



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

***EVALUACIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DEL LAGO DE
CHAPALA***

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

(QUÍMICA ACUÁTICA)

PRESENTA:

Q. MARÍA DE JESÚS GONZÁLEZ GUADARRAMA

DIRECTORA DE TESIS

DRA. RUTH ESTHER VILLANUEVA ESTRADA, INSTITUTO DE GEOFÍSICA

COMITÉ TUTORAL

DRA. MA. T. LETICIA ROSALES HOZ, INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA.

DRA. MARÍA AURORA ARMIENTA HERNÁNDEZ, INSTITUTO DE GEOFÍSICA

DR. CARLES CANET MIQUEL, INSTITUTO DE GEOFÍSICA

DR. EVGUENI CHOUMILINE, CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS.

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO DE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



Evaluación de metales pesados en sedimentos del Lago de Chapala

T E S I S

que para obtener el grado académico de

Maestra en Ciencias del Mar y Limnología

(Química Acuática)

P r e s e n t a

María de Jesús González Guadarrama

Director de tesis: Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada

**Comité tutorial: Dra. Ma. T. Leticia Rosales Hoz
Dra. María Aurora Armienta Hernández
Dr. Carles Canet Miquel
Dr. Evgueni Choumiline**

C. U. México, D. F. 2014

Resumen

El Lago de Chapala se ubica en el borde occidental del Eje Neovolcánico Transmexicano, en territorio de los estados de Michoacán y Jalisco. En su ribera se encuentran establecidas diversas poblaciones, que desarrollan actividades turísticas y de pesca. El agua del Río Lerma es el principal afluente del lago, el cual es empleado como drenaje para ciudades con una alta población y con una amplia actividad industrial. Por lo que las concentraciones de elementos traza en este ecosistema se pueden ver incrementadas y esto afectar a la biota en general. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la movilidad y biodisponibilidad de elementos traza en sedimentos superficiales, lo cual se realizó por medio de una extracción secuencial. Adicionalmente se determinó la mineralogía principal, el tamaño de partícula, la concentración de elementos mayores, materia orgánica y carbonatos. Todos los análisis se llevaron a cabo con sedimento superficial recolectado de distintas zonas del lago en abril de 2012, de acuerdo al diseño de un muestreo reticular. Con base en los resultados del análisis granulométrico se identificó la presencia de sedimento fino, leptocúrtico, mal clasificado. De acuerdo con la información obtenida del análisis mineralógico, encontramos principalmente plagioclasas y arcillas, las cuales son un interestratificado entre cloritas y esmectitas. En cuanto al contenido de carbonatos y materia orgánica, se encuentra una distribución acorde con la dinámica del lago, aunque en la región Lerma-Santiago se observa una concentración inferior (2.5 ± 1.1 % y 0.6 ± 0.4 % respectivamente) con respecto de las otras zonas. La abundancia de elementos mayores (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Mn y P) concuerda con la distribución de los minerales encontrados, donde existe una clara relación entre la concentración de Fe y Al (arcillas) que a su vez se relacionan inversamente con la presencia de Si, Na y K (plagioclasas). De acuerdo con el índice de geoacumulación se observó que existe una baja contaminación por Cr (0.7 ± 0.1) y Zn (0.8 ± 0.4); además, la distribución de estos elementos en el lago permite asociarlos con una fuente antropogénica. Las arcillas presentes en el lugar corresponden al interestratificado entre clorita y esmectita, las últimas permiten la adsorción y/o sustitución de los cationes en su estructura mineral,

debido a sus propiedades. De forma biodisponible sólo se encontraron al Ba ($41\pm 17\%$) y Mn ($31\pm 11\%$), asociados a las fracciones intercambiable y carbonatada, mientras que el Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn se encuentran asociados a la fracción litogénica, principalmente. De lo anterior se concluyó que el sedimento superficial del Lago de Chapala presenta un tamaño de partícula que va de arenas a arcillas, y que la distribución de materia orgánica y carbonatos es muy homogénea, salvo en la región Lerma-Santiago donde se ve disminuida la concentración. Los sedimentos del Lago de Chapala se pueden considerar como poco contaminados de acuerdo con los índices de geoacumulación y factor de enriquecimiento.

AGRADECIMIENTOS

A proyecto de P.A.P.I.I.T. IN 13811, con el cual se financió el desarrollo de esta tesis.

A CONACYT, por la beca otorgada para poder realizar mis estudios de maestría.

A la UNAM, por brindarme el espacio para mi preparación profesional y el desarrollo de la investigación de este proyecto.

A Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, que me permitió el desarrollo de la investigación para mi proyecto, además de contribuir ampliamente en el desarrollo de habilidades y conocimientos.

A Ruth Villanueva, por el apoyo que me brindó para el desarrollo del trabajo de investigación.

De igual forma a los doctores Carlos, Leticia y Eugenio, que destinaron un tiempo importante para evaluar y mejorar mi trabajo.

A la Dra. María Aurora por ayudarme a mejorar el trabajo, además de permitirme usar las instalaciones del laboratorio de Química Analítica, para el desarrollo de la parte experimental de extracción secuencial y total, donde sin el apoyo de Alejandra no me hubiese sido posible desarrollar el trabajo.

A la Dra. Rosa María por la atención especial prestada en el desarrollo de la investigación.

A Dr. Arturo, por la ayuda otorgada para la comprensión de conceptos.

A Q. Rufino por el apoyo brindado para el análisis de elementos mayores y traza por el método de Fluorescencia de Rayos x.

A la QFB Fabiola y la Dra. Olivia por la ayuda para la determinación de concentración de metales en las fracciones del sedimento.

A Q. Pedro Villanueva, por permitir que empleara las instalaciones del Laboratorio 3-D de la Facultad de Química, en el cual desarrolle los análisis de titulación para carbonatos y materia orgánica.

A la M. en Geog. Fabiola, por ayudarme con la granulometría fina, explicarme el proceso para el material grueso y permitir que usara las instalaciones del Laboratorio de Sedimentología Volcánica.

A Dayán, Jazmín, que me ayudaron en el laboratorio y en la toma de muestras.

A la M. en C. Sandra, al Dr. Alejandro y a la I. en G. Alejandra por el apoyo brindado en el muestreo, de igual forma a los señores Ricardo Orozco, René Farías, Salvador Farías y Gonzalo Moreno, por su colaboración para la colecta de las muestras.

A mis padres que me brindaron todo el apoyo para poder culminar este trabajo.

DEDICATORIAS

A Dios, porque gracias a Él existo y tengo la oportunidad de realizar todas las cosas maravillosas que me gustan.

A mis papás Nicolás y María del Carmen, quienes contribuyeron a formar la persona que hoy soy. Además de ser un par de seres especiales, a los que amo.

A mis hermanas Guadalupe, Alejandra y Rocío, junto con mis sobrinos Elena, Samantha, Braulio, Luis, Martín, Andrea, Victoria y Karina. Una parte muy especial y fundamental en mi vida, a los que quiero mucho.

A mis tíos Jesús, Lucía, Lúpita y Mari que representan una parte importante en mi vida y les guardo un gran cariño.

A mis primos Eva, Paly, Jesús, Juan, Liz, Maye y Toño que son como hermanos para mí, y siempre me han dado cariño y apoyo.

A los amigos con los que he compartido este tiempo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	2
1.2. Objetivo general	3
1.3 Objetivos particulares	3
2 ANTECEDENTES	4
2.1. Antecedentes generales	4
2.1.5. Minerales y metales pesados	13
2.2. Antecedentes específicos.....	19
2.3. Relación de arcillas con metales pesados.....	11
3. ÁREA DE ESTUDIO	24
3.1 Ubicación geográfica del lago de Chapala.....	24
3.10. Sedimentación en el Lago de Chapala.....	32
3.2 Origen, morfología y características geológicas del lago de Chapala.....	25
3.3. Variaciones del nivel de agua contenido en el Lago de Chapala.....	26
3.4 Explotación del agua.....	28
3.5. Cuerpos de represa en la Cuenca Lerma-Chapala	30
3.6. Sedimentación en el Lago de Chapala.....	30
3.7 Origen de sedimento.....	31
3.8 Cuerpos hidrotermales (sistema de manantiales sublacustres Los Gorgos) y manifestaciones de hidrocarburos.....	31
3.9 Actividades económicas en la cuenca Lerma-Chapala.....	32
4. METODOLOGÍA	33
4.1 Trabajo de campo.....	33
4.2 Trabajo de laboratorio.....	36
4.3. Procesamiento de los datos	51
5. RESULTADOS	55
5.1. Caracterización fisicoquímica de la columna de agua	55
5.2. Caracterización granulométrica del sedimento superficial del Lago de Chapala.....	56
5.3. Mineralogía	59
5.4. Contenido de materia orgánica y carbonatos	60
5.5. Elementos mayores	62
5.6. Zonificación del Lago de Chapala	65
5.7. Elementos traza	66
5.7.1. Índice de geoacumulación de los elementos traza en los sedimentos del lago de Chapala	68
5.7.2. Factor de enriquecimiento de los elementos traza en los sedimentos.....	70
5.9. Movilidad geoquímica de los elementos traza en los sedimentos de lago de Chapala evaluada mediante la aplicación de la técnica de la extracción secuencial	71

6. DISCUSIÓN	77
6.1. Análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua	77
6.2. Observaciones granulométricas.....	78
6.3. Descripción mineralógica.....	79
6.4. Análisis del contenido de carbonatos y materia orgánica.....	80
6.5. Análisis de la composición química de los sedimentos (elementos mayores y traza)	81
6.7. Movilidad geoquímica.....	88
7. CONCLUSIONES	89
8. LITERATURA CITADA	90
ANEXOS	97, 101

Índice de figuras y tablas.

1 Fig. 2.1. Imágenes de las formas que puede poseer el sedimento según la redondez, esfericidad y angulosidad(http://www.google.com.mx/imgres?biw=1053&bih=582&tbm=isch&tbnid=aU5ZEyJWzIDfiM:&imgrefurl	9
2Figura 2.2. Diagrama de efecto de la concentración de metales sobre los organismos, donde Co es la variación de concentración y se muestra la interacción biota-elemento traza, tanto para los elementos esenciales como no esenciales (Modificado de http://reformaminera.files.wordpress.com/2008/05/metales-pesados.pdf).....	14
3Figura 3.1. Mapa de la ubicación del Lago de Chapala dentro de la cuenca Lerma-Santiago en el centro-occidente del territorio mexicano.....	24
4Figura 3.2. Mapa geológico del Lago de Chapala (González-Morán, 2013).....	25
5Figura 3.3. Mapa batimétrico del Lago de Chapala en función de la cota correspondiente a la capacidad máxima del Lago de Chapala considerado en 97.01 (Filonov, 2001).....	25
6Figura 3.4. Imagen comparativa de las dimensiones superficiales del Lago de Chapala, donde se observa , en la imagen superior hay una disminución enel contenido de agua dentro del lago, en 2001 y en la imagen inferior correspondiente a 2011, se verifica la recuperación del lago (Modificado de http://www.sma.df.gob.mx/mhn/images/05notelo pierdas/cambio/fotoslagochapala.jpg).....	26
7Figura 3.5. Variación en la capacidad del Lago de Chapala revisada en 3 años distintos los 12 meses, mostrando la diferencia entre ellos (http://usai-chapala.org/?page_id=61)......	27
8Figura 4.1. Mapa del Lago de Chapala con los puntos de muestreo indicando los puntos donde se pudo tomar muestra de sedimento. También se indica los sitios de interacción con el Río Lerma y el Río Santiago.....	32
9Figura 4.2. Imagen de la toma de muestra de agua profunda empleando una Botella Van Dorn.	33
10Figura 4.3. Imagen de la draga tipo Van Veen utilizada para coleccionar la muestra de sedimento.	34
11Figura 5.1. Diagrama de Shepard (1954) empleado para describir sedimentos finos, donde se especifica la distribución del tamaño de sedimento en las diversas estaciones.	55
12Figura 5.2. En el gráfico se pueden apreciar los valores de la media y desviación estándar del sedimento.	56
13Figura 5.3. En el gráfico se identifica que las muestras están sesgadas hacia finos y los valores de curtosis muestran tendencia hacia leptocúrticas	57
14Figura 5.4. Contenido de materia orgánica en las principales regiones del Lago de Chapala, mostrado en laFigura 5.8.	59

15	Figura 5.5. Distribución de carbonatos en las zonas del Lago de Chapala, localizadas en la figura 5.8.	60
16	Figura 5.6. Mapas de distribución de elementos mayores, asociados a la presencia de minerales arcillosos y plagioclasas a) óxido de aluminio y b) Óxido de hierro (III).....	61
17	Figura 5.7. Mapas de distribución de los elementos mayores asociados a plagioclasas sódicas y arenas: a) óxido de sodio: b) óxido de potasio y c) bióxido de silicio	62
18	Figura 5.8. Diagrama de árbol, empleando las concentraciones en porcentajes de elementos mayores, carbonatos y materia orgánica para determinar las asociaciones entre las muestras.....	63
19	Figura 5.9. Mapa con la distribución de las estaciones de acuerdo a la zona en que se ubica.	64
20	Figura 5.A. Mapas de distribución de concentración de los elementos traza en el sedimento superficial del lago: a) Cu; b) Cr; c) Ba; d) Ni; e) Pb y f) Zn.	66
21	Figura 5.B. Índice de geoacumulación promedio de los metales traza en los sedimentos de en: a) la Ribera; b) Lerma-Santiago y c) Centro del Lago	67
22	Figura 5.C. Factores de enriquecimiento promedio para metales pesados, normalizados con respecto del Al para los sedimentos de tres zonas del lago: a) Ribera: b) Lerma-Santiago y c) Centro del Lago	68
23	Figura 5.D. Gráficos donde se muestran los porcentajes de asociación a las diferentes fracciones del sedimento: a) bario; b) manganeso.	69
24	Figura 5.E. Distribución del cobre en las diferentes fracciones del sedimento.....	70
25	Figura 5.F. Distribución en las diferentes fracciones del sedimento para: a) cromo y b) níquel.....	71
26	Figura 5.G. Distribución en las diferentes fracciones del sedimento de: a) hierro, y b) zinc.....	72
27	Figura 5.H. Distribución del plomo entre diferentes fracciones del sedimento de lago de Chapala.	73
28	Figura 6.1. Resultados del análisis de componentes principales, en donde se muestra la asociación de las estaciones de muestreo con los elementos que determinan su comportamiento.....	78
	Tabla 2.1. Valores de superficies específicas de algunas arcillas (Sun Kou et al., 2004).....	11
	Tabla 2.2. Datos de capacidad de intercambio iónico para diferentes minerales de las arcillas (Sun Kou et al., 2004).	12

Tabla 2.3. Atributos característicos de los elementos traza a estudiar en el presente trabajo (Hansen et al., 2001; Rudnik, 2003)	15
Tabla 2.4. Generalidades de los elementos traza a estudiar (Noraberg, 2007).....	15
Tabla 4.1 Resultados de la verificación del funcionamiento del multiparámetro y electrodos de conductividad y pH utilizando cloruro de potasio 0.01 M y estándares de HACH, para pH de 4 y 7, “La Motte” para pH de 10.	33
Tabla 4.3. Valores determinados para determinar la clasificación del sedimento con base en la determinación gráfica de la desviación estándar.	37
Tabla 4.4. Términos que son empleados para describir la curtosis (Folk, 2002)	38
Tabla 4.5. Relación entre la pérdida por calcinación y la cantidad de muestra para determinar la cantidad de carbonatos.....	42
Tabla 4.6. El límite de detección de elementos mayores para FRX	45
Tabla 4.7. El límite de detección de elementos traza para FRX	45
Tabla 4.8. Valores de los límites de detección instrumental para cada elemento.	49
Tabla 4.8. Estandarización para le técnica de extracción secuencial, donde se aprecia los valores en porcentaje de recobro para cada elemento.	49
Tabla 4.9. Valores del índice de geoacumulación que indican la relación con la contaminación.	50
Tabla 4.A Valores que relacionan el factor de enriquecimiento con la contaminación de un sistema, de acuerdo a la clasificación de Lawson y Winchester (1979).....	51
Tabla 5.1. Descripción de las propiedades fisicoquímicas del agua de fondo, determinada a diferentes horas, por lo que la temperatura (to), puede mostrar variaciones significativas entre estaciones.	53
Tabla 5.2. Distancias interlaminares, obtenidas a partir de los difractogramas que permiten la identificación de los minerales.....	57
Tabla 5.3. Datos para interpretar el tipo de arcillas presentes en el sedimento.....	58
Tabla 6.1. Análisis granulométrico realizado en algunos lagos canadienses, en donde se aprecia el predominio de sedimentos finos (Kemp, 1971).....	75
Tabla 6.3. Concentraciones promedio para el Lago de Chapala para los diferentes elementos de interés en diferentes investigaciones presentadas en trabajos previos y en comparación con el actual	80
Tabla 6.4. Concentración Fe y Mn en los sedimentos del lago de Chapala.	81

Tabla 6.5. Datos reportados de la concentración promedio para los elementos objeto de estudio de este trabajo en diversos cuerpos acuáticos del mundo (Kemp, 1971; Filipek y Owen, 1979; Horowitz y Elrick, 1987. 81

1. INTRODUCCIÓN

Diversos trabajos científicos se han enfocado a estudiar la presencia y movilidad de los diferentes elementos químicos y cómo éstos han modificado las características de los cuerpos de agua, de lo cual destaca la afectación sufrida por metales pesados (Mulligan *et al.*, 2001). Pese a considerarse como micronutrientes algunos de ellos, en las escalas de concentración encontradas en diversos cuerpos acuáticos resultan tóxicos a la biota presente.

La concentración de los elementos traza ha visto un incremento debido a la actividad antropogénica a nivel mundial en sistemas acuáticos marinos y epicontinentales, siendo los últimos quienes presentan una afectación mayor (Ramírez y Noreña, 2004; Rizzo, 2006; Pertsemli y Voutsas, 2007).

El estado actual de los sistemas acuáticos ha generado que la comunidad científica desarrolle investigaciones sobre las condiciones de la columna de agua y sedimento.

México no es la excepción y se han desarrollado estudios sobre estuarios, lagunas costeras, ríos y lagos. Mostrando análisis relacionados con la dinámica de los sistemas, las propiedades físico-químicas, elementos mayores y traza de la columna de agua. También se han realizado determinaciones de elementos mayores y traza, así como análisis granulométricos de sedimento tanto superficial como profundo.

Las investigaciones se han enfocado también en dataciones, secuencias sedimentarias y paleoclimas a partir de núcleos. Otra área de investigación es la concerniente a la procedencia de los sedimentos, en el área de la petrogénesis (*e. g.* Caballero *et al.*, 2010; Armstrong-Altrin *et al.*, 2011)

1.1. Justificación

El Lago de Chapala es el lago más importante en el territorio mexicano, ya que es el de mayor extensión, y en el se desarrollan actividades acuícolas, al cual se le extrae agua para diferentes usos, como son la agricultura, ganadería, industria y uso doméstico. Debido a lo anterior es muy importante realizar un estudio ambiental del lago en sedimentos como último reservorio de los metales traza que se encuentran en este cuerpo de agua.

Dentro de los múltiples estudios sobre el Lago de Chapala se cuenta con las recopilaciones de Hansen *et al.* (2001) y Cotler *et al.* (2005), que basan su estudio en la cuenca de drenaje, y en la columna de agua del propio cuerpo lacustre, en donde sugieren el análisis de biodisponibilidad de elementos traza como As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, motivación para el desarrollo de este trabajo de investigación.,

En el desarrollo de este proyecto, la investigación se enfocará en analizar a los sedimentos recientes, en cuanto a la granulometría, contenido de materia orgánica y carbonatos, la mineralogía de ellos, así como la determinación de la concentración y biodisponibilidad de los metales (Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn).

La determinación de concentraciones de los metales pesados permitirá determinar el grado de contaminación, acumulación o enriquecimiento, para cada elemento comparado con la Corteza Continental Superior (CCS).

Otro factor que motiva la investigación es el hecho de que alrededor del lago existen descargas hidrotermales, como los que se encuentran en la zona de San Juan Cosala y en San Luis Agua Caliente (Zárate *et al.*, 2001). Adicionalmente Zárate *et al.* (2005) reportan la presencia de manantiales hidrotermales sublacustres, a los cuales se les atribuye la presencia de 2 montículos de chapopote dentro del lago que fueron apreciados en 2002, cuando el nivel del lago se vio disminuido y aparecieron como isletas. Es importante considerar las observaciones realizadas en dicho artículo, ya que las descargas hidrotermales pueden afectar significativamente las

características físicas y químicas del sedimento. Por ejemplo, pueden liberar algunos elementos como el As, Ba, Hg, Mn, entre otros.

1.2. Objetivo general

Estudiar las características geoquímicas de los sedimentos superficiales del Lago de Chapala para desarrollar el análisis de movilidad de elementos traza.

1.3 Objetivos particulares

- a) Evaluar las condiciones fisicoquímicas de la columna de agua en el Lago de Chapala.
- b) Caracterizar el sedimento lacustre en función de las propiedades granulométricas y químicas (contenido de materia orgánica y carbonatos)
- c) Conocer la mineralogía predominante del sedimento superficial del Lago de Chapala, a través de difracción de rayos X y elementos mayores.
- d) Identificar un patrón de distribución de los elementos traza (Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) en los sedimentos superficiales en el Lago de Chapala.
- e) Establecer el grado de contaminación en el sedimento superficial por elementos traza a través del índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento.
- f) Evaluar la biodisponibilidad de elementos traza (Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) a partir de las diferentes fracciones que se encuentran en el sedimento.

2. ANTECEDENTES

2.1. Antecedentes generales

La presente sección involucra los conceptos importantes del tema objeto de estudio con la finalidad de clarificar sus definiciones, características y composición, permitiendo la comprensión del estudio a realizar.

2.1.1. Tipos de Lagos

Se han diferenciado diversos sistemas de agua epicontinentales, clasificándolos como lóticos y lénticos (Wetzel, 2001). Los primeros corresponden a todos aquellos sistemas en los cuales el agua fluye constantemente, tales como los ríos, mientras los lénticos son aquellos en los que el agua no tiene gran flujo (lagos, lagunas, presas entre otros).

