificación. Por todo ello recomiendan interpretar las secuencias sedimentarias observadas en términos de los parámetros de control que participan en el origen y evolución del lago, mejor que intentando encuadrar lo observado en

un modelo concreto preestablecido, porque cualquiera de estos va a presentar deficiencias si se pretende hacer una reconstrucción limnogeológica detallada.

Llevado al extremo sería imposible realizar ningún modelo, aunque al mismo tiempo desde aquí se explica la enorme profusión de «secuencias elementales tipo» o «modelos de facies» diferentes que es posible encontrar en la literatura limnogeológica y que superan con mucho a los que se han podido establecer en otros ambientes sedimentarios. No existe actualmente ninguna tipificación, estandarización, sistemas de clasificación o convención tradicional o establecida de ningún tipo para describir los sistemas lacustres desde el punto de vista limnogeológico (Gierlowski y Kelts, 2000b).

No obstante, la realidad es que existe una serie de procesos y factores de control concretos que pueden entenderse como comunes a todos los lagos del presente y del pasado, así como una serie de señales, de características y de tendencias que son comunes a las sucesiones lacustres del registro sedimentario. Intentaremos en este capítulo por tanto resaltar y explicar de manera clara estos «rasgos comunes» o «características transversales» proveyendo al lector con las herramientas adecuadas para enfrentarse al análisis sedimentológico y la reconstrucción paleoambiental y paleogeográfica de un tipo de sistema deposicional tan complejo

y variado como son los sistemas lacustres, desde la adecuada aplicación del actualismo y en el marco paradigmático de la estratigrafía genética y secuencial.

La sedimentología se puede definir como el estudio del transporte y deposición de sedimentos (Leeder, 1999), y trata de estudiar la composición, estructuras internas y procesos hidrodinámicos de los sedimentos. Para lograr sus fines, se auxilia de una gran cantidad de datos procedentes de ciencias como: mineralogía, petrología sedimentaria, estratigrafía, dinámica de fluidos, geoquímica, entre otras muchas.

Un medio sedimentario se puede definirse como una parte concreta de la superficie terrestre donde se acumulan sedimentos y que se diferencia física, química y biológicamente de las zonas adyacentes (Selley 1970). Los factores limitantes están directamente relacionados entre sí y cualquier cambio en uno de ellos afecta a cualquiera de los otros.

## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Arche A., 2010, "Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria", ed. Alfredo Arche. p. 308-350
- Bard E., 1998, "Geochemical and geophysical implications of the radiocarbon calibration", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 62, p. 2025-2038.
- Bates R. y Jackson J., 1987, "Glossary of Geology", American Geological Institute.
- Bernal J., Beramindi O., Lugo I. y Walter D., 2010, "Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V. 62, No. 3, p. 305-323.
- Boggs S., 1995, "Principles of sedimentology and stratigraphy. Second Edition. Prentice Hall Inc. 107 pp. New York.
- Bradbury J., 2000, "Limnologic history of Lago de Patzcuaro, Michoacán, Mexico for the past 48,000 years: impacts of climate and man", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. 163, p. 69-95.
- Brouwer P., 2010, "Teoría de FRX", PANalytical B. V., Almelo, Holanda, p. 7-17.
- Burgis M. y Morris P., 1987, "The Natural History of Lakes", Cambridge University Press, Cambridge.
- Caballero M. y Ortega B., 1998, "Lake levels since about 40,000 years ago at Lake Chalco, near Mexico City", *Quaternary Research*, Vol. 50, p. 69-79.

- Catarine B., Rebecca A., Chris M. y Delgado G., 2005, "The eruptive history of the Tequila volcanic field, western Mexico: ages, volumes, and relative proportions of lava types", *Research Artiche*, Vol. 67, p. 391–414
- Cole G., 1983, "Textbook of Limnology", 3ª ed. Waveland Press, Inc., Illinois.
- CONABIO. 1990, "Provincias Fisiográficas de México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad"
- CONAGUA, 1986-2007, "Estación 14195, Antonio Escobedo (DGE)"
- Eugster H. y Kelts, K. 1983, "Lacustrine chemical sediments", En A. S. Goudie (ed.), *Chemical Sediments and Geomorphology - Precipitates and Residua in the Near-Surface Environment*. Academic Press, London, p. 321-368.
- Evans M. y Heller F., 2003, "Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics", Elsevier Science. p. 1-29
- Ferrari L., 2000. "Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. LIII, pag. 84-92.
- Fisher C., Pollard H., Israde I., Garduño V. y Banerjee., 2003, "A reexamination of uman-induced environmental change within the Lake Patzcuaro Basin, Muchoacan, Mexico", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol.100, No. 8, p. 4957-4962.