Los lagos se encuentran distribuidos en diferentes regiones geográficas, por lo que se mostrarán variaciones de características, como son: temperatura, humedad, precipitación y evaporación, entre otras; estos factores, junto con la litología y el tipo de cuenca determinarán el comportamiento de un sistema léntico (Alcocer y Bernal-Brook, 2010). De acuerdo con su origen, los lagos pueden ser: tectónicos, artificiales, glaciares, endorreicos, de barrera, de meandro, de cráter, pelágicos y cársticos (Margalef, 1983).

2.1.2. Ambientes sedimentarios

Es importante describir a los sedimentos, ya que permiten la descripción de un sistema a partir de características como tamaño de partícula, composición química, madurez, entre otros, estableciendo una relación con la procedencia (Carranza, 1997).

Los sedimentos son partículas no consolidadas generadas por la meteorización y erosión de rocas, por precipitación química de disoluciones acuosas o por secreciones de organismos, y transportadas por el agua, el viento o los glaciares

([http://www.geologia.uson.mx/academicos/monreal/CursoSedimentologia/Introduccion%20Sedimentologia.ppt#264,12,Diapositiva 12](http://www.geologia.uson.mx/academicos/monreal/CursoSedimentologia/Introduccion%20Sedimentologia.ppt#264,12,Diapositiva%2012)).

Entre los procesos sedimentarios encontramos la erosión, intemperismo, transporte, depósito, acumulación, litificación, diagénesis y precipitación (Folk, 2002).

Para el estudio de los sedimentos se tiene que atender a diferentes elementos como son su origen y características del ambiente sedimentario, descritos en seguida:

2.1.2.1. Origen

Los sedimentos pueden tener diversos orígenes y, con base en el lugar de su procedencia, pueden ser (Folk, 2002): (a) terrígenos (provenientes del continente), (b) biogénicos (resultado de la actividad biológica), autigénicos (formados en la cuenca, por causa de reacciones *in situ*), y (c) cosmogénicos (material que proviene del espacio).

La mayor parte del sedimento es de origen biogénico y terrígeno, teniendo muy poco impacto el autigénico y cosmogénico. En los lagos predominará el aporte terrígeno cuando se trata de un sistema oligotrófico; sin embargo, hablando de un sistema eutrofizado podrá existir un mayor aporte biogénico, debido a la producción primaria.

Por otro lado, se han establecido distintas clasificaciones de los sedimentos de acuerdo a su composición, entre las que destacan la de Valloni (1991) y la de Gazzi-Dickinson (1985); los últimos establecen una relación entre el tamaño de partícula y los porcentajes de cuarzo, feldespatos y fragmentos de roca presente, empleados para determinar la madurez del sedimento.

2.1.2.2. Tipo de ambiente sedimentario

El ambiente sedimentario corresponde a una parte de la superficie terrestre que se diferencia por los procesos físicos, químicos y biológicos de territorios adyacentes. Los ambientes sedimentarios se clasifican en continentales, de transición y marinos. (http://www.eduinnova.es/feb2010/ambiente_sedimentario.pdf)

Dada la naturaleza de la presente investigación, el enfoque es orientado hacia ambientes continentales lacustres. En este tipo de ambiente sedimentario se encuentran procesos determinantes tales como:

a) Procesos físicos: donde se distinguen la precipitación, la temperatura, el medio de transporte (fluvial, eólico) y la forma de transporte predominante (tracción, suspensión, rodamiento y saltación), velocidad de transporte presente en el medio, las corrientes y dirección.

b) Procesos químicos en donde se consideran a la composición química de la roca, elementos presentes en la columna de agua, además de la acidez y potencial redox del medio.

En un ambiente lacustre se puede clasificar a los sedimentos en tres grupos:

a) Sedimentos biogénicos: genera variedad mineralógica por procedencia de fósiles o actividad biológica de organismos pelágicos y bénticos, en ellos encontramos a sedimentos carbonatados, materia orgánica de organismos carentes de esqueleto (plantas, pellets y ooides) y fosilífera (remanentes de silicio, quitina o carbonatos componentes de diatomeas, esponjas, frústulas o espículas) (Schnurrenberger *et al.*, 2003).

b) Sedimentos químicos: se consideran autóctonos y son generados por procesos inorgánicos o biológicos. La composición mineral primaria de los minerales autigénicos o diagenéticos formados por precipitación inorgánica que serán depositados por la columna de agua (evaporitas y sedimentos carbonatados. Involucra procesos como son: la precipitación, recristalización, evaporitas, detritos silicios, calcáreos o carbonatos) (Schnurrenberger *et al.*, 2003)

c) Sedimentos clásticos: generalmente se consideran alóctonos y está compuesto por granos (cuarzo, cenizas volcánicas, etc.), depositados por procesos físicos de sedimentación (viento y agua) (Schnurrenberger *et al.*, 2003)

Los procesos de erosión, transporte y sedimentación pueden predominar de forma estacional, por la posición geográfica, por la energía presente en el sistema. Se observa que, por ejemplo, en medios marinos suele predominar la sedimentación; en los continentales la erosión y en los continentales fluviales predominan los procesos de erosión, transporte y sedimentación simultáneamente. En cambio en sistemas lacustres, la sedimentación es el proceso que predomina, ya que en general la energía presente es baja (Carranza, 1997; Folk, 2002).

En los lagos no se da una distribución uniforme del sedimento, ya que ésta, queda en función de la resuspensión por ondas, deltas y mezcla continua, por lo que los sedimentos son altamente variables aunque pueden existir zonas uniformes (Downing y Rath, 1988).

Describir al sedimento para poder asociarlo a un sistema determinado queda en función de los parámetros granulométricos y los parámetros estadísticos granulométricos, los cuales son obtenidos de forma gráfica a partir de un histograma de frecuencia acumulada. En seguida se realizará una descripción de cada parámetro.

a) Madurez

Se emplea para determinar el grado de erosión sufrido por los sedimentos, y generalmente se mide a través de la relación entre granos de feldespatos y de cuarzo. Debido a que el cuarzo es un material muy resistente, una presencia mayor de ellos indica que el sedimento ha sido muy transportado y por tanto se considera un sedimento de alta madurez. (Folk, 2002). El "índice de madurez" (Ec. 2.1), refleja la razón existente entre cuarzo y feldespatos presentes, los cuales son cuantificados, con la ayuda de un microscopio determinando el porcentaje en abundancia en mínimo 300 granos de sedimento.

$$I_m = \frac{C}{F+L}$$

Ec. 2.1

En donde:

I_m = Índice de madurez

C=Cuarzo

F=Feldespatos

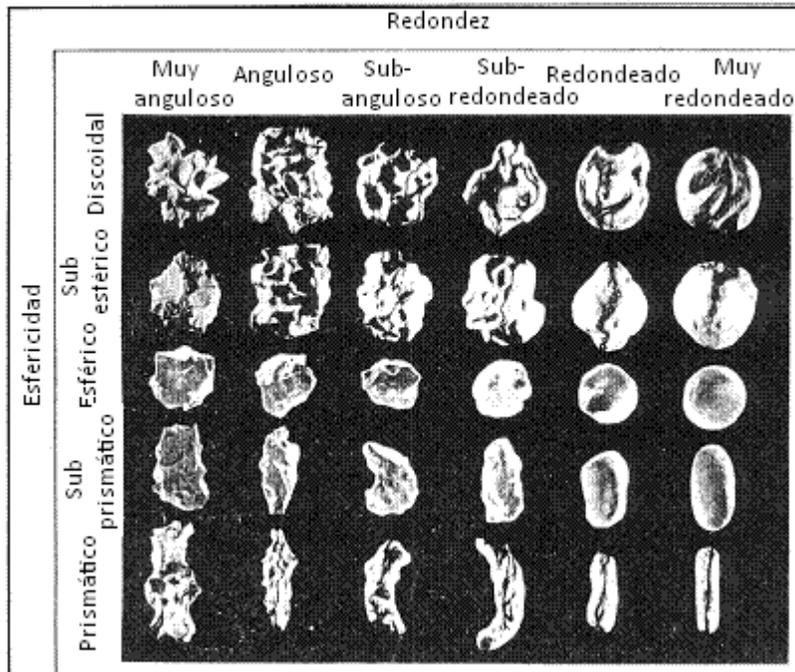
L=Líticos presentes.

b) Tamaño de grano

Es el tamaño de partícula del sedimento y puede ir de fino a grueso. Para expresarlo se emplean las unidades phi (Φ), que son calculadas a través del logaritmo negativo base dos del diámetro medido en milímetros de la partícula. El diámetro corresponde al de una esfera que posea el mismo volumen del sedimento. ([http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/T_TRANSPORTE_SEDIMENTO S.pdf](http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/T_TRANSPORTE_SEDIMENTO_S.pdf))

f) Formas

Se refiere a la forma que pueden poseer los granos del sedimento, pudiendo ser: redonda, angular, esférica, plana, tubular, barra (Fig. 2.1); la forma dependerá de la naturaleza química del sedimento, así como del origen, el transporte y la energía presente (Folk, 2002).



1 Fig. 2.1. Imágenes de las formas que puede poseer el sedimento según la redondez, esfericidad y angulosidad(<http://www.google.com.mx/imgres?biw=1053&bih=582&tbn=isch&tbnid=aU5ZEyJWzIDfiM:&imgrefurl>)

.2.1.3. Características químicas propias en el sedimento

Además del análisis granulométrico, es preciso describir la composición química del sedimento, para lo cual se consideran los siguientes elementos:

a) Composición elemental

Corresponde a los elementos que conforman el sedimento, y podemos encontrar 2 grupos: a) elementos mayores (Si, Al, Ca, Na, K, Fe, Mn, P, Mg, Ti), con porcentajes superiores al 0.1%, b) elementos menores o traza (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V, Zn, Zr, entre otros)

b) Materia orgánica: es un componente menor, pero importante en los sedimentos lacustres, en donde se puede almacenar información para la interpretación de paleoclimas (Meyers y Lallier-Vergés, 1999). La principal contribución de materia

orgánica para los sedimentos son los detritos de organismos bénticos y pelágicos (Meyers e Ishiwatari, 1993), además del aporte de vegetación presente en la cuenca de drenaje a través de sistemas fluviales y de la presente en la ribera. Entre el 60 y 70% de la materia orgánica presente en los sedimentos corresponde a ácidos húmicos. La cantidad de materia orgánica se determina para evaluar el transporte, depositación o retención de metales traza (Loring y Rantala, 1992). Suele ser muy útil para determinar la procedencia del sedimento de acuerdo con la alteración y degradación presente, aunque estas variaciones se encuentran en función de la posición geográfica y temporalidad (Meyers y Lallier-Vergés, 1999).

c) Carbonatos: el ambiente lacustre representa el ambiente más importante para el depósito de carbonatos después de los ambientes marinos (Müller, Förstner y Heft, 1972). Es indispensable determinar la concentración de carbonatos en una muestra de sedimentos, ya que se asocia a elementos como son Mn, Ca, Na, K, principalmente, que pueden ser sustituidos por elementos traza (Co, Ni, Rb, entre otros) asociándose en una fracción que permite un fácil acceso a ellos. Además que la presencia de carbonatos está relacionado con las condiciones ácido-base sedimentarias, debido a que por debajo de un pH de 4.5 no es factible la presencia de carbonatos (Libes, 2002).

2.1.4. Relación de arcillas con metales pesados

Las arcillas vistas como un mineral corresponden a silicatos alumínicos hidratados, cuya estructura se puede describir como capas tetraédrica-octaédrica (t-o) o bien tetraédrica-octaédrica-tetraédrica (t-o-t), con un espacio interlaminar.

Las arcillas poseen la capacidad de retener elementos metálicos en los espacios interlaminares, mediante el proceso de adsorción, que depende de variables como son el pH y potencial óxido-reducción del medio en el que nos encontramos, ya que de éstos dependerán las características de carga y facilidad de intercambio que posea la arcilla objeto de estudio. Las arcillas presentan de los metales presentes en diferencias estructurales y composicionales, pudiendo formar grupos, por lo que

presentan diferentes capacidades de intercambio iónico y superficies de contacto. Lo que en conjunto con el comportametro químico de los cationes presentes en el sistema crean una competición para ocupar los lugares de adsorción o bien posibles sustituciones estructurales.(Andrade *et al.*, 2005).

El intercambio iónico depende de la superficie específica o área superficial de una arcilla y se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (cuando existe), de las partículas constituyentes por unidad de masa, expresada en $m^2 \times g^{-1}$. Dado que la adsorción es un proceso superficial, esta característica es fundamental (Sun Kou *et al.*, 2004). En la Tabla 2.1 se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de las arcillas.

Tabla 2.1. Valores de superficies específicas de algunas arcillas (Sun Kou *et al.*, 2004).

Mineral	Áreas superficiales ($m^2 g^{-1}$ de arcilla)
Caolinita de elevada cristalinidad	15
Caolinita de baja cristalinidad	50
Halloisita	60
Illita	50
Esmectitas	80 – 300
Sepiolita	100 – 240
Paligorskita	100 – 200

Las arcillas presentan la capacidad de intercambiar cationes fijados en la superficie exterior, en los espacios interlaminares o bien en otros espacios interiores de su estructura, por otros existentes en disoluciones acuosas. La capacidad de intercambio catiónico de las arcillas se mide en miliequivalentes (tabla 2.2).

Tabla 2.2. Datos de capacidad de intercambio iónico para diferentes minerales de las arcillas (Sun Kou et al., 2004).

Arcillas	Capacidad de intercambio iónico (meq/100g – arcilla)
Caolinita	3 – 5
Halloisita	10 – 40
Illita	10 – 50
Clorita	10 – 50
Vermiculita	100 – 200
Esmectitas	80 – 200
Sepiolita – paligorskita	20 – 35

2.1.5. Minerales y metales pesados

Con referencia a los elementos pesados, se debe diferenciar entre metal pesado y mineral pesado, por eso a continuación describiré qué son y cuáles son sus diferencias:

2.1.5.1. Minerales pesados

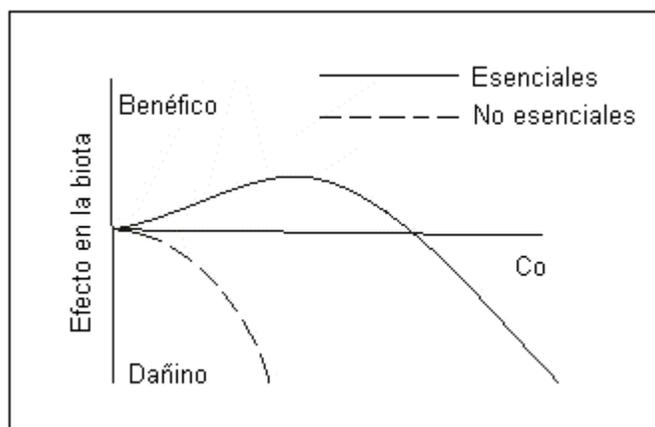
En el estudio sedimentológico es importante destacar que pueden existir minerales pesados, los cuáles son identificados como aquellos en los que la gravedad específica es superior a 3 g cm^{-3} , caracterizándose por coexistir con minerales ligeros (pero con distinta granulometría) debido a la equivalencia hidráulica. Se pueden apreciar en zonas de alta energía, los cuales son transportados por vientos muy fuertes o tormentas, también se encontrará un incremento de estos minerales a causa del proceso de deflación; el cual, es producido por los vientos, que sólo alcanzan a remover los minerales ligeros y generan un enriquecimiento en los

pesados (Kasper *et al.*, 2008). Entre los minerales pesados más comunes se encuentran: magnetita, olivino, titanita, augita, anfíbol, hematita, ilmenita, epidota, granate, zircón, etc.; estos minerales tienen en común que en su estructura suelen encontrarse metales pesados. 2.1.5.2. Metal pesado

Un metal pesado era considerado cualquier metal cuya gravedad específica fuera mayor de 5 g cm^{-3} . Una definición actual y aceptada, considera a los metales pesados como aquellos elementos químicos que poseen una masa atómica comprendida entre 63.55 (Cu) uma y 200.59 uma (Hg) (Rainbow, 1993) y que presentan un peso específico superior a 4 g cm^{-3} . Cabe destacar que en esta categoría entran prácticamente todos los elementos metálicos de interés económico (<http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MAM7.htm>).

Químicamente un elemento pesado corresponde a elementos de transición y post-transición como lo son el As y el Se (considerados metaloides) (INE, 2005), considerando que estos elementos poseen una densidad superior a metales de las familias IA y IIA.

Los metales pesados poseen diferentes estados de oxidación, que generan la asociación con diversos compuestos permitiendo que su presencia se vea favorecida en agua, aire y suelo; de igual forma se asocian a propiedades intrínsecas que determinan su abundancia y ocupación espacial, como son la reactividad, carga iónica y solubilidad, principalmente.. Algunos de estos elementos son esenciales en concentraciones bajas ya que son necesarios para la biota. Sin embargo, cuando la concentración de estos elementos se incrementa suelen ser considerados como contaminantes y dependiendo del organismo de la capacidad de cada organismo, en su mayoría suelen ser tóxicos. Existen otros elementos traza, que no son necesarios para los organismos; así que, aún en concentraciones bajas son considerados como tóxicos como se muestra en la Fig 2.2.



2Figura 2.2. Diagrama de efecto de la concentración de metales sobre los organismos, donde Co es la variación de concentración y se muestra la interacción biota-elemento traza, tanto para los elementos esenciales como no esenciales (Modificado de <http://reformaminera.files.wordpress.com/2008/05/metales-pesados.pdf>)

Entre los elementos traza encontramos: As, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Hg, Ti, Se, Pb y otros.

Una vez comprendidos los conceptos de qué es un metal pesado se vuelve imprescindible describir las principales características de los elementos a estudiar (Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn) (Tabla 2.7).

Tabla 2.3. Atributos característicos de los elementos traza a estudiar en el presente trabajo (Hansen et al., 2001; Rudnik, 2003)

Elemento	Símbolo	Z	M (uma)	Valencias	Familia	Concentración media en CCS (mg/kg)	Concentración tolerada por la biota (mg/kg)*
Bario	Ba	56	137	2	IIA	628	-
Cobre	Cu	29	63.5	1, 2	IB	28	110
Cromo	Cr	24	52	2, 3, 6	VIB	92	110
Hierro	Fe	26	55.5	2, 3	VIIIB	5.042% como óxidos	-
Manganeso	Mn	25	55	2, 3, 7	IIB	0.1% como óxido	1 100
Níquel	Ni	28	58.5	2, 3	VIIIB	47	75
Plomo	Pb	82	207	2, 4	IVA	17	250
Zinc	Zn	30	65.5	2	IIB	67	820

Z: número atómico; M: masa atómica; uma: unidad de masa atómica; CCS: corteza continental superficial (Rudnick, 2003).

Las generalidades de estos elementos a estudiar se presentan en la Tabla 2.4

Tabla 2.4. Generalidades de los elementos traza a estudiar (Noraberg, 2007)

Elemento	Fuente	Usos	Efectos nocivos
Ba	Rocas ígneas y sedimentarias Presente en la corteza terrestre, ocupando el 18º lugar en presencia	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de diesel, caucho, linóleo, barnices y esmaltes • Fabricación de papel y cerámicos • Diagnósticos médicos. • Industria del petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> • No existe evidencia de poseer propiedades cancerígenas o mutagénicas
Cu	Minerales como calcopirita, calcocita,	<ul style="list-style-type: none"> • Suele emplearse en la fabricación de cables y 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede dañar el hígado y riñones

	bornita, enargita, cuprita y malaquita	tubería para agua potable <ul style="list-style-type: none"> • Fungicidas e insecticidas • Pigmentos • Catalizadores 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce la actividad de los microorganismos y lombrices, generando una disminución en el aprovechamiento de nutrientes
Cr	Se encuentra en la corteza terrestre principalmente como cromita.	<ul style="list-style-type: none"> • Recubrimiento • Curtido • Pinturas • Materiales refractarios 	<ul style="list-style-type: none"> • Elemento tóxico en su forma hexavalente, penetrando con mucha facilidad a los microorganismos • Agente cancerígeno • Provoca daños en vías respiratorias y aparato digestivo
Fe	Es abundante en la corteza terrestre, ocupando el cuarto lugar en abundancia	<ul style="list-style-type: none"> • Micronutriente • En la industria del acero y de pigmentos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo cuando se mezcla con As se hace tóxico para los organismos vivos
Mn	Asociado a (óxidos, carbonatos y silicatos), sedimentos y rocas, liberado en sistemas hidrotermales	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de acero • Agente oxidante • Recubrimiento de electrodos en varillas de soldadura • Trituradores de rocas • Fabricación de cerámicas, cerillos, vidrio y tintes • Fertilizantes • Decolorantes de textiles y curtido de pieles 	<ul style="list-style-type: none"> • Se considera como tóxico cuando se presenta en forma de permanganato, generando reacción en animales.

Ni	Rocas ígneas, concentrándose en suelos y sedimentos	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de acero inoxidable y aleaciones resistentes a la corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> • Agente cancerígeno de aparato respiratorio y circulatorio • Afecta el crecimiento de los vegetales
Pb	Abundante en el suelo, coexiste en minas con Cd, Zn y Cu.	<ul style="list-style-type: none"> • Pinturas, lacas y barnices 	<ul style="list-style-type: none"> • Compite con el Ca y el Zn en los organismos • Es afín a los grupos sulfhidrilos de las proteínas • Altera el transporte de iones esenciales • Produce anemia, enfermedades renales, alteración de la cadena de ADN • Puede producir abortos y malformación
Zn	Ocupa el lugar veinticinco en la composición de la corteza terrestre, principalmente.	<ul style="list-style-type: none"> • Aleaciones y recubrimientos galvánicos • Micronutrientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Impide la incorporación de nutrientes al suelo y dificulta la descomposición de materia orgánica en humanos • Produce úlceras gástricas, irritación en la piel e incluso arterioesclerosis

2.2. Antecedentes específicos

2.2.1. Elementos traza en los lagos de Sudamérica y América central

Como ejemplos de contaminación de metales traza en lagos de Sudamérica y América Central, podemos citar al conjunto de Lagos Andinos al norte de la Patagonia, donde se encuentran elementos en la columna de agua por arriba de los permitidos en la norma argentina de agua, como son el Hg, Fe, Mn, V, Cr, Zn, Ti, Sr, Sb, Se, Ag, As, Ni, Cs, Co, y Ba (Rizzo, 2010). En los lagos chilenos Chúngara, Laja, y Castor, se observa enriquecimiento de los metales Hg, Pb, Cd, Cu, Cr y Zn en sedimentos, de acuerdo con el índice de geoacumulación (Urrutia *et al.*, 2002). Sin embargo hay trabajos como el realizado en el Lago Cocibolca, Nicaragua, donde se reporta que la presencia de los metales Zn, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Mn, Hg y Se, no se debe exclusivamente a actividades antropogénicas sino también a un aporte geogénico; es decir, su fuente es la roca madre (Saria-Sacasa, 1997). Otros trabajos reportan los efectos de algunos metales pesados, como el realizado en el Río Aruri y el Lago Junín en Perú, donde los bioensayos con *Escherichia coli*, comprobaron que la presencia de metales como son Fe, Pb, Cu, Zn y Cd afecta a los organismos vivos disminuyendo la actividad enzimática (Ianaconne, 2005).

Se reportan infinidad de investigaciones realizadas para monitorear las condiciones de cuerpos acuáticos epicontinentales, identificar posibles fuentes de contaminación y especiación para los elementos presentes e incluso para generar denuncia y que las autoridades modifiquen o apliquen adecuadamente las leyes, entre los que encontramos a Dundar *et al.* (2012), Soltan *et al.* (2001), Sarmiento *et al.* (2001), Wakida *et al.* (2008), Hwang *et al.* (2011).

2.2.2. Cuenca Lerma-Chapala

2.2.2.1. Río Lerma como fuente de diferentes materiales para Lago Chapala

También se han realizados estudios que relacionan el tamaño de partícula con la concentración de los metales (e.g. Rasmussen, 1996), además de analizar la presencia de elementos traza para determinar el grado de contaminación (Provoost

et al., 2006) y Birch *et al.*, (2001)). El presente trabajo se enfocará en el estudio de metales traza en el Lago de Chapala, que se ve afectado por el transporte de metales pesados provenientes de las actividades humanas en la cuenca Lerma-Chapala.

Para analizar la posible influencia de aporte de metales pesados en sedimentos del Lago de Chapala por parte del Río Lerma, es necesario referenciar a los varios artículos publicados acerca del estudio de estos. Icela-Barcelo (1999) estudió la presa J. A. Alzate ubicada en el Estado de México y reporta concentraciones elevadas de Fe, Cu, Cd, Pb y Mn tanto en la columna de agua, como en el sedimento de debido a la actividad industrial desarrollada en la región de Almoloya de Juárez, Toluca, Lerma y Almoloya del Río. En la parte media de la cuenca, encontramos como metales pesados en los sedimentos a Cu, Mn, Fe, Zn y Pb, los cuales se encuentran en concentraciones muy por encima de las recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de E.U.A.?(González, 2006).

En el curso alto del Río Lerma referido a la región de Tlachaloya, Ixtlahuaca, Atlacomulco y Temascalcingo, se han encontrado las concentraciones de Cr, Cd, Cu, Pb, Ni y Zn, las cuales no rebasan el rango de toxicidad al ambiente edáfico, mientras que los elementos Pb y Ni, se considera que tienen origen antropogénico, y geogénico de acuerdo con la determinación del índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento (Del Águila-Juárez *et al.*, 2005).

Hernández (2007) realizó un estudio sobre los metales potencialmente tóxicos en la cuenca del Río Lerma, realizando un análisis de características fisicoquímicas, a través de la medición de oxígeno disuelto, pH, materia orgánica disuelta, material suspendido, metales suspendidos particulados en la columna de agua, así como materia orgánica, granulometría y presencia de elementos potencialmente tóxicos (Cd, Co, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn) en sedimentos superficiales, concluyendo que las medidas que se han adoptado para control de Cd y Pb han funcionado, aunque no así para el Co.

El Río Lerma sigue su cauce por los estados de Michoacán, Querétaro, Guanajuato y Jalisco en donde se utiliza como medio para sistemas de drenaje, pero al mismo tiempo, el agua se usa para actividades agrícolas, industriales y domésticas. A cada una de las actividades se les puede relacionar con diferentes elementos, acorde con lo descrito a continuación:

- a) Agricultura: compuestos que contienen elementos como N, As, S y P principalmente.
- b) Industria: elementos como son: Al, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Au, Pd, Ag, Pt, Pb, Ti y Zn principalmente.
- c) Actividades domésticas: principalmente existe un aporte de carbono orgánico, N, P, Al, Zn, Cd, Pb y Cu.

2.2.2.2. Lago Chapala

De tal modo que en el Lago de Chapala están presentes varias fuentes antropogénicas de los metales traza. Trabajos previos reportan la presencia de metales como son: Cr, Cd, Pb, Zn, Ni y Cu asociados a la columna de agua (Aylla-Jay, 2001). En sedimentos se reporta la presencia de Cd, Cr, Ni, Fe, Zn y Cu según lo obtenido por Rosales-Hoz *et al.* (2000). En estudios más recientes se realizó un muestreo durante la época de secas en 9 sitios del Lago, encontrando concentraciones elevadas de acuerdo a lo indicado por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de America de los metales: Cd, Pb, Mn, Fe, Cr, Cu, Zn y Ni, en distintas regiones del lago (Trujillo-Cárdenas *et al.*, 2010).

El Lago de Chapala es un cuerpo de agua con diversos estudios hidrológicos, geológicos y geoquímicos, ya que es considerado el lago más importante en todo el país, porque cubre una extensión aproximada de 1100 km², es el vaso regulador de la cuenca Lerma-Chapala, que cubre más de 50 000 km² (Rosales-Hoz *et al.*, 2000). Entre los análisis realizados encontramos la hidrología de la cuenca (Aparicio, 2001), que aunado a las observaciones reportadas por la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA), ha permitido la observación en las variaciones en el nivel del lago; el

cual ha mostrado grandes fluctuaciones entre un año y otro, con las diferencias considerables entre la época de secas y lluvias, teniendo un mínimo histórico de volumen en 1950 (con un 21% de su capacidad) (CEA, 2012).

Asimismo encontramos estudios de la geología de la zona (Zárate *et al.*, 2001; Cotler *et al.*, 2006). También se ha estudiado la composición mineralógica de los sedimentos, en donde se reportan arcillas como son haloisita y hectorita, además de minerales como son albita, ortoclasa, carbonatos de calcio y magnesio, además de los óxidos de hierro y titanio (Zárate *et al.*, 2000).

Hansen y *van Afferden*. (2001) referencian:

- A De León *et al.* (1999) indicando que la eutrofización es un tema muy estudiado en el Lago de Chapala porque es un cuerpo de agua con suma importancia tanto para el desarrollo urbano de la Ciudad de Guadalajara, como para el desarrollo de actividades económicas en las poblaciones ribereñas. Los estudios se han centrado en presencia y concentración de compuestos nitrogenados y fosforados, así como en la producción primaria a partir de fitoplancton.
- De igual forma se han estudiado las fuentes, acumulación y dinámica de sustancias tóxicas orgánicas como son pesticidas, compuestos policíclicos aromáticos y materia orgánica suspendida.
- También indica lo analizado por Jay y Ford (1998) que realizaron estudios ictiológicos sobre los peces que allí habitan, tanto en abundancia de los organismos como en la contaminación de los peces.

En el Lago de Chapala se desarrollaron estudios sobre la presencia de metales, en la columna de agua, la bioacumulación en sedimentos superficiales (Rosales-Hoz *et al.*, 2000; Hansen y Van Afferden, 2005; Trujillo-Cárdenas *et al.*, 2010).

Los elementos hasta ahora estudiados y detectados son: Cu (29 mgkg^{-1}), Cr (66 mgkg^{-1}), Ni (32 mgkg^{-1}), Pb (81 mgkg^{-1}), Co (40 mgkg^{-1}) y Zn (102 mgkg^{-1})

(Rosales-Hoz *et al.*, 2000). También se han determinado algunos elementos traza, tal es el caso del Ba, Co, Cr, Cu, Nb, Ni, Rb, Sr, V, Y, Zr y Zn (Trujillo-Cárdenas *et al.*, 2010). La diferencia entre estos trabajos radica en que Rosales-Hoz *et al.* (2000) realizan la digestión total para elementos traza, además de la determinar la concentración de materia orgánica, carbonatos y parámetros físico-químicos, enfocándose a 13 estaciones de muestreo distribuidas en todo el lago, mientras Trujillo Cárdenas *et al.* (2010) enfocan su estudio en 3 estaciones ubicadas en la región próxima a la Cd. de Chapala, en donde determinan la concentración de metales traza. Hansen *et al.* (2001) recomiendan el estudio de biodisponibilidad de elementos como son: As, Cu, Cd, Cr, Mn y Ni, ya que en los estudios previos en la columna de agua y en extracciones totales de sedimentos se han encontrado en apariencia concentraciones elevadas de los elementos antes mencionados.

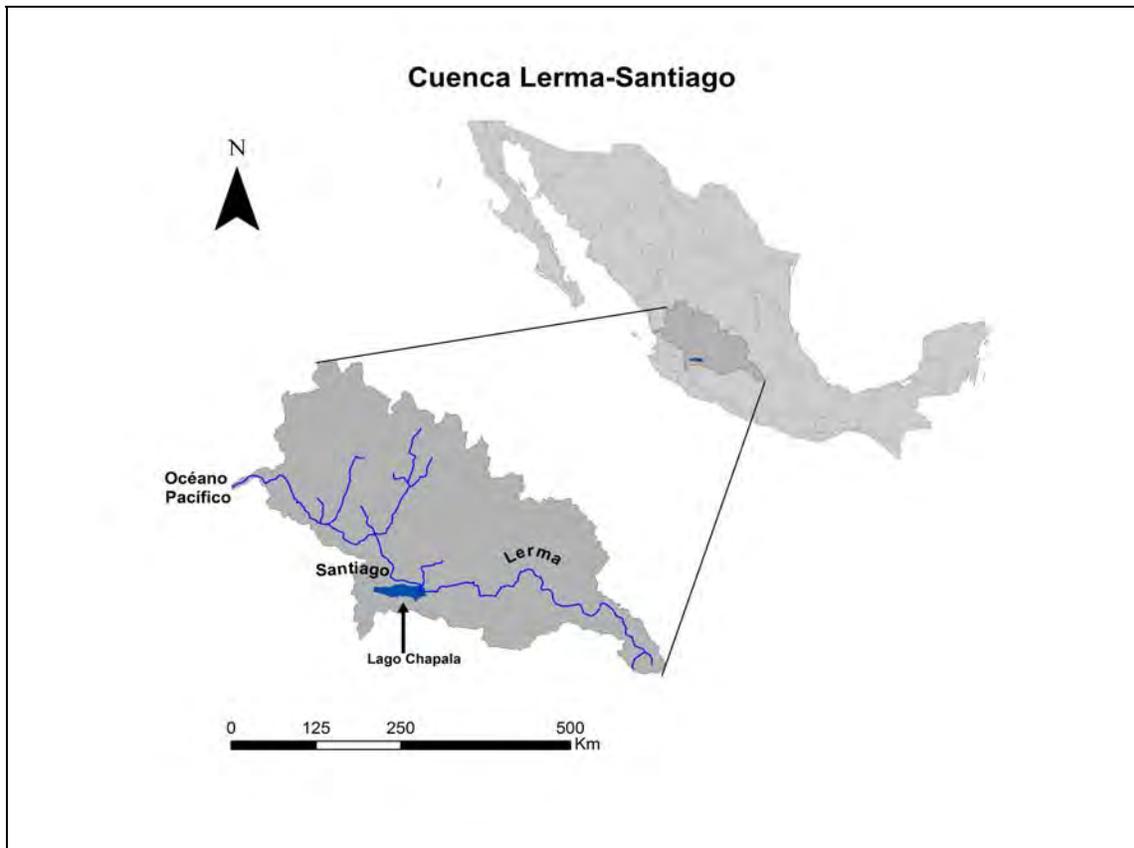
3. ÁREA DE ESTUDIO

La palabra Chapala significa “lugar de búcaros u ollas pequeñas” (náhuatl); “lugar muy mojado o empapado” (coca), o el “lugar de chapulines sobre el agua” (náhuatl). Representa el vaso regulador de agua dulce más grande de la República Mexicana, y se encuentra dentro de la cuenca Lerma-Santiago, de gran importancia por su desarrollo industrial, agrícola y urbano.

El Lago de Chapala es considerado un lugar Ramsar (se refiere a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitats de aves acuáticas) (<http://ramsar.conanp.gob.mx/sitios.php>) a partir del 2 de febrero de 2009. Este acuerdo internacional es el único de los modernos convenios en materia de medio ambiente que se centra en los humedales como un ecosistema específico, y aunque en origen su principal objetivo estaba orientado a la conservación y uso racional en relación a las aves acuáticas, actualmente reconoce la importancia de estos ecosistemas como fundamentales en la conservación global y el uso sostenible de la biodiversidad, con importantes funciones (regulación de la fase continental del ciclo hidrológico, recarga de acuíferos, estabilización del clima local), valores (recursos biológicos, pesquerías, suministro de agua) y atributos (refugio de diversidad biológica, patrimonio cultural, usos tradicionales). Por lo anteriormente expuesto es preciso brindar protección al Lago de Chapala, en donde se destaquen procesos de saneamiento.

3.1. Ubicación geográfica del lago de Chapala

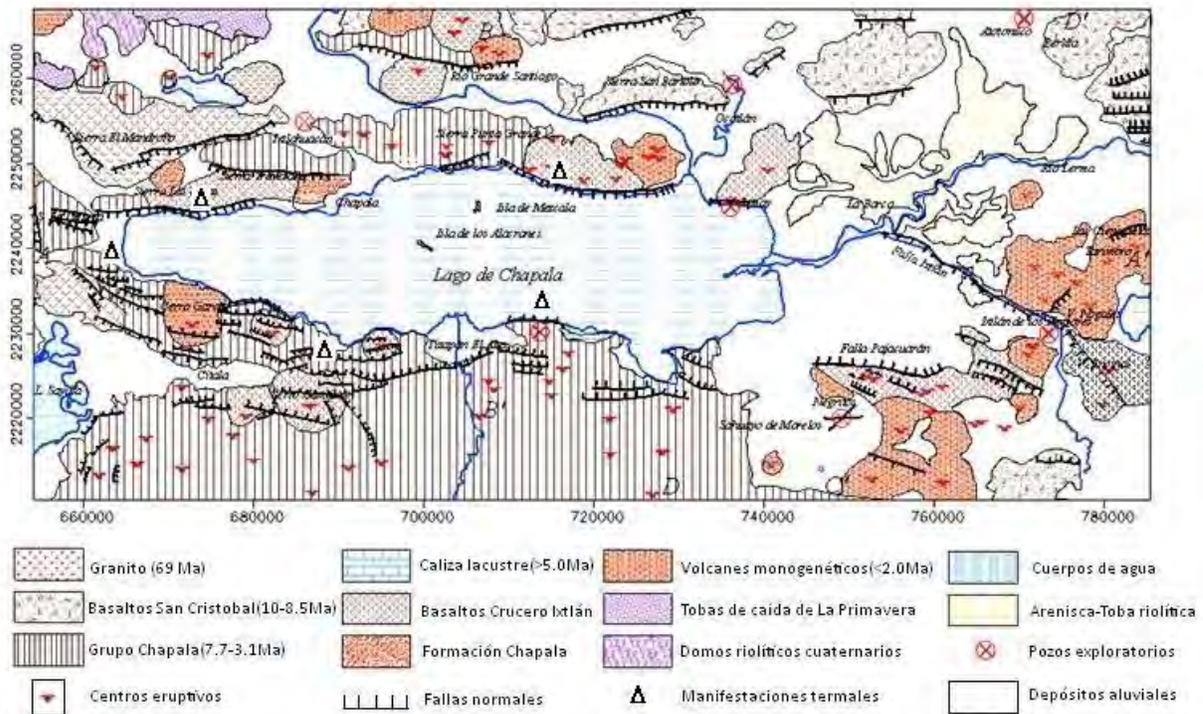
El Lago de Chapala se ubica en el borde occidental del Eje Neovolcánico Transmexicano, en territorio de los estados de Michoacán y Jalisco, entre las coordenadas 102°42'00"–103°25'30" O, y 20°6'08"–20°18'08" N. El lago de Chapala se encuentra en una altitud aproximada de 1520 m snm.



3Figura 3.1. Mapa de la ubicación del Lago de Chapala dentro de la cuenca Lerma-Santiago en el centro-occidente del territorio mexicano.

3.2. Origen, morfología y características geológicas del Lago de Chapala

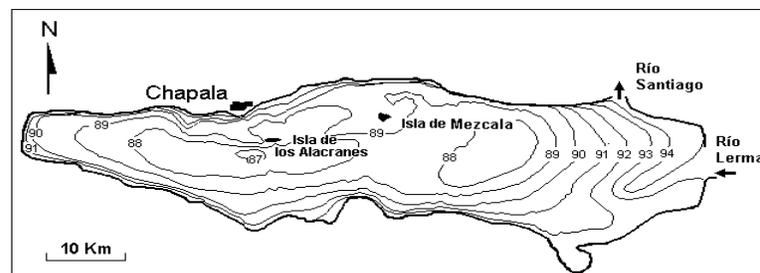
El Lago de Chapala tiene una forma aproximadamente rectangular y en su interior incluye varias fracturas orientadas de este a oeste, lo que permite considerar la posibilidad sobre el control de sedimentos que ejercería la actividad tectónica, además de generar una explicación de la actividad hidrotermal presente en la ribera del lago, en lugares como San Juan Cosala, Jocotepec e incluso la existencia de manantiales hidrotermales sublacustres. La geología del lugar se puede apreciar en la Fig. 3.2.



4Figura 3.2. Mapa geológico del Lago de Chapala (González-Morán, 2013).

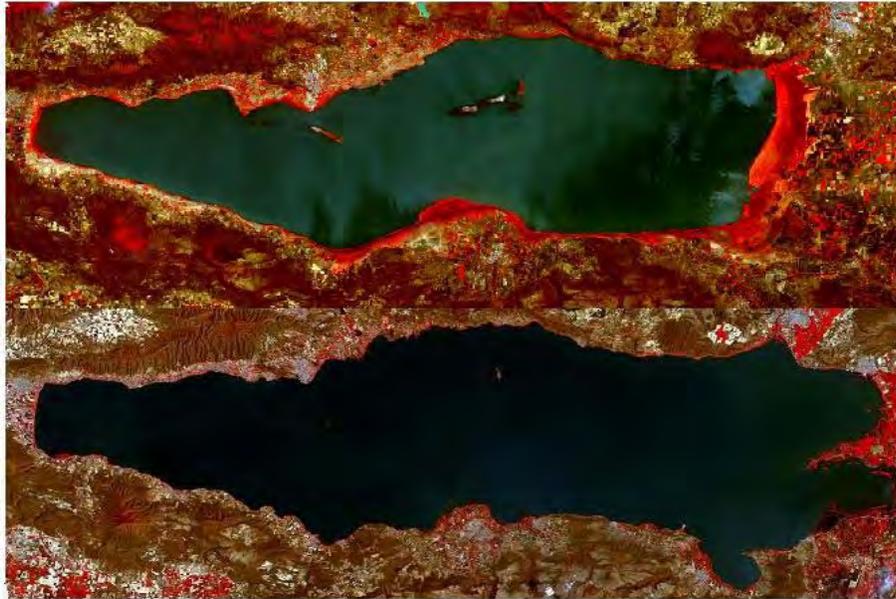
3.3. Variaciones del nivel de agua contenido en el Lago de Chapala

El estudio de la capacidad del lago está en función de su batimetría, y los niveles los han considerado en función de la cota 97.01, la cual corresponde con una altitud de 1530 msnm, y se a partir de ella, consideran la profundidad máxima en la cota 87, que corresponde a 10 m. La batimetría del sistema se muestra en la Figura 3.3.



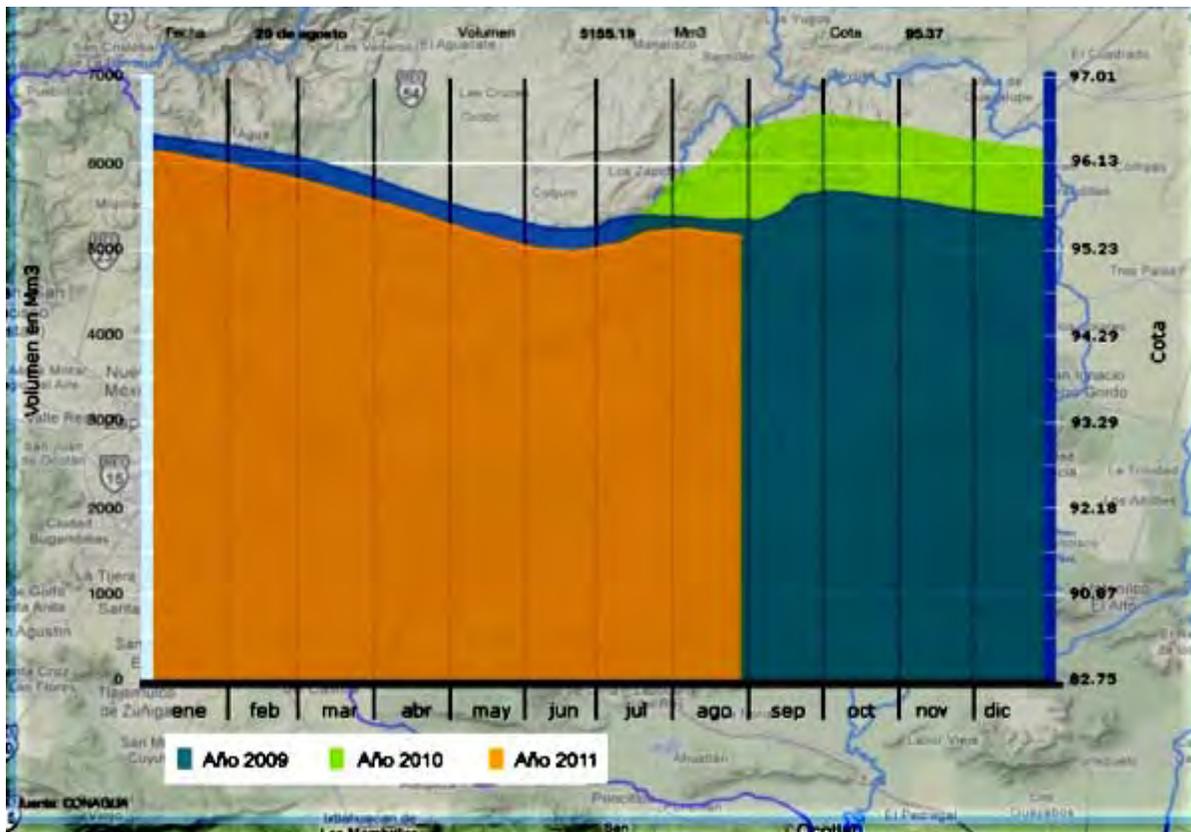
5Figura 3.3. Mapa batimétrico del Lago de Chapala en función de la cota correspondiente a la capacidad máxima del Lago de Chapala considerado en 97.01 (Filonov, 2001)

La cantidad de agua en el Lago de Chapala ha variado en el tiempo, debido al equilibrio entre precipitación, aporte por parte del Río Lerma, evaporación y extracción, generando ampliación y disminución de la superficie que cubre, como se puede observar en la Fig. 3.4.