- Frey H. y Lange R., 2011, "Phenocryst complexity in andesites and dacites from the Tequila Volcanic field, Mexico: resolving the effects of degassing vs. Magma mixing", *Contrib Mineral Petrol*, pag. 415-445.
- Gierlowski K. y Kelts K., 1994, "Global Geological Record of Lake Basins", vol. I. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gogle Earth Pro, 2016.
- González B., 1992, "Los paisajes del agua: terminología popular de los humedales", J. M. Reyero Editor, Madrid.
- Hajdas I., 2009, "Applications of Radiocarbon Dating Method" *Rev. Radiocarbon*, Vol. 51, No. 1, p. 79-90.
- Håkanson L. y Jansson M., 1983, "Principles of Lake Sedimentology", Springer-Verlag, Berlin.
- Harris J., 1986, "Silicic volcanics of Volcfin Tequila, Jalisco, Mexico", MS thesis, University of California.
- Hutchinson G. 1957, "A Treatise on Limnology I, Geography, Physics and Chemistry", John Wiley and Sons, New York.
- INEGI, 1996, Ortofotos F13D53A, F13D53B, F13D53C, F13D53D, F13D53E, F13D53F, F13D63A, F13D63B, F13D63C, F13D63D, F13D63E, F13D63F, México
- INEGI, 1999, Ortofotos, F13D54A, F13D54B, F13D54C, F13D54D, F13D54E, F13D54F, F13D64A, F13D64B, F13D64C, F13D64D, F13D64E, F13D64F, México.
- INEGI, 2016, Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)

- Israde A., Garduño M. y Ortega M., 2002, "Paleoambiente Lacustre del cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo", *Hidrobiología*, Vol. 12, No. 1, p. 61-78.
- Jener G., 1996, "Trace element geochemistry of igneous rocks: geochemical nomenclature and analytical geochemistry", en: Wyman D., (Ed.), *Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration*; Geological Association of Canada, short course notes, vol. 12, p. 51-77.
- Leeder M., 1999, "Sedimentology and Sedimentary Basins", Blackwell, Oxford.
- Lerman A.; Imboden D. y Gat J., 1995, "Physics and Chemistry of Lakes". Springer-Verlag, Berlín.
- Lewis K., Lange R., Hall C. y Delgado G., 2005, "The eruptive history of the Tequila volcanic field, western Mexico: ages, volumes, and relative proportions of lava types", *Bull Volcanol*, Vol. 67, p. 391-414.
- Lincoln R.; Boxshall G. y Clark P., 1982, "A dictionary of ecology, evolution and systematics", Cambridge University Press, Cambridge.
- Lowe J., Walker M., 2000, "Radiocarbon dating the last glacialinterglacial transition (Ca. 14-9 14C ka BP) in terrestrial and marine records: The need for new quality assurance protocols: Radiocarbon", Vol. 42, p. 53-68.
- Lozano G. y Sosa N., 2015, "Análisis palinológico del Cenozoico de la cuenca de México: el registro polínico de los pozos Texcoco-I y San Lorenzo Tezonco", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V. 67, No. 2, p. 245-253.

Lozano G., 1993, "Late Pleistocene and Holocene Paleoenvironmental of Chalco Lake, Central Mexico", *Quaternary Research*, Vol. 40, p. 332-342.

Lozano M., Ortega B., Caballero M. y Urrutia J., 1993, "Late Pleistocene and Holocene Palaeoenvironments of Chalco Lake, Central Mexico", *Quaternary Research*, Vol. 40, p. 332-342.

Lozano S. y Ortega B., 1994, "Palynological and magnetic susceptibility records of Chalco Lake, central Mexico", *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, Vol. 109, p. 177-191.

Margalef R., 1983, "Limnología", Ed. Omega, Barcelona.

Martinez L. y Mendoza C., 2016, "Acoplamiento sismogénico en la zona de subducción de Michoacán-Colima-Jalisco, México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 68, No. 2, p 199-214.

Metcalf S., Jones M., Davies S., Noren A. y MacKenzie A., 2010, "Climate variability over the last twomillennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlán, Mexico", *The Holocene*, Vol. 24, No. 4, p. 1195-1206.