6Figura 3.4. Imagen comparativa de las dimensiones superficiales del Lago de Chapala, donde se observa , en la imagen superior hay una disminución en el contenido de agua dentro del lago, en 2001 y en la imagen inferior correspondiente a 2011, se verifica la recuperación del lago (Modificado de http://www.sma.df.gob.mx/mhn/images/05notelo_pierdas/cambio/fotoslagochapala.jpg)

El lago de Chapala tiene un largo máximo aproximado de 72 km y un ancho medio aproximado de 13 km. Se estima una superficie de 1120 km² y una profundidad máxima de 10.5 m, con profundidad media de 4 m (Hansen y van Afferden, 2001), por tanto se estima una capacidad de 14000 Mm³, correspondiente a la cota establecida en 97.01, lo cual es corroborado en la Fig. 3.5, en donde se observa la variación de volumen contenido en los años del 2009 al 2011.



7Figura 3.5. Variación en la capacidad del Lago de Chapala revisada en 3 años distintos los 12 meses, mostrando la diferencia entre ellos (http://usai-chapala.org/?page_id=61).

En conclusión, el nivel del lago se ve disminuido en los meses de mayo, junio y julio; mostrando la misma tendencia en los 3 años de estudio, pero también muestra que depende de la cantidad de lluvia y temperatura alcanzada en el año.

3.4. Explotación del agua

El Lago de Chapala se encuentra en la región hidrológica que abarca 5 estados de la República Mexicana como se describe a continuación.

La Cuenca Lerma-Santiago empieza en Almoloya del Río (Estado de México) generando el conocido Río Lerma (Toluca), atravesando los estados de México, Michoacán, Querétaro, Guanajuato y Jalisco, en donde recorre más de 50 mil km y se han reportado múltiples sistemas para almacenar agua, entre bordos y presas (Cotler y Gutiérrez, 2005).

Anteriormente el Río Lerma se alimentaba de más de 50 manantiales que suministraban de agua al lago de Almoloya del Río. Las obras de exportación de agua de la Cuenca del Río Lerma para complementar el suministro de la dotación para la Ciudad de México resultaron en la construcción de pozos y un acueducto desde Almoloya del Río para el año de 1951. Estas obras, junto con la desaparición de los manantiales que alimentaban el lago de Almoloya del Río afectaron al ciclo hidrológico de la Cuenca del Lerma–Chapala y sólo vierten agua en épocas de lluvias.

En la historia del Lago de Chapala hay dos períodos importantes cuando se reportó un descenso de la capacidad del Lago de Chapala, los cuales fueron en 1955 (21% de su volumen y 58% de área) y en 2002 (25% de su volumen). Según la Comisión Estatal del Agua (CEA) de Jalisco, para el 18 de febrero del presente año, el lago está al 45 % con respecto a su capacidad de almacenaje que se reporta (4500 Mm³), el cual es menos que el reportado para ese mismo día para los años de 2012 y 2011, cuyos valores estaban aproximadamente en 58 y 75% respectivamente.

Es importante entender que el balance general de contenido está en función de los flujos generados por los ríos, más la extracción del líquido en el propio lugar y la evaporación propia del sistema.

Establecer el balance de agua ayuda a entender la presencia de metales y su biodisponibilidad, ya que permitirán la reconcentración o disolución de los elementos de acuerdo con el incremento o decremento del volumen de agua, además que los aportes repercutirán en las condiciones fisicoquímicas. Los posibles cambios en el nivel del lago pueden afectar a características como son el fetch (es la superficie mayor de interacción entre la superficie de un cuerpo acuático y el viento, en una dirección específica) y si se genera o no una estratificación (Hansen y Van Afferden, 2001).

3.5. Cuerpos de represa en la Cuenca Lerma-Chapala

De acuerdo a los registros realizados por el INEGI se tienen contabilizados cerca de 552 cuerpos de retención de agua entre presas y bordos, considerando que hay 1 por cada 90 km (Cotler-Gutiérrez 2005). Este dato es muy importante tanto para explicar las variaciones del nivel del lago, como para entender el comportamiento y características de los sedimentos, ya que esto implicaría que no llegue sedimento con tamaño de partícula grande, el cual suele ser el primero que se deposita y por lo tanto tiende a quedarse en las presas e impedir que lleguen al lago; sin embargo, por cuestiones de radio hidráulico los minerales pesados suelen tener tamaño de partícula muy fino y es más fácil que sigan su trayecto a través del flujo del agua, siempre y cuando el flujo sea energético, así el incremento de carga que se genera con la época de lluvias debe aumentar la cantidad de minerales pesados y generar un sedimento diferente al de la época de secas

3.6. Sedimentación en el Lago de Chapala

El Lago de Chapala sirve como punto de captación de drenaje de lugares como son: Chapala, Tizapán el Alto, Jamay y Jocotepec (De Anda y Shear, 2000).

En el Lago de Chapala desemboca el Río Lerma, que se une previo a desembocar en el Lago con el río Duero, además del Río Pasión, siendo el primero su principal aporte. De igual forma existe la presencia de manantiales sublacustres (Zárata *et al.*, 2005) y múltiples fallas normales con orientaciones Este-Oeste.

Por lo que para lograr una comprensión de las características físicas y químicas de los sedimentos presentes en el Lago de Chapala es preciso analizar los resultados de estudios previos sobre la litología del lago en sí, además de considerar los estudios previos relacionados con la mineralogía de las posibles fuentes de sedimento para la región.

El sistema dinámico del Lago de Chapala (Filonov *et al.*, 2001) muestra que existe mezcla en casi todo el lago, apreciando un giro anticiclónico en la zona noreste del lago (Hansen *et al.*, 2001); además, de la poca profundidad ($Z_{\max}=10$ m) reportada

del lago (Trujillo-Cárdenas *et al.*, 2010), así como la presencia de fuertes vientos en la región, generan que el Lago de Chapala sea considerado como un lago polimíctico con rara estratificación, y suele presentar una variación de nivel de aproximadamente 1.2 m entre la época de lluvias y la de secas (Rosales *et al.*, 2000).

Para el estudio de los sedimentos es preciso considerar las variables granulométricas, físicas y químicas.

3.7. Origen de sedimento

El principal aporte de sedimentos en el Lago de Chapala es de origen terrígeno transportado por el Río Lerma y en menor cantidad por el Río Pasión. Además de considerar al sedimento generado por el propio sitio debido a los procesos de erosión e intemperismo.

En la secuencia de sedimentos del lago se encuentran conglomerados, areniscas, limolitas, y arcillas (Zárate, 2001). Alrededor del lago se reportan fallas normales y la presencia de algunos domos volcánicos, explicando la presencia de plagioclasas, feldespatos y cuarzo. Otra característica muy importante es que existen depósitos calcáreos tipo sínter (Zárate, 2001).

3.8. Cuerpos hidrotermales (sistema de manantiales sublacustres Los Gorgos) y manifestaciones de hidrocarburos

En el Lago de Chapala hay manantiales hidrotermales sublacustres, conocidos como los Gorgos, los cuales se cree dieron origen a dos isletas (aparentemente formadas de petróleo hidrotermal, de acuerdo con los análisis realizados), las cuales fueron visibles en la época que el lago vio reducido su nivel. Éstas son conocidas también como chapopoteras y nombradas “Los Negritos” y “la Columba”. En lugares próximos al Lago de Chapala existe actividad geotérmica, resultando en la presencia de sistemas hidrotermales, en San Juan Cosalá, San Luis Agua Caliente, al noroeste de Jocotepec y al sur de Tuxcueca y Tizapán el Alto. Mientras que en San Juan Cosalá es del tipo sulfatado con temperaturas que van de 64 a 83°C, en los otros puntos son del tipo carbonatados y las temperaturas van de los 30 a 69°C (Zárate, 2001). La

actividad hidrotermal puede incrementar la presencia de elementos como son As, Ba, Mn, Fe, S y carbono orgánico.

3.9. Actividades económicas en la cuenca Lerma-Chapala

A lo largo del Río Lerma se desarrollan infinidad de actividades económicas entre las que destacan agricultura (granos, hortalizas, forrajes y ornamentales), acuicultura, ganadería (ovino, porcino y bovino principalmente), minería, industria (textil, madera, papel, química, metálica básica, procesadoras de alimentos y tabaco) (INEGI, 2009).

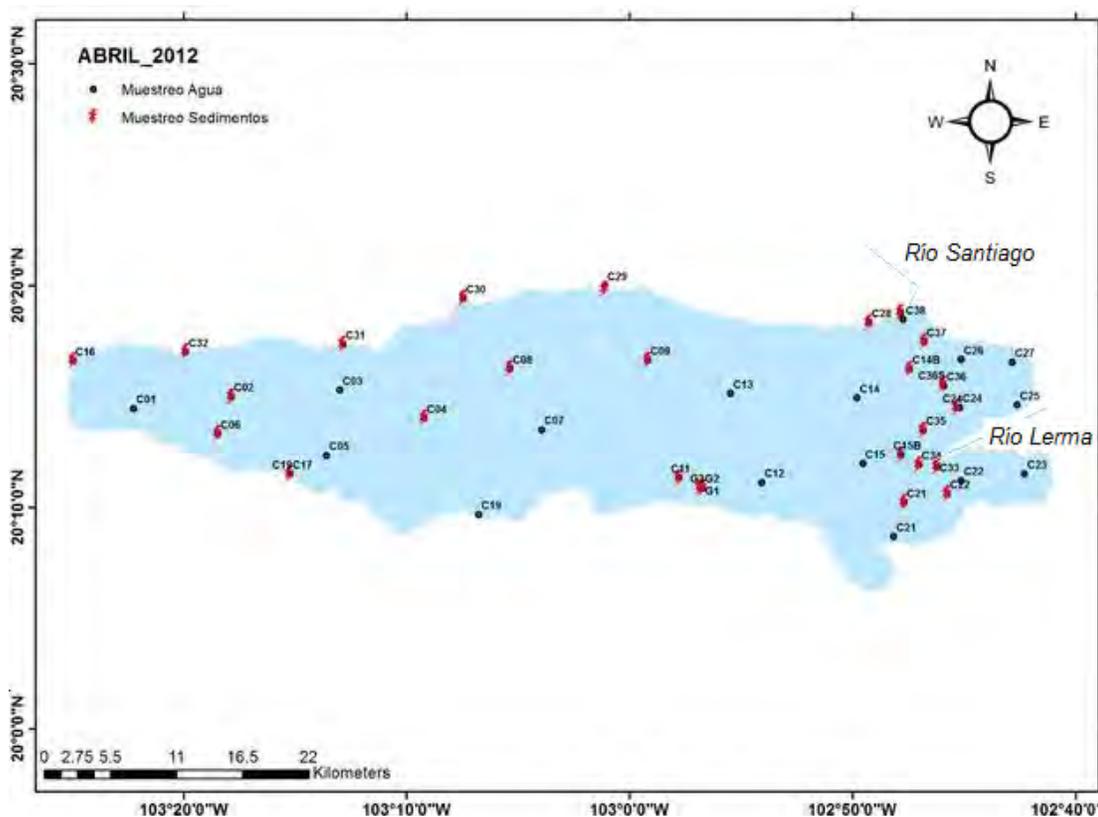
3.10. Sedimentación en el Lago de Chapala

Se estima que la capa de sedimentos en el Lago de Chapala tiene un grosor superior a 500 m, aunque la tasa de sedimentación (ts) en el lago actualmente varía de la siguiente forma: en el sector occidental, la ts varía entre 1 y 2 mm año⁻¹; para los sectores central y oriental, la ts es >2.4–2.5 mm año⁻¹ y <3.5 mm año⁻¹, respectivamente, y en el extremo oriental, donde se distribuye el delta del Río Lerma, la ts es >3.5 mm año⁻¹ (Zárate y Simoneit, 2005).

Entonces se puede considerar que el mayor azolve se está generando en el delta del Río Lerma, lo cual que puede repercutir en la disminución de la capacidad del lago.

4. METODOLOGÍA

El muestreo diseñado para los objetivos del presente estudio fue de forma aleatoria estratificada, de tal forma que se pudiera tener un panorama general de la distribución de metales en sedimento para todo el Lago de Chapala. En la entrada al Lago de Chapala (Río Lerma) y a la salida (Río Santiago) se concentraron más sitios de muestreo. Para el muestreo se procedió a ubicar las estaciones de acuerdo al siguiente mapa:



8Figura 4.1. Mapa del Lago de Chapala con los puntos de muestreo indicando los puntos donde se pudo tomar muestra de sedimento. También se indica los sitios de interacción con el Río Lerma y el Río Santiago.

4.1. Trabajo de campo

En el lago se colectó muestra de agua de fondo con ayuda de una botella muestreadora tipo Van Dorn para medir los parámetros fisicoquímicos utilizando un multiparámetro de marca OAKTON Waterproof pH/conductivity/TDS/°C/°F Meter CON 300 series. Con este equipo se registró el pH, conductividad y la temperatura.

Previamente a las mediciones, se realizó una verificación del multiparámetro utilizando una solución estándar de cloruro de potasio 0.01N, así como las disoluciones amortiguadoras de pH 4 y 7 (marca HACH) y la disolución amortiguadora de pH=10 marca “La Motte”.



9Figura 4.2. Imagen de la toma de muestra de agua profunda empleando una Botella Van Dorn.

Tabla 4.1 Resultados de la verificación del funcionamiento del multiparámetro y electrodos de conductividad y pH utilizando cloruro de potasio 0.01 M y estándares de HACH, para pH de 4 y 7, “La Motte” para pH de 10.

Parámetro	Valor reportado en el estándar (T=25°C)	Valor medido en el laboratorio (T=22°C)
pH	4.01 ± 0.01	4.00
	7.00 ± 0.02	7.01
	10	10.01
Conductividad (µS/cm)	1413	1410

Después se procedió a recolectar el sedimento utilizando una draga tipo van Veen (Fig. 4.3). La muestra de sedimento se tomó de la parte que no estuvo en contacto directo con la draga, a modo de evitar una posible contaminación de las muestras. Para esto, se empleó una pala de plástico previamente lavada con ácido (el lavado consistió en lavar con jabón libre de fosfatos, para luego ser colocada en ácido nítrico al 30% y finalmente ser enjuagada con agua desionizada). Se recolectó una muestra de 300 g aproximadamente. La masa colectada varió ya que las características del sedimento son diferentes; en algunos puntos el sedimento se encontró compactado dificultando la toma, mientras que en otros es muy fácil su obtención. La muestra de sedimento fue almacenada en bolsas de plástico nuevas, a una temperatura cercana a 5°C para evitar alteración alguna en las mismas.



10Figura 4.3. Imagen de la draga tipo Van Veen utilizada para colectar la muestra de sedimento.

4.2. Trabajo de laboratorio

Para el procesamiento de las muestras de sedimento superficial fue preciso ponerlas a secar por 48 h a una temperatura de 50°C en una estufa, a modo de no afectar las muestras para las determinaciones posteriores. Una vez que fueron secadas las muestras se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

a) Granulometría

El análisis granulométrico, sirve para determinar el tamaño y características del sedimento como son la media, desviación estándar, simetría, y la curtosis, descriptores esenciales de un sedimento.

El análisis granulométrico fue realizado en los laboratorios de Sedimentología Volcánica A y B, del departamento de Vulcanología del Instituto de Geofísica de la UNAM. Para lo cual se ocuparon materiales como son un Rot-ap, una balanza analítica, una serie de tamices que varían su tamaño de 1Φ , empezando en -6 hasta llegar a una medida de 4Φ . Para partículas de mayor phi, el análisis se realizó a través de un analizador de rayos láser.

Procedimiento:

- 1) Se realizó el cuarteo de la muestra, tomando aproximadamente el 50% de la muestra, se pesó utilizando una balanza analítica e inmediatamente fue colocada en la serie de tamices, los cuales llevaban una secuencia de -6 a 4Φ .
- 2) Se colocó la serie de tamices en el Rot-ap, que fue programado para tamizar la muestra durante 15 minutos.
- 3) Una vez terminado el tamizado, se pesaron cada una de las fracciones, y se registraron los datos.
- 4) Se determinaron los porcentajes de cada fracción para graficar y evaluar los parámetros descriptores de acuerdo a las ecuaciones de Folk (2002), los cuales se describen a continuación.

a) **Media:** Corresponde al promedio gráfico y se determina con la Ec. 4.1:

$$Mz = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3}$$

Ec. 4.1

En donde:

Mz= media

$\phi 16$ = Percentil 16 obtenido de la gráfica

$\phi 50$ = Percentil 50 obtenido de la gráfica

$\phi 84$ = Percentil 84 obtenido de la gráfica

d) **Clasificación:** Se refiere a la variedad de tamaños que puede presentar el sedimento, y depende del tipo de transporte y la energía del medio sedimentario. Se determina por el método gráfico descrito por Folk (2002), del grado de clasificación es calculado conforme la Ec. 4.2, que de acuerdo con los valores obtenidos se hace referencia a la desviación estándar y con base en ella, se puede apreciar la clasificación, la cual recibirá el nombre conforme se indica en la tabla 4.2.

$$\sigma_1 = \frac{\Phi 84 - \Phi 16}{4} + \frac{\Phi 95 - \Phi 5}{6.6}$$

Ec. 4.2

En donde:

σ_1 = Desviación estándar

$\Phi 5$ = Percentil 5 obtenido de la gráfica

$\Phi 16$ = Percentil 16 obtenido de la gráfica

$\Phi 84$ = Percentil 84 obtenido de la gráfica

$\Phi 95$ = Percentil 95 obtenido de la gráfica

Tabla 4.3. Valores determinados para determinar la clasificación del sedimento con base en la determinación gráfica de la desviación estándar.

Rango de valores (Φ)	Término empleado
$(-\infty, 0.35)$	Muy bien clasificado
$(0.35, 0.50)$	Bien clasificado
$(0.50, 0.71)$	Moderadamente bien clasificado
$(0.71, 1.00)$	Moderadamente clasificado
$(1.00, 2.00)$	Mal clasificado
$(2.00, 4.00)$	Muy mal clasificado
$(4.00, \infty)$	Extremadamente mal clasificado

e) **Curtosis:** Al realizar un gráfico de distribución del tamaño de grano se puede determinar el tipo de tamaño de grano predominante en una muestra. En base a la curtosis se puede determinar el tipo de distribución de la muestra, ya que se va a clasificar en leptocúrtica (unimodal), mesocúrtica (bimodal) y platicúrtica (multimodal). Puede determinarse por el método gráfico propuesto por Folk (2002), donde a través de la Ec. 4.3 se determinan cuántos tamaños de partícula predominan en la muestra y la interpretación corresponde con la tabla 4.4.

$$K_G = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$$

Ec. 4.3

En donde:

K_G = Curtosis

Φ_5 = Percentil 5 obtenido de la gráfica

Φ_{25} = Percentil 25 obtenido de la gráfica

Φ_{75} = Percentil 75 obtenido de la gráfica

Φ_{95} = Percentil 95 obtenido de la gráfica

Tabla 4.4. Términos que son empleados para describir la curtosis (Folk, 2002)

Valores	Término empleado
<0.67	Muy platicúrtico
[0.67,0.90)	Platicúrtico
[0.90,1.11)	Mesocúrtico
[1.11,1.50)	Leptocúrtico
[1.50,3.00)	Muy leptocúrtico
≥3.00	Extremadamente leptocúrtico

4.2.2 Caracterización mineralógica por la difracción de rayos X

El análisis de difracción de rayos X (DRX) se realizó en el laboratorio de rayos X del Instituto de Geología de la UNAM, con un difractómetro SHIMADZU XRD-6000 equipado con tubo de cobre (1.54060 Å) y monocromador.

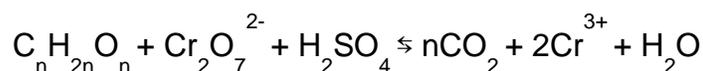
Para el análisis general de difracción es molturada la muestra, para después ser acomodada en la cámara y realizar la incidencia de los rayos X, a modo de encontrar las distancias interatómicas e interlaminares, que son propias para cada mineral, y con la ayuda de se interpretó y nombró el tipo de minerales.

El análisis mineralógico de arcillas requiere de un tratamiento especial, ya que las señales que generan en DRX, aparecen en ángulos $2\theta < 40^\circ$. Por lo que para lograr su interpretación e identificar las arcillas presentes, se requiere correr las muestras en diferentes condiciones. A) Normal, B) Realizar una glicolación (muestra si la arcilla es expandible (esmectitas) o no (ilita, clorita) incrementando las distancias interlaminares. C) Calentamiento a 450°C ; lo cual, puede generar que las señales colapsen, debido a una disminución o eliminación de la distancia interlaminar.

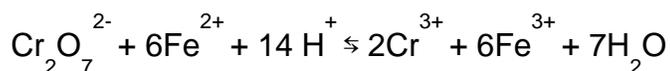
4.2.3.Determinación de materia orgánica

La determinación de carbono orgánico se realizó en el Laboratorio 3-D de la Facultad de Química.

El contenido de carbono orgánico fue determinado por el método de Walkey-Black (1947), adoptado y modificado por Jackson (1958). El método se basa en la oxidación del carbono en medio húmedo con un exceso de dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado:



El exceso de dicromato de potasio usado en la oxidación de la materia orgánica es determinado por titulación con una solución de sulfato ferroso:



Procedimiento (Walkley, 1947; Gaudette y Flight, 1974):

- 1) Se pesaron 0.5 g de sedimento seco y molido (la cantidad de muestra está en función del contenido de materia orgánica, se coloca 1.0 g de sedimento en muestras que tienen menos de 1.0 % de materia orgánica).
- 2) Se colocó la muestra de sedimento en un matraz Erlenmeyer de 500 mL y se adicionaron 10 mL de una disolución de dicromato de potasio 1N (medidos con pipeta volumétrica) y se mezcló.
- 3) Se agregaron 20 mL de ácido sulfúrico concentrado y se mezcló durante 1 minuto (es importante que al mezclar los reactivos con el sedimento, éste no quede pegado a las paredes del recipiente ya que no reacciona con los reactivos).
- 4) Se dejó la muestra por 30 minutos y fue diluida con agua destilada, hasta obtener un volumen de 200 mL.
- 5) Se adicionaron 10 mL de ácido fosfórico al 85 %, 0.2 g de fluoruro de sodio (evita interferencias generadas por la presencia de Fe^{+2}) y 15 gotas del indicador difenilamina.
- 6) Se tituló con una disolución de sulfato ferroso 1.0 N. El color vira de café verdoso-verde-azul oscuro y en el punto de equivalencia pasa a un verde brillante.

7.- Se corrió un blanco de referencia exactamente igual, pero sin sedimento.

8.- Se realizó la estandarización del método con glucosa a concentración conocida.

La determinación se llevó a cabo mediante la ecuación:

$$\%C \text{ orgánico} = \frac{(10)(1.0N)(0.003)(100)}{W} \{1-V/S\}$$

Ec [4.4]

En donde:

V= volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación de la muestra (mL).

S= volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación del blanco (mL).

0.003= 12/4000 = peso meq del carbono.

1.0 N = concentración de la solución de dicromato de potasio (eq/L).

10= alícuota de la solución de dicromato de potasio (mL)

W= masa de la muestra (g)

La estandarización del método se llevó a cabo con la valoración de una muestra 10 veces para determinar la precisión y la exactitud se realizó con la titulación de 10mg de glucosa, la cual contiene el 40% de carbono orgánico y se repitió 10 veces.

Precisión

Valor promedio: 1.3%

Desviación estándar: 0.01%

Coefficiente de variación: 0.01

Exactitud

Valor obtenido: 40.36%

Valor esperado: 40%

Error relativo: 0.01

Intervalo de confianza (95%): 0.17

4.2.4. Determinación de la pérdida por calcinación

Para tener completo el análisis de sedimento y poder hacer el ajuste al presentar los resultados de los elementos mayores, se determinó la pérdida por calcinación que comprende: carbonatos, materia orgánica y agua de hidratación (Vogel, 1969). El análisis se llevó a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X Laboratorio Universitario de Geoquímica e Isótopos (LUGIS) del Instituto de Geología de la UNAM.

Procedimiento:

- 1) Se pesó 1.0 g de muestra.
- 2) Se transfirió la muestra a un crisol previamente tarado.
- 3) El crisol fue introducido a una mufla durante una hora con una temperatura de 950°C.
- 4) El crisol fue extraído de la mufla y se permitió el enfriamiento en un desecador.
- 5) Una vez a temperatura ambiente se pesó el crisol con residuo a temperatura ambiente.

La cuantificación se llevó a cabo con la fórmula:

$$\% \text{ Pérdida por calcinación} = \frac{(P_2 - P_1) * 100}{M}$$

Ec [4.5]

En donde:

P₁: masa del crisol con muestra antes de calcinar (g).

P₂: masa del crisol con muestra calcinada (g).

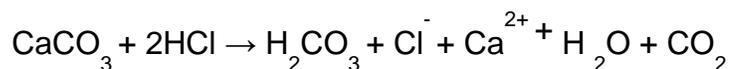
M: masa inicial de la muestra (g).

4.2.5. Determinación de carbonatos

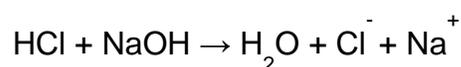
Esta parte de análisis se llevó a cabo en el laboratorio 3-D de la Facultad de Química.

El contenido de carbonatos es un componente importante en el sedimento.

La técnica para la determinación de carbonato de calcio en sedimento se basa en el principio de una titulación por retroceso (Harris, 2003), donde a la muestra de sedimento carbonatado se le agrega un cierto volumen en exceso de ácido clorhídrico.



Y el ácido clorhídrico, que no reaccionó con los carbonatos, se titula con una disolución de hidróxido de sodio (Flashka, 1975; Schenk, 1984):



Procedimiento:

Se debe tener una idea de la presencia o ausencia de carbonatos en la muestra. Si es positiva la existencia de carbonatos, se puede planear el peso de la muestra que se debe tomar para su determinación de acuerdo con la Tabla 4.2

Tabla 4.5. Relación entre la pérdida por calcinación y la cantidad de muestra para determinar la cantidad de carbonatos.

<i>Pérdida por calcinación</i>	<i>Peso de muestra</i>
< 10%	2.00 g
10% a 20%	1.00 g
20% a 40%	0.50 g
>40%	0.25 g

- 1) Las muestras fueron pesadas por duplicado.
- 2) Se agregaron 50 mL de ácido clorhídrico 0.1 M (previamente normalizado con biftalato de potasio como patrón primario) y se calentó a ebullición. Se permitió el enfriamiento, para de esta forma eliminar el dióxido de carbono.
- 3) Se tituló con disolución de hidróxido de sodio 0.3 M (previamente normalizado con carbonato de sodio como patrón primario), utilizando como indicador azul de bromotimol cuyo pH de vire es de 6.0 -7.6 y la solución cambia de amarillo a azul, lo cual indica que se ha llegado al punto final.

La determinación cuantitativa se lleva a cabo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Vol HCl}_{\text{exceso}} = \frac{V_{\text{NaOH}}([\text{NaOH}])(1 \text{ mol HCl})(1000\text{mL})}{(1000 \text{ mL})(1 \text{ mol NaOH})([\text{HCl}])}$$

Ec. 4.6

$$\text{mL HCl}_{\text{CO}_3} = V_{\text{HCl}_{\text{tot}}} - \text{Vol HCl}_{\text{exceso}}$$

Ec. 4.7

$$\text{g de CaCO}_3 = \frac{(\text{mL HCl}_{\text{CO}_3})([\text{HCl}])(1 \text{ mol de CO}_3^{-2})(100\text{g de CaCO}_3)}{(1000 \text{ mL})(2 \text{ mol HCl})(1 \text{ mol de CaCO}_3)}$$

Ec. 4.8

$$\% \text{ CaCO}_3 = \frac{\text{g CaCO}_3(100)}{M}$$

Ec. 4.9

En donde:

Vol HCl_{exceso}=volumen en mL de HCl, que se quedó después de la reacción

V_{NaOH}=volumen en mL de NaOH que neutraliza el HCl en exceso.

[NaOH]= concentración molar del NaOH normalizado.

[HCl]=concentración de HCl normalizado

mL HCl_{carb}=volumen de HCl que reaccionó con el carbonato

V_{HCl_{tot}}=volumen total adicionado de HCl a la muestra.

% CaCO₃=porcentaje de carbonato presente en la muestra

M= Masa tomada de la muestra.

Precisión: La precisión se evaluó mediante la determinación de carbonatos en una muestra 5 veces y la exactitud se realizó titulando el carbonato de calcio puro.

Valor promedio: 7.97%

Desviación estándar: $\pm 0.03\%$

Coefficiente de variación: 0.39.

Exactitud

Valor promedio: 95.46%

Valor reportado: 99%

Error relativo: -4.53

Intervalo de confianza (95%): 0.55

4.2.5. Determinación de los elementos mayores

La determinación de elementos mayores se llevó a cabo en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM. Las muestras fueron molidas hasta pasar por malla 200, el análisis se realizó en base seca y se midieron en el programa CONTROL.M.QAN.

La fluorescencia de rayos X (FRX) es uno de los métodos con mayor aplicación para la identificación cualitativa y cuantitativa de los elementos que tienen números atómicos mayores que el oxígeno (>8). Los rayos X se definen como una radiación electromagnética de longitud de onda corta (0.1-25 Å para la espectroscopía de rayos X) producida por la desaceleración de electrones de elevada energía o por transiciones electrónicas que implican electrones de los orbitales internos de los átomos (Skoog, 1994).

El principio fundamental indica que cuando se crea una vacante en una capa electrónica, será llenada por otro electrón y se emitirá un fotón. Si el electrón pertenece a las capas internas, una de las capas externas ocupará la vacante y el fotón emitido será un rayo X (Skoog, 1994).

Se siguió el procedimiento descrito por Lozano y Bernal (2005), el cual consiste en elaborar a alta temperatura perlas conformadas por la muestra y ácido bórico, para después ser introducidos al equipo de fluorescencia y ser interpretados por el programa CONTROL.M.QAN, en el cual se tienen diferentes curvas de calibración, tanto para elementos mayores, como para elementos traza. Con las diferentes

curvas de calibración se realiza una traspelación de las señales emitidas por el equipo y se determina la concentración en partes por millón (ppm) de los elementos presentes en la muestra, para el caso de los traza y se realiza un balance en porcentaje para elementos mayores.

En el análisis por FRX, los límites de detección para elementos mayores se muestran en la tabla 4.6 y los valores correspondientes para elementos traza en la tabla 4.4.

Tabla 4.6. El límite de detección de elementos mayores para FRX

Compuesto	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
% peso	0.05	0.004	0.018	0.006	0.004	0.015	0.04	0.03	0.05	0.004
mg kg ⁻¹	500	40	180	60	40	150	400	300	500	40

Tabla 4.7. El límite de detección de elementos traza para FRX

Elemento	Ba	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
mg kg ⁻¹	11	2	3	0.5	0.7	1.5	4

4.2.7. Extracción secuencial de los metales de los sedimentos

Para realizar la extracción secuencial fueron seleccionadas 2 estaciones de cada región determinada después de realizar el análisis estadístico de asociación, en función de las características químicas, para obtener información representativa.

Las estaciones elegidas fueron: 6, 8, 15, 24, 28, 31, 32, 1G que involucran a todas las regiones. Y como estándar de comparación se empleó el PACS-2, a pesar de ser sedimento marino, se decidió emplear por la similitud de los resultados obtenidos para elementos traza en los análisis de FRX, además que el estándar sólo es funcional como referencia y para verificar el proceso realizado.

Para el estudio de la biodisponibilidad de los elementos traza en el presente trabajo, se realizó el procedimiento de extracción secuencial (Tessier *et al.*, 1979) modificado, para posteriormente determinar la concentración total de los elementos químicos mediante el análisis de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP/OES por sus siglas en inglés). El proceso de extracción se realizó en el laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la UNAM.

La extracción secuencial corresponde a identificar en que parte del sedimento se encuentran asociados los metales pesados y se permite una comprensión de la ubicación de los metales de acuerdo a la fracción en la que se encuentre (intercambiable, asociada a carbonatos, a oxihidróxidos de hierro y óxidos de manganeso, asociada a materia orgánica y sulfuros y la residual o litogénica). El método a seguir estuvo basado en el propuesto por Tessier *et al.*(1979).

Fracción 1 (Intercambiable).

- 1) Se pesó 2.0 g de sedimento seco y molido.
- 2) Se adicionaron 16 mL de $MgCl_2$ a pH igual a 7.
- 3) Se agitó durante 1 h a temperatura ambiente.
- 4) Fue centrifugada por 10 minutos.
- 5) Se decantó el sobrenadante y filtró con papel Whatman del número 4, para después aforar a 50 mL y guardar a baja temperatura en un frasco de polietileno para su posterior análisis.

Fracción 2 (Carbonatos).

- 1) Se adicionaron 16 mL de buffer acetato de sodio-ácido acético 1M a pH=5 al sólido sobrante de la primera fracción.
- 2) Se agitó durante 5 h a temperatura ambiente.
- 3) Después se centrifugó durante 10 minutos.
- 4) Se decantó el sobrenadante, y filtró con papel Whatman del número 4, se aforó a 50 mL y se almacenó en un recipiente de polietileno en refrigerador, hasta ser analizado.

Fracción 3 (Oxi-hidróxidos de Fe y Mn con los elementos asociados).

- 1) Fueron adicionados en el sólido sobrante de la fracción anterior 40 mL de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (0.04M)/ CH_3COOH 25% (v/v) a pH=2
- 2) Se agitó por un tiempo de 5hr con $T=96^\circ\text{C}$.
- 3) Se permitió el enfriamiento a temperatura ambiente y se procedió a centrifugar por 10 minutos.
- 4) Se decantó el sobrenadante, y filtró con papel Whatman del número 4, para después aforar a 50 mL y guardar en frasco de polietileno a baja temperatura hasta su análisis.

Fracción 4 (Materia orgánica y sulfuros).

- 1) Al sólido de la sobrante de la fracción anterior se le incorporaron 6mL de HNO_3 0.02 M.
- 2) Después se le adicionaron 16 mL de H_2O_2 al 30%.
- 3) Se le agregaron 16 mL de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1 M en HNO_3 al 6% v/v
- 4) La mezcla requirió de agitación durante 5 h con $t^\circ=85^\circ\text{C}$.
- 5) Se centrifugó durante 10 minutos.
- 6) Se procedió a decantar el sobrenadante, y filtrar con papel Whatman del número 4, aforar a 50 mL y guardar hasta análisis posterior en frasco de polietileno y baja temperatura.

Fracción 5 (Litogénica).

- 1) El sólido fue transferido a un vaso de teflón, y se agregaron 20mL de agua regia (3:1, $\text{HCl}:\text{HNO}_3$).
- 2) Cerrar perfectamente y comenzar la digestión en el horno de microondas Mars en un programa que lleva 15 minutos para llevar las muestras a una temperatura de 180°C , hasta llegar a rampa donde permanece 15 minutos.
- 3) Se permite el enfriamiento de las muestras, para proceder al filtrado, con la ayuda de papel filtro Whatman del número 4 y embudo de filtración rápida.
- 4) Aforar a 50 mL.

5) Guardar hasta análisis posterior, en frasco de polietileno y baja temperatura.

4.2.8. Digestión total de la muestra

Para tener un seguimiento correcto de la extracción secuencial se realizó también la digestión total de la muestra. Dicho procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la UNAM y se procedió con la misma técnica que en la extracción de la fase litogénica, salvo que sólo se empleó 1 g de muestra.

4.2.9. Cuantificación de la concentración total y en los diferentes extractos de los metales pesados

La concentración de los elementos se determinó mediante la técnica analítica de ICP/óptico. Esta técnica consiste en someter al analito, a muy alta temperatura, generando que éste sea volatilizado junto con el flujo de un gas, (argón) bajo la acción de un campo magnético inducido por una corriente de alta frecuencia. El ICP es una fuente de iones, donde cada elemento emite un haz luminoso de diferente energía e intensidad dependiente de la concentración presente. Lo cual permite identificar el elemento y con la ayuda de respectivas curvas de calibración se puede cuantificar su concentración. Por las altas temperaturas del plasma suelen minimizarse las interferencias matriciales, además el empleo del Ar garantiza que se pueden obtener resultados confiables, por su alta pureza y por crear una atmósfera inerte (Raij *et al.*, 2001).

El sistema de introducción de la muestra es la nebulización neumática, donde la muestra líquida interacciona con una corriente de gas en un nebulizador generándose un aerosol que pasa a través de una cámara de spray en donde las gotas grandes son eliminadas y las pequeñas son conducidas al plasma (Sande Fouz, 2002).

La exactitud para y el límite de detección se determinó utilizando disoluciones de concentraciones conocidas en las diferentes matrices para cada elemento y se indica el límite de detección para cada elemento en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Valores de los límites de detección instrumental para cada elemento.

Elemento	Ba	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	mg/L							
LD	0.003	0.122	0.003	0.010	0.007	0.010	0.030	0.007

L.D., Límite de detección

Para corroborar los resultados y determinar la eficiencia de la técnica de extracción secuencial se determinó un porcentaje de recobro, acorde con la ec. 4.A, el cual establece una relación entre la concentración obtenida para cada elemento y la reportada por el estándar PACS-2. ,

$$\% \text{ Recobro} = \Sigma f_i * 100 / f_t$$

Ec. 4.A

En donde:

Σf_i = suma de la concentración de un elemento determinado en las 5 fracciones de la extracción secuencial.

f_t =concentración reportada para cada elemento presente en el estándar PACS-2.

Tabla 4.8. Estandarización para le técnica de extracción secuencial, donde se aprecia los valores en porcentaje de recobro para cada elemento.

Elemento	Ba	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
% Recobro	85.3±5.7	83.2±5.8	86.1±4.3	98.2±8.1	92.4±5.7	108.6±3.0	110.3±18.3	115.4±9.4

4.3. Procesamiento de los datos

4.3.1. Cálculo del índice de geoacumulación

Permitió el análisis de si existe contaminación o no en el sedimento por una relación entre la concentración de un elemento en la muestra con respecto de la concentración del mismo elemento en la corteza continental. Y se determinó mediante la ecuación descrita por Müller (1979), la cual es:

$$I_{geo} = \log_2[C_n/1.5*B_n]$$

Ec. 4.8 (Müller, 1979)

En donde:

C_n = Concentración del elemento en la muestra

B_n = Concentración del elemento en la CCS (Rudnick *et al.*, 2003).

1.5 = Factor de corrección de efectos litogénicos.

Para la interpretación se emplea la escala presente en la Tabla 4.9: Tabla 4.9. Valores del índice de geoacumulación que indican la relación con la contaminación.

Valor	Grado de contaminación
(< 0,0)	No contaminado
(0,1)	Muy poco contaminado
(1, 2)	Poco contaminado
(2,3)	Contaminado
(3,4)	Muy contaminado
(>4)	Extremadamente contaminado

4.3.2. Determinación del factor de enriquecimiento

Este procedimiento consiste en normalizar la concentración de un elemento con respecto de otro, tanto en la muestra como en la corteza continental, generalmente se normaliza en función del óxido de aluminio presente, aunque también puede ser, normalizado con respecto de otro elemento que se relacione directamente con todos los elementos. Se calcula de acuerdo con la Ec. 4.8.

$$FE = \frac{[M]/[Al]_{\text{muestra}}}{[M]/[Al]_{\text{CCS}}}$$

Ec. 4.B

En donde:

$[M]/[Al]_{\text{muestra}}$ es la razón de concentración entre el elemento a estudiar y aluminio presente en la muestra.

$[M]/[Al]_{\text{CCS}}$ es la razón de concentración entre el elemento a estudiar y aluminio presente en la CCS.

La interpretación de los valores es de acuerdo con la escala mostrada en la Tabla 4.6

Tabla 4.A Valores que relacionan el factor de enriquecimiento con la contaminación de un sistema, de acuerdo a la clasificación de Lawson y Winchester (1979).

Valor	Interpretación
[1,10]	Roca madre
(10,500]	Moderadamente enriquecido, existe otra fuente adicional a la roca madre.
(>500)	Alto enriquecimiento, lo que indica grave contaminación

4.3.3. Tratamiento de los datos con los métodos estadísticos

En seguida se hace referencia a los métodos estadísticos empleados para analizar los datos obtenidos de las muestras:

4.3.3.1. Análisis de agrupamiento

Es un análisis multivariante, el cual se basa en calcular la distancia entre variables de diversas muestras, a modo de agrupar las más cercanas, y permite disminuir el número de muestras a tratar, por la semejanza entre ellas (Hair *et al.*, 1999).4.3.3.2.

4.3.3.2 Análisis de correlación

Es un análisis que permite el estudio de la relación directa o indirecta entre variables, pudiendo establecer condiciones, de cómo afecta una variable a otra (Hair *et al.*, 1999). 4.3.3,3 Análisis de componentes principales

Es un análisis multivariante, que permite saber en qué grado determina una variable el comportamiento de una muestra (Dunteman, 1989).

5. RESULTADOS

5.1. Caracterización fisicoquímica de la columna de agua

Las condiciones fisicoquímicas del agua superficial y de fondo en el Lago de Chapala denotan una homogeneidad en la columna de agua (Tabla 5.1). Los valores obtenidos para la temperatura muestran una variación promedio entre la superficie y el agua de fondo de $0.15 \pm 0.24^\circ\text{C m}^{-1}$. Para considerar la presencia de una termoclina se reporta que en lagos tropicales el cambio de temperatura es de aproximadamente 0.5°C m^{-1} (Wetzel, 2001).

Tabla 5.1. Descripción de las propiedades fisicoquímicas del agua de fondo, determinada a diferentes horas, por lo que la temperatura (t_o), puede mostrar variaciones significativas entre estaciones.