Moreno A., Giralt S., Valero G., Sáez A., Bao R., Prego R., Pueyo J., González S. y Taberner C., 2007, "A 14kyr record on the tropical Andes: The Chungarà sequence (18°S, northern Chilean Altiplano)", *Quaternary International*, Vol. 161, p.4-21.

Munsell soil color Charts, 2000, Munsell Color Greta G. Macbeth. NEW Windsor, NY.

Ortega B., 1992, "Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario Tardío en el lago de Chalco, cuenca de México", Tesis de

- doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades, México D.F, p. 161.
- Ortega B., Caballero C., Lozano S., Israde I. y Vilaclara G., 2002, "52 000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacan, Mexico: the magnetic record", *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 202, p. 663-675
- Ortega B., Thompson R., Urrutia F., 2000, "Magnetic properties of lake sediments from Lake Chalco, central Mexico, and their palaeoenvironmental implications", *JOURNAL OF Quaternary Science*, Vol. 15, No.2, p 127-140.
- Priyadarsi D., Rivero N., Lopez B., Pérez C., Metcalfe E., Muthu S. y Sánchez Z., 2013, "A record of Holocene summer-season palaeohydrological changes from the southern margin of Chihuahua Desert (Mexico) and possible forcings", *The Holocene*, Vol. 23, No.8, p. 1105-1114.
- Priyadarsi D., Chávez L., Beramendi O., Sánchez Z., Muthu S., Lozano S., Quiroz J. y López B., 2015, "Paleohydrology of the Santiaguillo Basin (Mexico) since late last glacial and climate variation in southern part of western subtropical North America", *Quaternary Research*, Vol. 84, p. 335-347.
- Reimer P., Bard E., Bayliss A., Beck J, Blackwell P. G., Bronk R., van der Plicht J., 2013, "IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years Cal BP", *Radiocarbon*, Vol. 55, No. 4, 1869- 1887.
- Rollinson H., 1993, "Using Geochemical Data: Evaluation, presentation, Interpretation". 1ª ed., Ed. Longman Scientific y Technical, Singapur, p. 352.

- Schnurrelverger D., Russell J. y Kelts K., 2003, "Classification of lacustrine sediments base don sedimentary components", *Journal of Paleolimnology*, Vol. 29, p. 141-154.
- Selley R., 1970, "Ancient Sedimentary Environments", Chapman Hall, London.
- SGM, 2008, Carta Geologico-Minera Estado de Colima Jalisco, Escala 1:500000
- Sly P., 1978, "Sedimentary Processes in Lakes", En A. Lerman (ed.), *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. Springer, Berlin, p. 65-89.
- Stuiver M. y Reimer P., 1993, "Extended 14C database and revised CALIB radiocarbon calibration program", *Radiocarbon* Vol. 35 p. 215-230.
- Thompson R. y Oldfield F., 1986, "Enviromenal Magnetism", Ed. Ellen and Unwin, Londres, p. 227.
- Urrutia J., Ortega J. y Cruz R., 1997, "Rock-magnetic study of the Pleistocene-Holocene sediments from the Babicora lacustrine basin, Chihuahua, northern Mexico", *Geofisica International*, Vol.36, No. 2, p. 77-86.
- Valero B.; Gierlowski E. y Kelts K., 1992, "Multi-Dimensional Lacustrine Lattice. Abstracts IGCP- 324 GLOPALS Annual Meeting", Madrid, 62-63.
- Vázquez C., Ortega G., Rodríguez A., Caballero M. y Lozano G., 2008, "Mineralogía magnética como indicador de sequía en los sedimentos lacustres de los últimos ca. 2,600 años de Santa María del Oro, occidente de México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 25, No. 1, p. 21-38.
- Vázquez C., Priyadarsi D., Solís C., Sean M., Blanco M. y Lozano S., (En Revisión), "Palaeoenvironment of Etzatlán-Magdalena Basin in western-central Mexico over the Holocene and evaluation of some forcings", *The Holocene*.

Vázquez G., Ortega B., Davies J. y 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, No. 3, P. 305-343.

Wallace P. y Carmichael I., 1994, "Petrology of Volcan Tequila, Jalisco, Mexico: disequilibrium phenocryst assemblages and evolution of the subvolcanic magma system", Contrib Mineral Petrol. p. 345-360.

Wentworth C., 1992, "A scale of grade and class terms for clastic sediments", Journal of Geology, Vol. 30, p. 377-392.