Estación	pH fondo	$t(^{\circ}\text{C})_{\text{Agua sup}}$	$t(^{\circ}\text{C})_{\text{Agua fondo}}$	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Profundidad Z(m)	$\Delta T/Z$ ($^{\circ}\text{C/m}$)
4	8.06	21.0	21.0	838	5.5	0.0
6	8.85	20.1	19.7	1006	3.1	0.1
8	8.18	21.2	20.9	865	4.0	0.1
9	8.16	20.9	19.0	1091	4.6	0.4
14	8.70	20.5	18.2	1001	3.7	0.6
15	9.02	20.3	19.8	1013	2.0	0.3
16	8.48	14.0	14.0	1018	0.1	0.0
17	8.79	20.9	19.9	981	4.5	0.2
21	8.85	21.4	20.5	1010	2.0	0.4
30	8.70	25.0	25.0	1039	0.1	0.0
31	8.59	22.3	22.3	1011	0.1	0.0
32	8.53	17.9	17.9	1037	0.1	0.0
37	9.07	18.9	18.9	1004	2.6	0.0
38	9.09	19.3	19.7	991	1.0	0.4
1G	8.16	21.0	19.0	1091	3.2	0.6

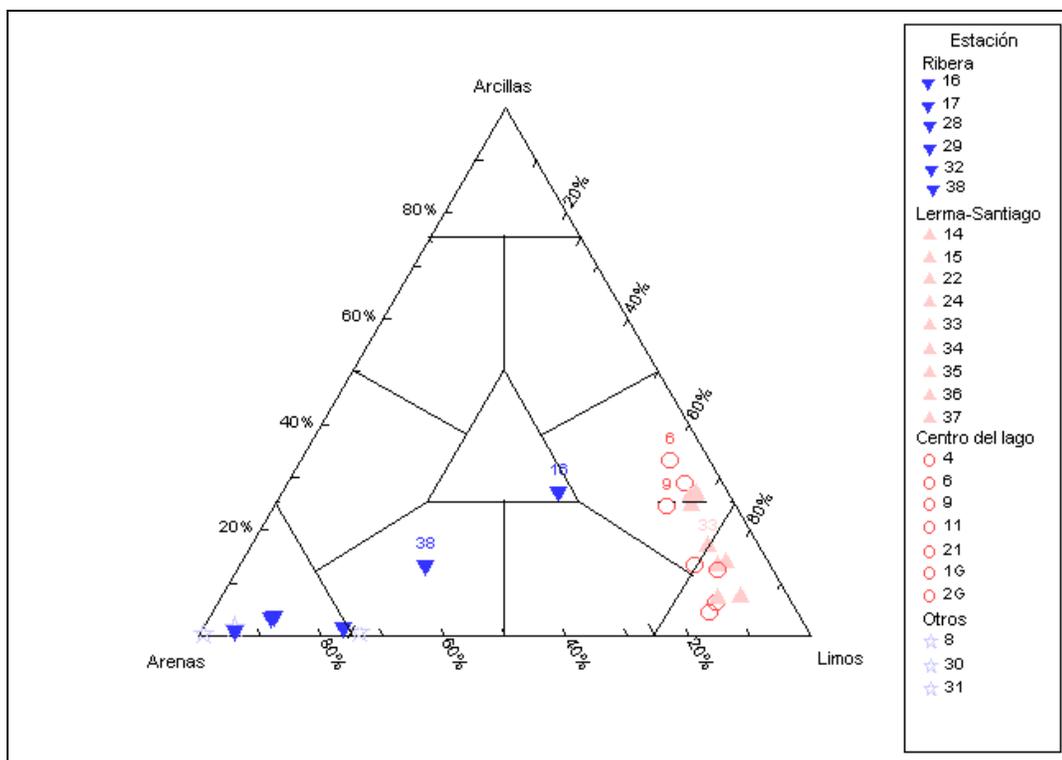
Además de que los valores de pH presentan un promedio de 8.60 ± 0.29 en la superficie y 8.69 ± 0.34 en el fondo. De acuerdo con el criterio de pH, el lago se considera como un cuerpo acuático en condiciones óptimas para la producción de peces (Wetzel, 1983). Y se considera el pH se regula por el equilibrio fotosíntesis–respiración (Libes, 2009).

Tiene una conductividad promedio de $949.40 \pm 76.87 \mu\text{Scm}^{-1}$ en la superficie y $976.53 \pm 86.13 \mu\text{Scm}^{-1}$, siendo ligeramente superiores en el fondo.

Las condiciones físico-químicas indican que es un lago que está en constante mezcla, coincidiendo con Rosales-Hoz *et al.* (2000), indicando que el Lago de Chapala es polimíctico.

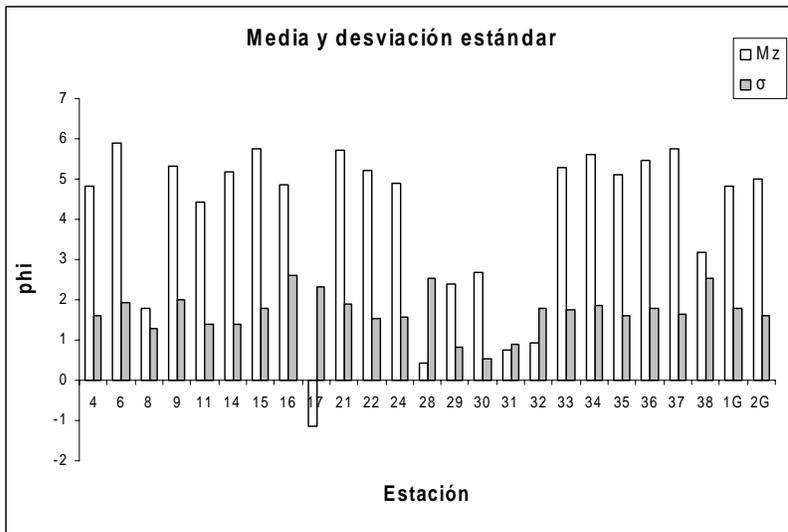
5.2. Caracterización granulométrica del sedimento superficial del Lago de Chapala

El análisis granulométrico del sedimento denota que en el fondo del Lago de Chapala se pueden encontrar arenas, limos y arcillas, en diferentes proporciones (Fig. 5.4). En general en las estaciones ubicadas en las regiones del centro del lago y en la formada por el sistema Lerma-Santiago existe un predominio de limos con la presencia de algunas arcillas, mientras que en la región ribereña encontramos arenas principalmente.



11Figura 5.1. Diagrama de Shepard (1954) empleado para describir sedimentos finos, donde se especifica la distribución del tamaño de sedimento en las diversas estaciones.

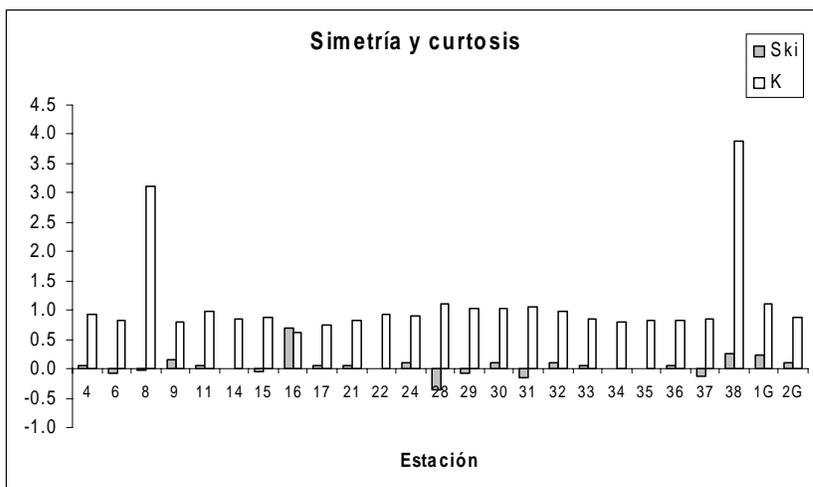
De la Figura 5.6 se puede apreciar que la media de las muestras se encuentra en el intervalo de los limos (4, 8) Φ y arenas (-1, 3) Φ , por lo que se cuenta con sedimentos finos. Sin embargo al determinar la clasificación acorde con la desviación estándar se obtienen valores de entre 0.5 Φ y 2.5 Φ , y aplicando la escala descrita por Folk (2002), corresponde a sedimento entre moderadamente clasificado y mal clasificado, tal como se puede apreciar en la fig. 5.1.



12Figura 5.2. En el gráfico se pueden apreciar los valores de la media y desviación estándar del sedimento.

Adicionalmente se determinó la simetría presente y se puede decir que la distribución es simétrica para la mayoría de las estaciones con valores entre -0.1 y 0.1, otras muestras se encuentran ligeramente sesgadas hacia los finos; es decir, aumenta la presencia de arcillas.

En cuanto a la moda presente en las diferentes muestras, podemos apreciar que en su mayoría son unimodales y bimodales, por lo que reciben el nombre de leptocúrticos y mesocúrticos, respectivamente, lo que es observable en la fig. 5.3.



13Figura 5.3. En el gráfico se identifica que las muestras están sesgadas hacia finos y los valores de curtosis muestran tendencia hacia leptocúrticas

5.3. Mineralogía

En el análisis de DRX realizado a las muestras, se aprecia que el sedimento superficial se encuentra conformado principalmente por plagioclasas y cuarzo, las cuales de acuerdo al porcentaje de óxido de silicio, tienen un origen basáltico.

La interpretación de los difractogramas se puede apreciar en la tabla 5.2 en donde se indica el valor de 2θ y el valor que corresponde con el tipo de mineral presente.

Tabla 5.2. Distancias interlaminares, obtenidas a partir de los difractogramas que permiten la identificación de los minerales

Distancias (Å)	Mineral
4.4, 3.3, 2.5, 2.1	Cuarzo
3.2, 3.18, 4.04, 6.52	Plagioclasas cálcicas
3.1, 3.68, 3.78, 4.03	Plagioclasas sódicas

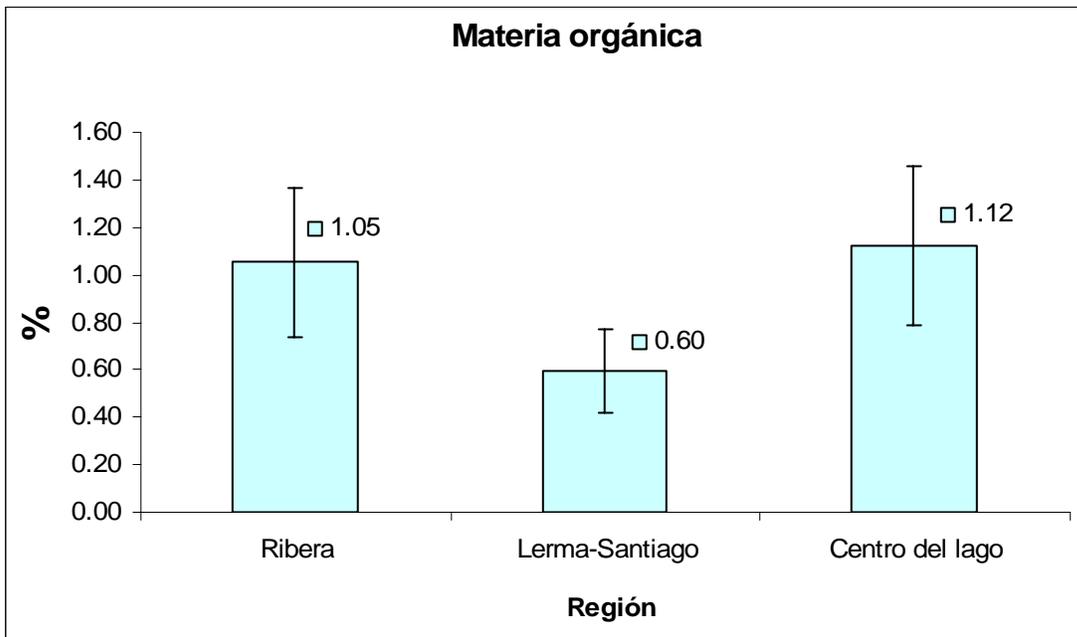
De acuerdo con el análisis de difracción de rayos X, las arcillas presentes son un interestratificado entre cloritas y esmectitas. Las esmectitas corresponden a un grupo de las arcillas con capacidad de adsorción de metales elevada, debido a su superficie activa y estructura t-o-t. De tal forma que en ellas se puede dar una acumulación importante para los elementos traza, en especial metales. Los datos analizados para la determinación de las arcillas presentes se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Datos para interpretar el tipo de arcillas presentes en el sedimento.

Tratamiento	Distancias		Arcilla
	(Å)		
Natural	14.7	7.9	Interestratificado
Glicolada	16.35	7.9	
Calentamiento (400°C)	9.82	----	Esmectita-clorita

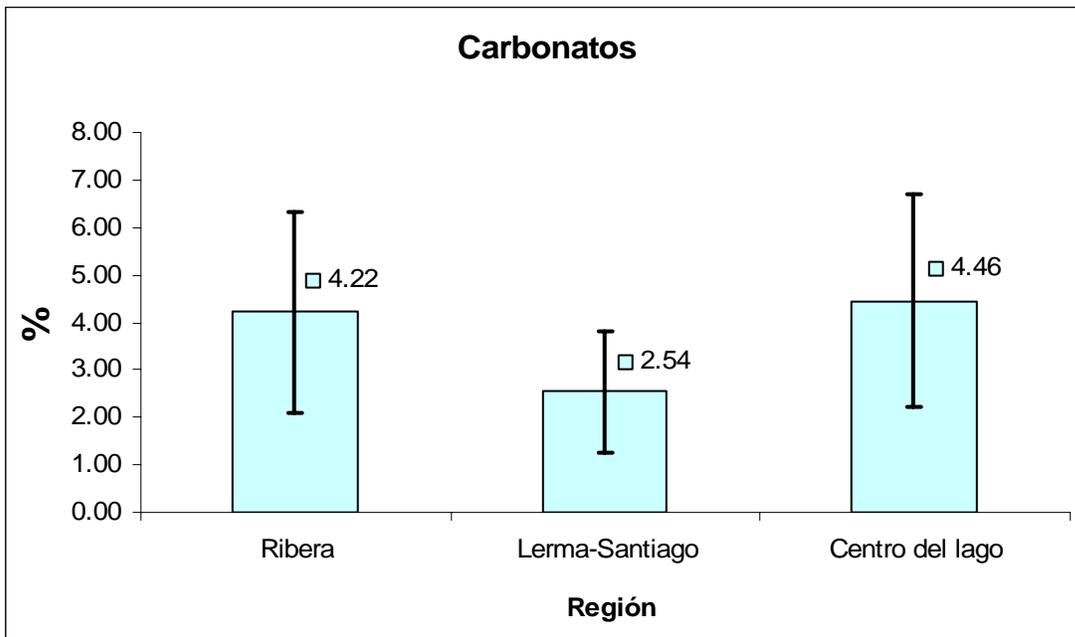
5.4. Contenido de materia orgánica y carbonatos en los sedimentos

Por la concentración de materia orgánica en los sedimentos del lago Chapala se puede observar que este componente no es muy abundante, pues se encuentra presente en porcentajes menores al 2 %. En la región de la ribera es en donde se localiza una mayor concentración de materia orgánica. La distribución espacial de la concentración de la materia orgánica en los sedimentos de lago se puede apreciar en la Fig. 5.4.



14Figura 5.4. Contenido de materia orgánica en las principales regiones del Lago de Chapala, mostrado en laFigura 5.8.

La presencia de carbonatos no es muy abundante en el Lago de Chapala, salvo en dos estaciones (8 y 38), las cuales muestran una concentración promedio de 8.3%. De la misma forma que para materia orgánica la zona con menor concentración de carbonatos es la del Lerma-Santiago, tal como se puede apreciar en la Figura 5.5.



15Figura 5.5. Distribución de carbonatos en las zonas del Lago de Chapala, localizadas en la figura 5.8.

5.5. Elementos mayores

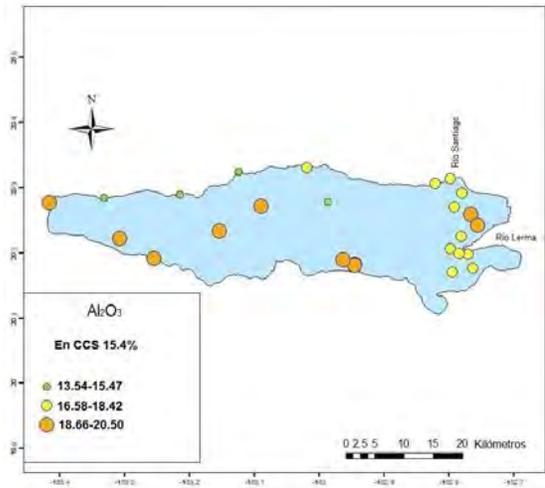
Los resultados del análisis de elementos mayores por FRX muestran una cierta homogeneidad en las muestras.

De acuerdo con los valores obtenidos, podemos decir que hay un enriquecimiento de Al con respecto a lo que se reporta para la corteza continental superior (CCS) (Rudnick, 2003), así como una disminución en el contenido de óxido de silicio.

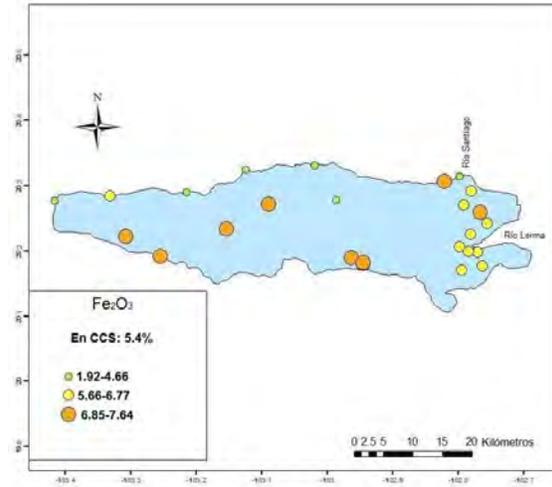
El contenido de óxidos de Fe es homogéneo en el lago; tienen un incremento con respecto de la CCS, lo que nos sugiere que corresponden en su mayoría a plagioclasas, salvo en las estaciones 30 y 31 que muestran una concentración inferior para Fe, pero incrementa la concentración de Na y K, quienes se relacionan más con la presencia de feldspatos y cuarzo acorde con el diagrama de la (Fig. 5.5).

En las Figs. 5.6 y 5.7 se pueden apreciar las asociaciones de los elementos mayores, que muestran la relación con el predominio de minerales en el Lago de Chapala.

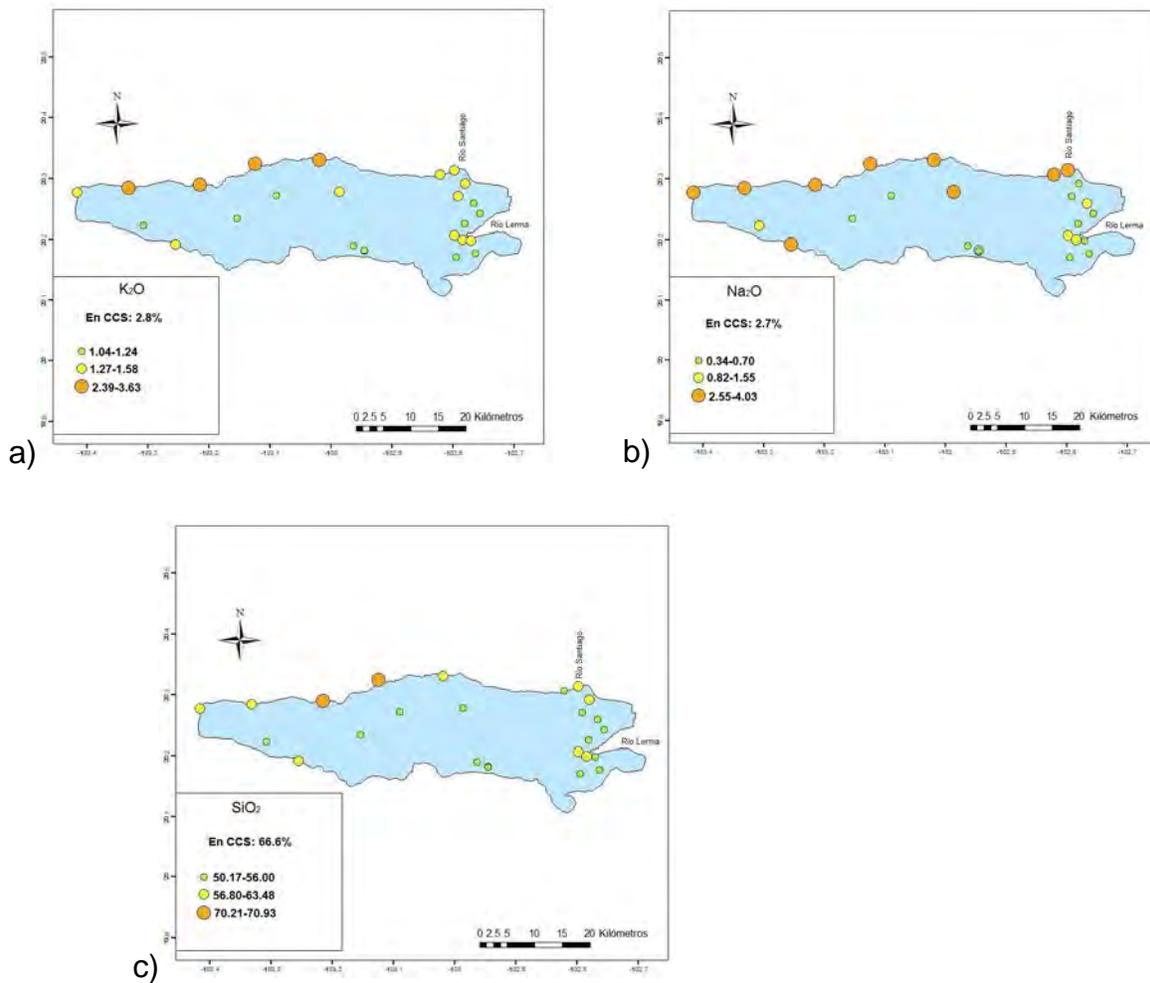
a)



b)



16Figura 5.6. Mapas de distribución de elementos mayores, asociados a la presencia de minerales arcillosos y plagioclasas a) óxido de aluminio y b) Óxido de hierro (III).



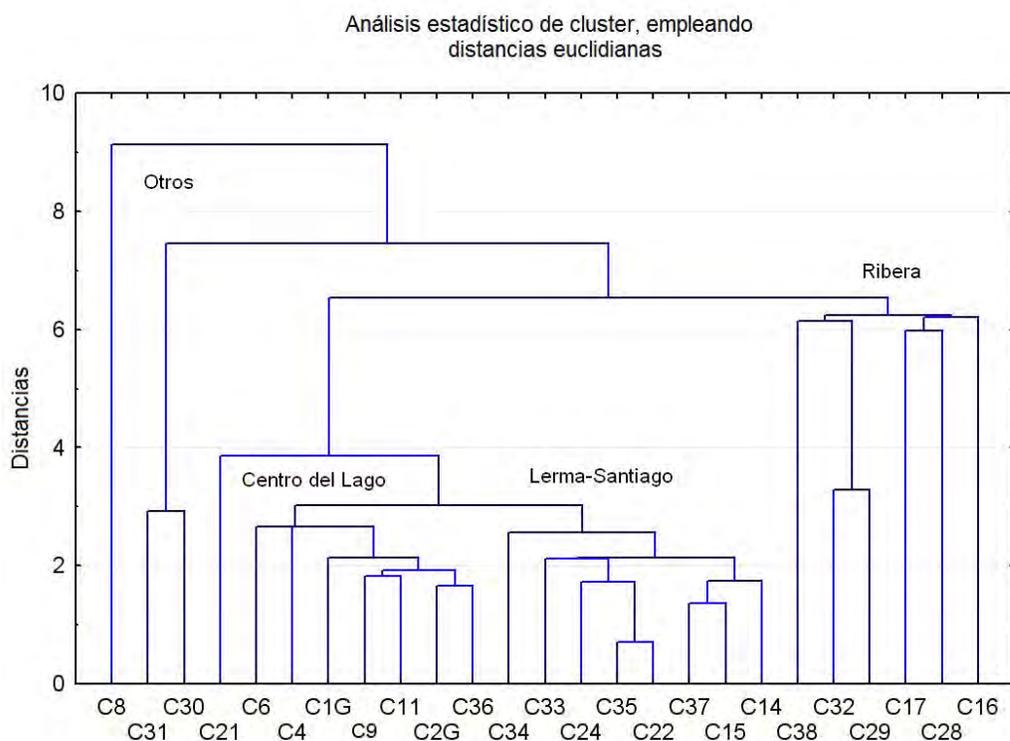
17Figura 5.7. Mapas de distribución de los elementos mayores asociados a plagioclasas sódicas y arenas: a) óxido de sodio; b) óxido de potasio y c) bióxido de silicio

En cuanto al Mn se trata no se encuentran grandes diferencias con respecto de la CCS, ya que las regiones presentan valores del mismo orden próximos al 0.1 %. Las cantidades de sodio y potasio, indican que en las regiones del Centro del lago y Lerma-Santiago hay una disminución mostrando valores próximos al 1 %, concordando con la presencia de plagioclasas cálcicas y minerales arcillosos, mostrado por otros elementos como el hierro, sin embargo; en los sedimentos de la Ribera se aprecia un valor ligeramente inferior al de la CCS.

La concentración de fósforo en los sedimentos del lago es muy similar al de la CCS, salvo en algunos casos que lo duplican.

5.6. Zonificación del Lago de Chapala

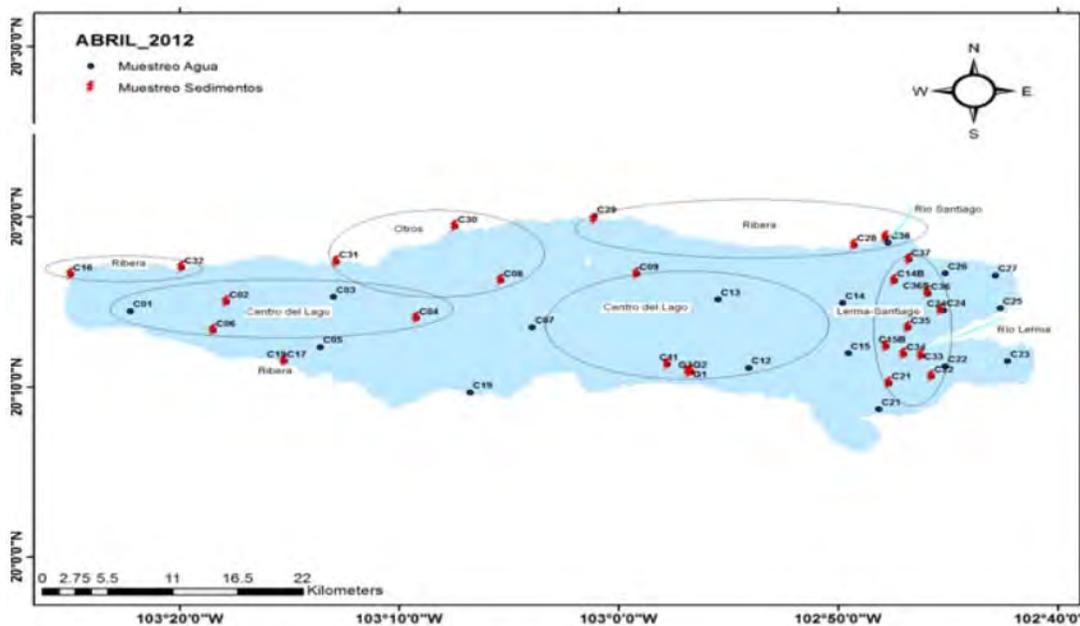
De acuerdo al análisis estadístico de agrupación (distancias euclidianas) de casos (Fig. 5.8), se determinó que de acuerdo a las variables químicas el lago presenta principalmente 3 zonas que agrupan a las 22 de las 25 estaciones y las otras 3 estaciones no presentan relación con otros grupos.



18Figura 5.8. Diagrama de árbol, empleando las concentraciones en porcentajes de elementos mayores, carbonatos y materia orgánica para determinar las asociaciones entre las muestras.

Entonces la zona de la Ribera que comprende las estaciones: 16, 17, 28, 29, 32 y 38; la zona del Centro del Lago está comprendida por las estaciones: 4, 6, 9, 11, 21, 36, 1G y 2G; la zona Lerma-Santiago tiene las estaciones: 14, 15, 22, 24, 33, 34, 35, 36, 37 y las estaciones que no presentan una relación estadística son la 8, 30 y 31.

La determinación de las zonas fue muy importante para determinar las muestras a las que se aplicaría la extracción secuencial, para asociar los elementos de interés presentes en el sedimento con la biodisponibilidad, asociada a las fracciones 1 y 2 correspondientes a las intercambiable y carbonatada respectivamente. Mostrando la distribución conforme se aprecia en la Fig. 5.9



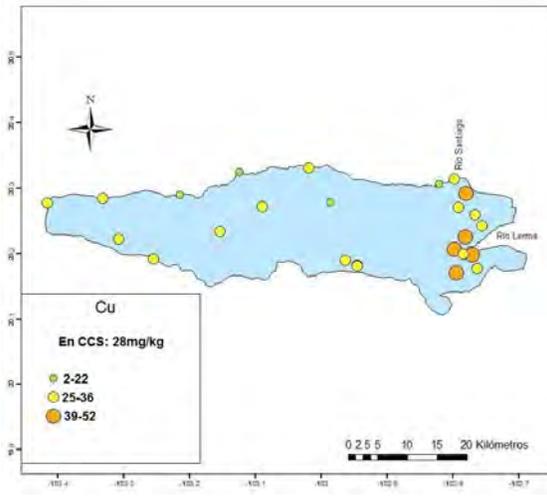
19Figura 5.9. Mapa con la distribución de las estaciones de acuerdo a la zona en que se ubica.

5.7. Elementos traza

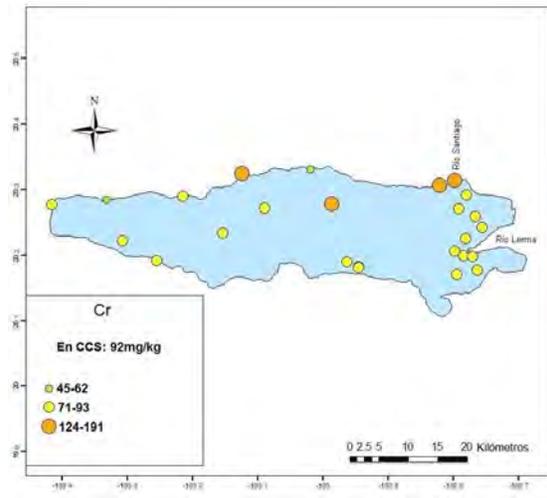
5.7.1. Contenidos totales de los elementos traza en los sedimentos

La concentración y distribución de los elementos traza en en los sedimentos del lago de Chapala se muestra en los mapas colocados en la Figura 5.A, los cuales fueron realizados a partir del Anexo 5.

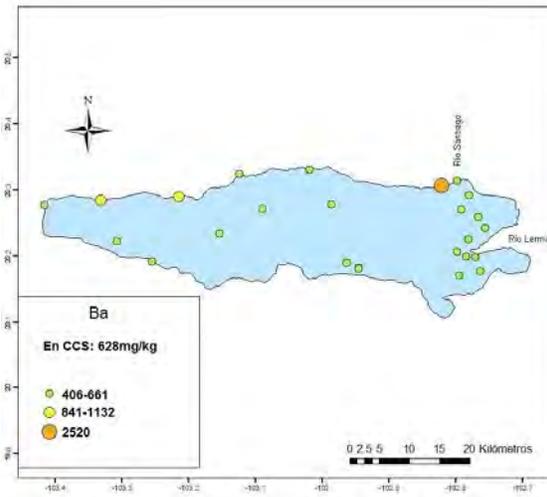
a)



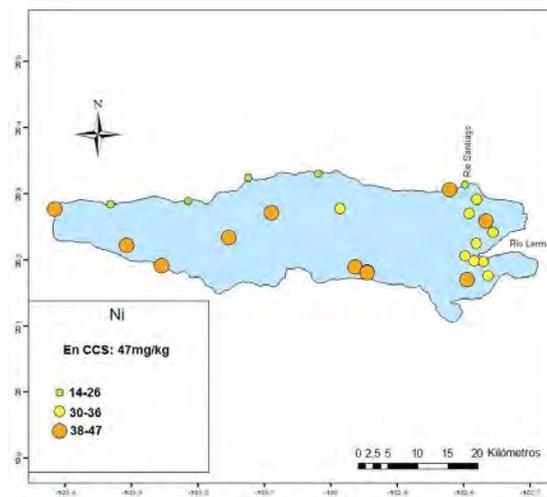
b)

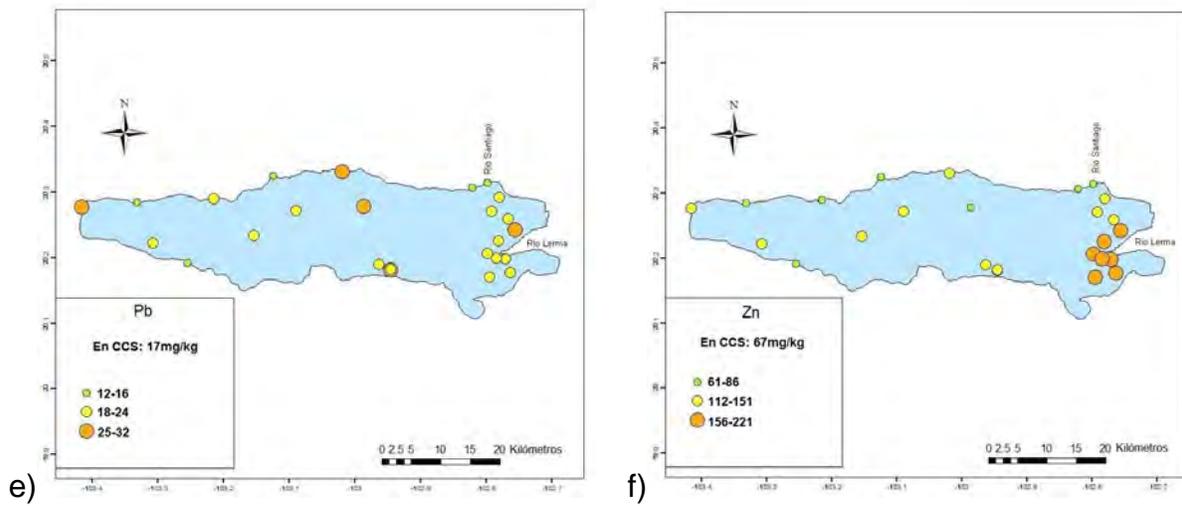


c)



d)

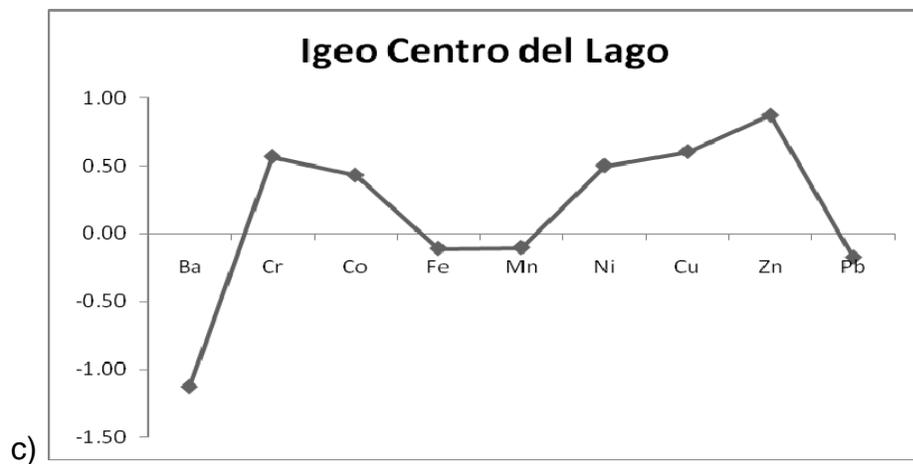
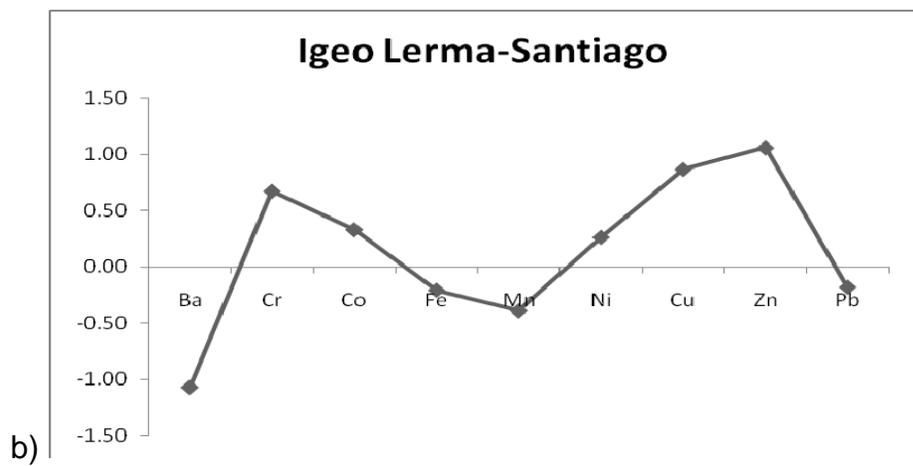
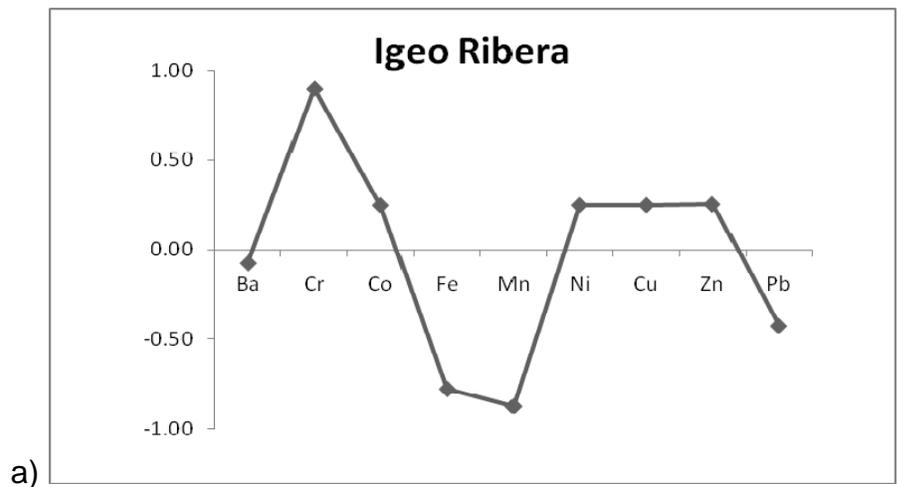




20 Figura 5.A. Mapas de distribución de concentración de los elementos traza en el sedimento superficial del lago: a) Cu; b) Cr; c) Ba; d) Ni; e) Pb y f) Zn.

5.7.1. Índice de geoacumulación de los elementos traza en los sedimentos del lago de Chapala

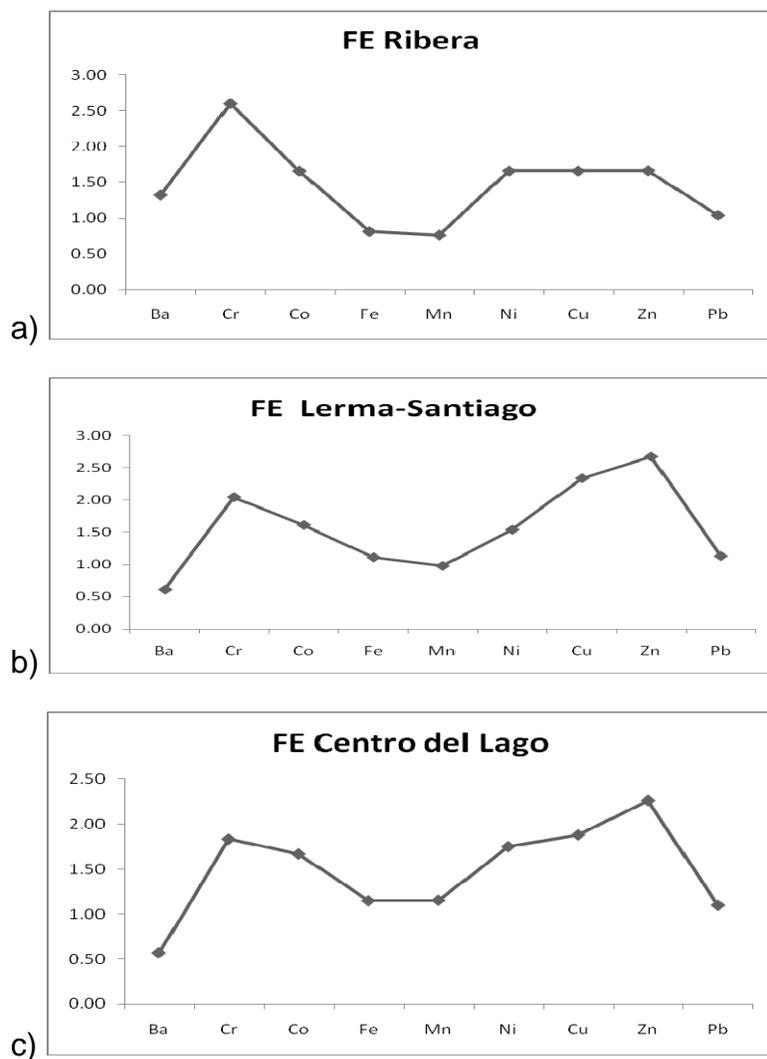
Se determinó el índice de geoacumulación por zonas y los resultados se muestran en la Fig. 5.B.



21Figura 5.B. Índice de geoacumulación promedio de los metales traza cen los sedimentos de en: a) la Ribera; b) Lerma-Santiago y c)Centro del Lago .

5.7.2. Factor de enriquecimiento de los elementos traza en los sedimentos

De acuerdo con el cálculo de factor de enriquecimiento promedio de los elementos en los sedimentos de tres zonas de lago de Chapala, los resultados se pueden apreciar en la Fig. 5.C.

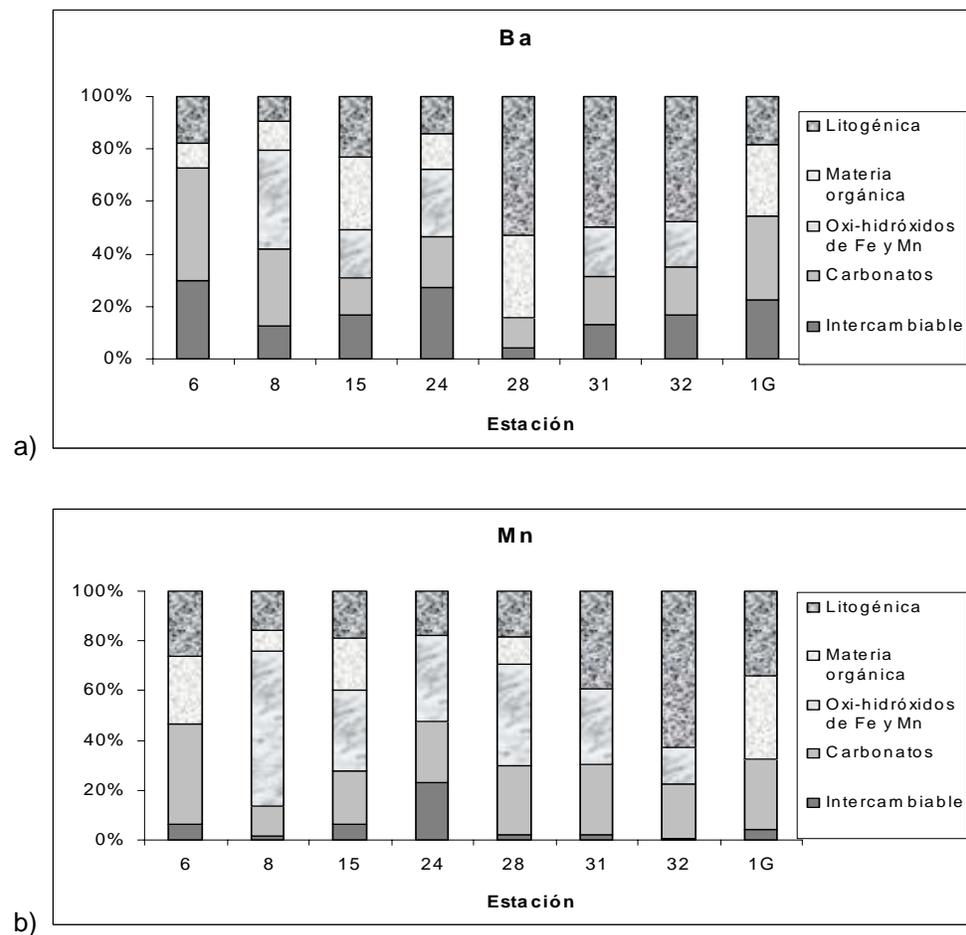


22Figura 5.C. Factores de enriquecimiento promedio para metales pesados, normalizados con respecto del Al para los sedimentos de tres zonas del lago: a) Ribera; b) Lerma-Santiago y c) Centro del Lago

5.9. Movilidad geoquímica de los elementos traza en los sedimentos de lago de Chapala evaluada mediante la aplicación de la técnica de la extracción secuencial

5.9.1. Bario y manganeso

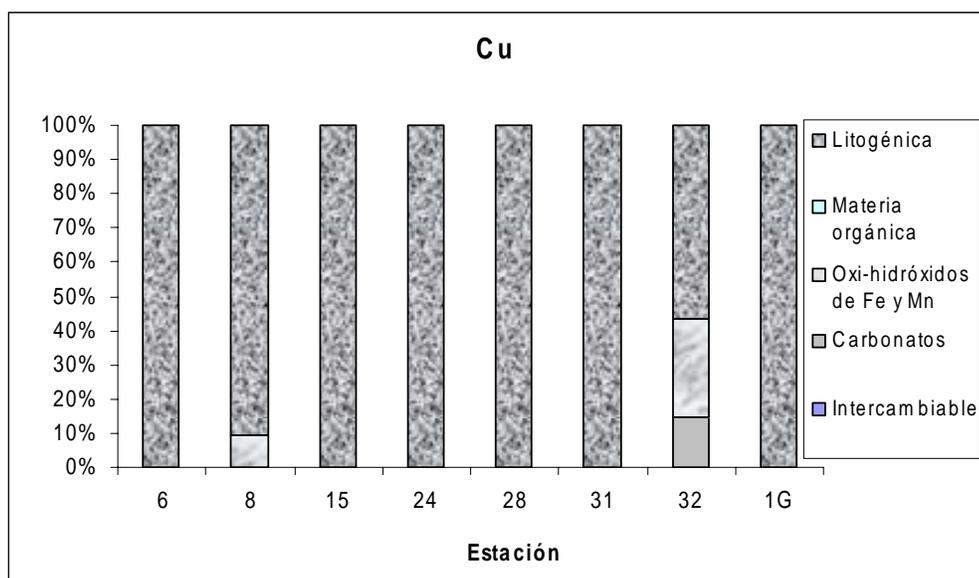
Estos elementos se encuentran en las 5 fracciones del sedimento, considerándose como elementos biodisponibles; la distribución de los porcentajes se puede ver en la Fig. 5.D



23Figura 5.D. Gráficos donde se muestran los porcentajes de asociación a las diferentes fracciones del sedimento: a) bario; b) manganeso.

5.9.2. Cobre

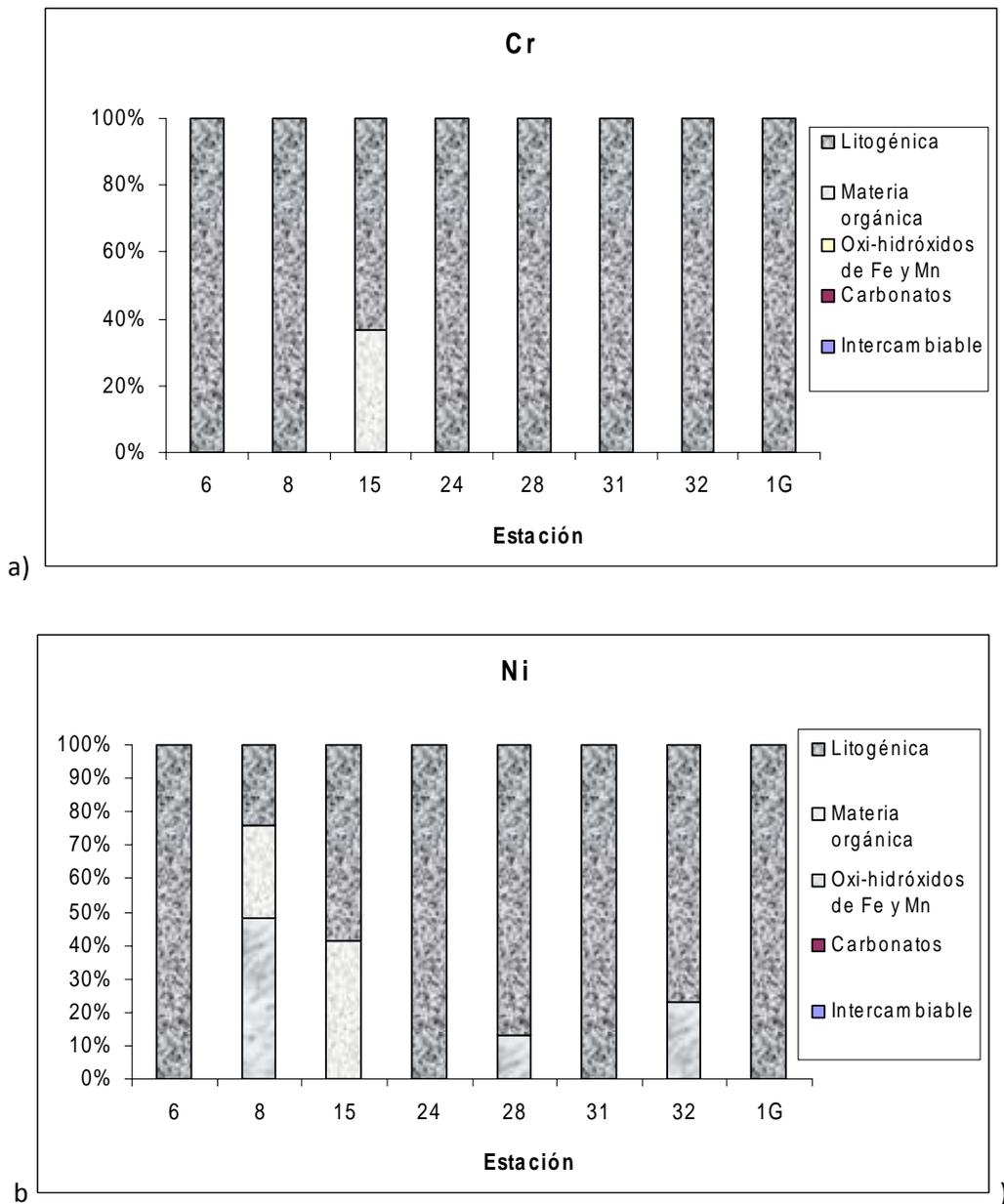
La cantidad de cobre encontrada en la serie de extracción secuencial indica que en los sedimentos no existe de forma biodisponible, ya que su presencia no se está relacionada con las fracciones intercambiable y carbonatada. La distribución del cobre entre diferentes fracciones de la lixiviación secuencial se muestra en la Fig. 5.E.



24Figura 5.E. Distribución del cobre en las diferentes fracciones del sedimento.

5.9.1. Cromo y níquel

Los resultados de la lixiviación secuencial de Cr y Ni de los sedimentos muestran que, estos elementos se encuentran asociados a la fase litogénica y de materia orgánica de los sedimentos, como se muestra en la Figura 5.F.

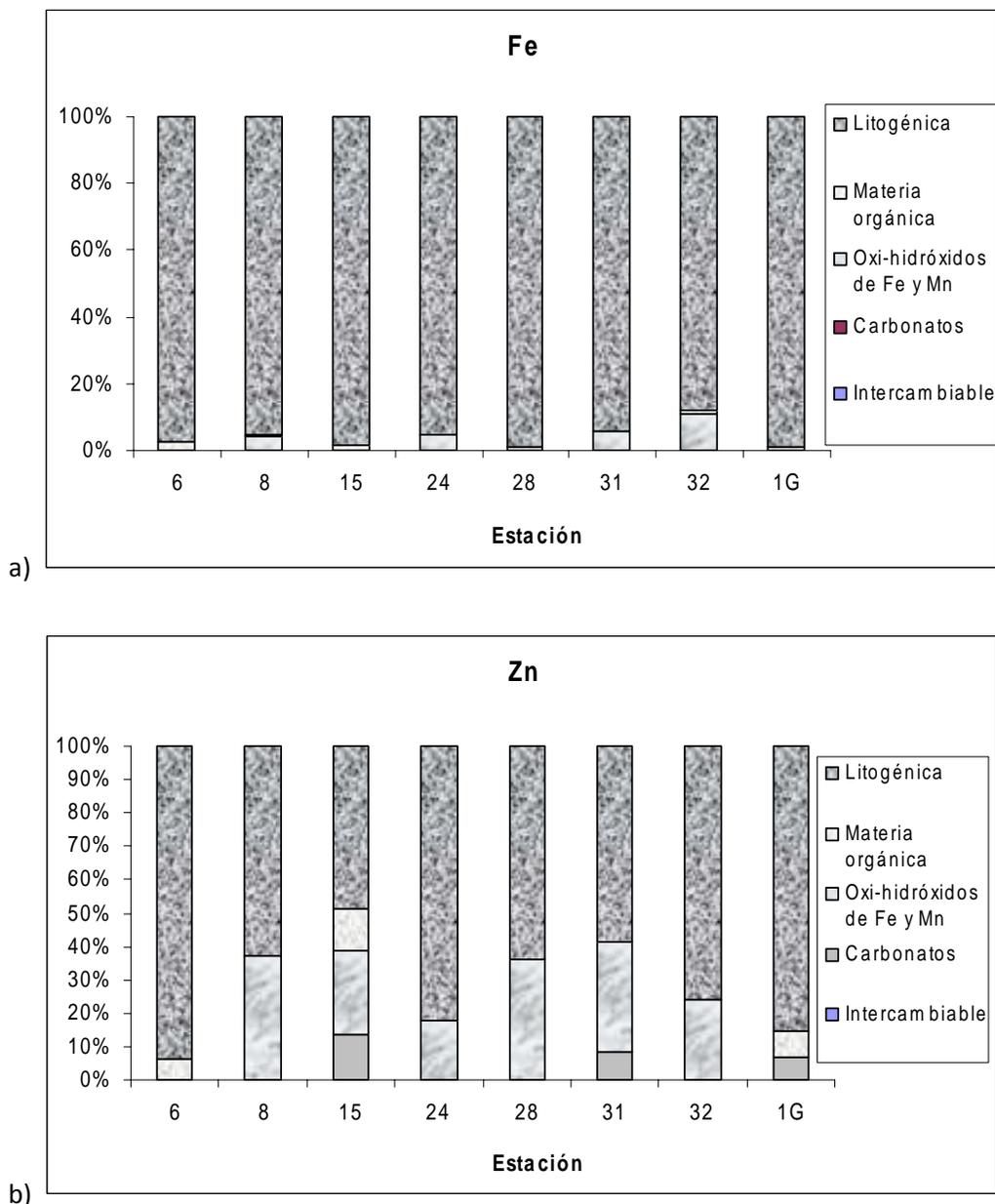


25Figura 5.F. Distribución en las diferentes fracciones del sedimento para: a) cromo y b) níquel.

5.9.6 Hierro

El hierro en las muestras de los sedimentos está asociado a la estructura mineral de las plagioclasas cálcicas, más que a una posible fuente de contaminación, ya que sólo en una estación se encuentra hierro en la fracción intercambiable, y en dos estaciones en la fracción carbonatada. De acuerdo con estos valores el hierro no presenta riesgo potencial, ya que no se encuentra de forma biodisponible. Como es

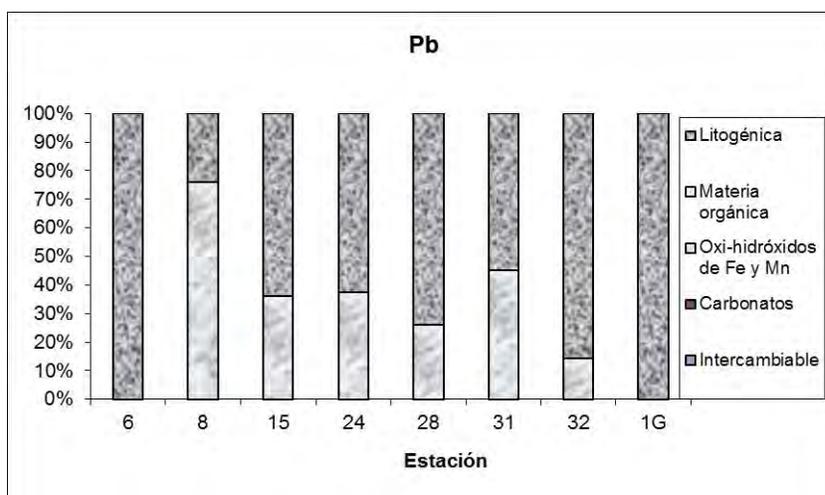
lógico, los valores de hierro son elevados, ya que es uno de los principales componentes de la corteza terrestre, además de estar en una zona rica en basaltos, que incrementan la concentración de hierro. La distribución de Fe entre 5 fracciones del sedimento obtenidos por la lixiviación secuencial se puede observar en la Figura 5.G.



26Figura 5.G. Distribución en las diferentes fracciones del sedimento de: a) hierro, y b) zinc.

5.9.9. Plomo

El plomo predomina encuentra presente en las fracciones de oxihidróxidos de hierro y óxidos de manganeso, así como en la fracción residual, por lo que no está en las fracciones disponibles. Su distribución se muestra en la Fig. 5.H



27Figura 5.H. Distribución del plomo entre diferentes fracciones del sedimento de lago de Chapala.

Con base en los resultados obtenidos, se determina que los elementos estudiados actualmente no representan un problema para la biota, ya que se encuentran asociados a las fracciones de oxihidróxidos de hierro y óxidos de manganeso, a la materia orgánica y a la fracción litogénica, que requieren de un cambio drástico de las condiciones físico-químicas (pH, potencial óxido-reducción y temperatura principalmente), para ser liberados al ambiente y ser considerados como potencialmente tóxicos.

6. DISCUSIÓN

6.1. Análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua

De acuerdo con la Tabla 5.1, el Lago de Chapala no se encuentra estratificado, porque para considerar a un cuerpo lacustre como estratificado, debe presentar una termoclina (que se determina para un lago tropical como un cambio de temperatura de aproximadamente $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$) (Wetzel, 2001).

Considerando el pH, el lago se considera como un cuerpo acuático en condiciones óptimas para la producción de peces, en el cual el pH se ve regulado por el equilibrio fotosíntesis-respiración, aunque también la solubilidad del dióxido de carbono y oxígeno estará determinada por la constante de equilibrio establecida con la atmósfera, por ser un sistema somero (Wetzel, 2001).

Las condiciones físico-químicas indican que es un lago que está en constante mezcla, coincidiendo con lo descrito por Rosales-Hoz *et al.* (2000), indicando que el Lago de Chapala es polimíctico.

6.2. Observaciones granulométricas

Se observa en general un tamaño de grano fino para toda el área del Lago de Chapala, lo cual coincide con lo reportado por Rosales-Hoz *et al.* (2000) y Trujillo-Cárdenas *et al.* (2010). La abundancia de limos en el Lago de Chapala se puede explicar en primer lugar por la disminución de energía dentro del lago, ya que el agua será almacenada y no tiene un libre flujo. Adicionalmente el aporte terrígeno del Río Lerma disminuye por el conjunto de cuerpos de represa presentes, provocando que llegue material más fino (limos y arcillas) al lago; que corresponde al que está en suspensión. El otro aporte de sedimento proviene de la propia región, debido a los procesos de intemperismo, erosión y actividad tectónica, que proveen tamaños de partícula mayores.

Los sedimentos muestran un comportamiento característico de lagos, de color negro, café, gris o verde y el tamaño de partícula va de arcillas a arenas (Filipek y Owen, 1979). Del mismo modo se indica que la clasificación puede ser variable, lo cual coincide perfectamente con los resultados aquí obtenidos, ya que indica que los sedimentos van de mal clasificados a moderadamente bien clasificados.

Tabla 6.1. Análisis granulométrico realizado en algunos lagos canadienses, en donde se aprecia el predominio de sedimentos finos (Kemp, 1971)

Lago	Tamaño de partícula		
	% Arenas	% Limos	% Arcillas
Huron	1	38	61
Erie	41.5	41	17.5
Ontario	45	35	20

Al observar los porcentajes de abundancia en el tamaño de partícula, se puede apreciar que al igual que en el Lago de Chapala predominan los sedimentos de medios a finos (arenas a arcillas).

6.3. Descripción mineralógica

El análisis de DRX indica que el sedimento superficial se compone principalmente por plagioclasas, las cuales de acuerdo al porcentaje de sílice determinado por FRX, se encuentran en valores de alrededor del 50%, lo cual podría indicar un origen basáltico; concordando con la presencia de plagioclasas y un incremento en la concentración de silicio hacia la ribera, debido a la presencia de cuarzo.

El estudio de la secuencia sedimentológica reportado por Rosas-Elguera *et al.* (2003) muestra una secuencia de origen basáltico y andesítico, donde los primeros son los más recientes, considerando así, que principalmente las plagioclasas son cálcicas.

El análisis de DRX permite comprobar que los minerales presentes son plagioclasas y cuarzo principalmente (Anexo 6) y conforme la interpretación del difractograma

presentada en la Tabla 5.2, además de la presencia de arcillas. La presencia de las arcillas fue analizada con el procedimiento indicado, una vez obtenidos los tres difractogramas se superpusieron y de acuerdo con las señales obtenidas y comparación entre sí se determinó que grupo de arcillas se encuentran presentes. Así podemos ver en la señal cercana a 10 Å, se muestra un incremento del espacio interlaminar al ser glicolada, y un incremento de la intensidad de la señal, al aumentar la temperatura (Anexo 7), que al ser interpretada de acuerdo con la tabla realizada por Starkey (1984) y los datos mostrados en la Tabla 5.3, corresponde a un interestratificado entre cloritas y esmectitas.

La presencia de las arcillas se identifica de igual forma por el incremento del porcentaje de Al de forma general en el cuerpo del lago, lo cual se puede observar en la imagen 5.6, contrastando con el incremento del porcentaje de Na, K y Si en la Ribera, lo que se puede asociar con una mayor abundancia de arenas (cuarzo), lo cual se puede apreciar en la Figura 5.7.

De acuerdo entonces con los análisis realizados los resultados nos indican que en el sistema tenemos plagioclasas en la ribera, así también las arcillas presentes en el lago corresponden a un interestratificado clorita-esmectita estas últimas son minerales que poseen mayormente la capacidad de adsorber metales (Sun Kou *et al.*, 2004).

6.4. Análisis del contenido de carbonatos y materia orgánica

La presencia de materia orgánica en un lago es variable, debido a que depende de la producción y degradación de los organismos vivos, además de las descargas presentes en el sistema. Los valores reportados concuerdan con lo reportado por Rosales Hoz *et al.* (2000), que en promedio muestran los valores $1.58 \pm 0.92\%$ de materia orgánica, aunque Trujillo-Cárdenas *et al.* (2010) indican concentraciones de $0.55 \pm 0.06\%$, siendo muy contrastante, ya que se consideran los puntos en una zona, que corresponde a la del centro norte del lago y parte de la Ribera (donde en la investigación actual se hallaron las concentraciones más altas). En el Lago de Chapala, los valores de la materia orgánica se consideran bajos, ya que existen

sistemas con porcentajes de materia orgánica de hasta 15%, dependiendo de la cantidad de organismos del sistema. La baja concentración puede deberse a que es un ambiente oxidante, originado por la mezcla continua y la poca profundidad. Es importante mencionar que la menor concentración encontrada para materia orgánica corresponde a la zona Lerma-Santiago, muy probablemente por la dinámica del sistema, descrita por Hansen *et al.*(2001), en donde se aprecia un giro ciclónico que produce un desplazamiento hacia la Ribera.

La Ribera fue la zona con mayor concentración de materia orgánica en los sedimentos, en parte por lo que se acaba de mencionar, pero también podría ser un resultado de la interacción que mantiene el sistema lacustre con las diferentes comunidades ribereñas, ya que en algunas comunidades, se emplea al lago como drenaje, lo cual fue observado en la recolección de muestras. Sin embargo, la oxigenación del sistema hace que el carbono orgánico se vea oxidado para generar dióxido de carbono. Además, la baja concentración de materia orgánica puede explicar que los elementos traza no sean abundantes en esta fracción del sedimento.

Los carbonatos son poco abundantes (1-8%), salvo en dos estaciones (8 y 38), las cuales muestran una concentración alrededor de 8.3%, coincidiendo también que la zona con menos carbonatos es la del Lerma-Santiago, lo cual se puede atribuir a la presencia del delta del Río Lerma, ya que genera un desplazamiento de materia tanto a la región central como a la Ribera. En otros lagos, por ejemplo, los de cráter en Puebla se reportan concentraciones de entre 1 y 5% de carbonatos (Ramírez *et al.*, 1988). Además, la presencia de carbonatos en los medios lacustres va a depender principalmente del origen que tenga, ya que se considera que la fuente primordial es la biogénica, situación que se ve reflejada en que la concentración mayor determinada, correspondiente a la región de la Ribera, en donde se encontraron conchas, situación que perfectamente explica el incremento de la concentración de carbonatos.

6.5. Análisis de la composición química de los sedimentos (elementos mayores y traza)

cuales suelen ser ricas en aluminio por lo que presentan un incremento en su porcentaje (Andrade *et al.*, 2005).

El contenido de óxido de hierro (III) es generalizado en los sedimentos del lago ($6.5\pm 1.5\%$); teniendo un incremento con respecto de la CCS (5.0), lo que nos indica que el sedimento proviene de rocas básicas.

En cuanto a manganeso, no se encuentran grandes diferencias con respecto de la CCS, ya que las regiones presentan valores del mismo orden próximos al 0.1 %. En las regiones del centro del lago y en la zona Lerma-Santiago, hay una disminución en la concentración de sodio y potasio con respecto a la CCS (1%). Esta concentración la presentan las rocas de carácter básico, acorde con lo mostrado por otros elementos como el hierro; sin embargo, en la Ribera se aprecia un valor ligeramente inferior al de la CCS, lo que podría sugerir un origen andesítico, que explicaría una mayor concentración de hierro, pero también una alta concentración de sodio y potasio.

En cuanto a la concentración de fósforo ($0.2\pm 0.1\%$), el valor es muy similar al de la CCS, salvo en algunos casos que lo duplican. Esto podría ser por la litología del lugar o bien por el aporte generado en los procesos agrícolas y domésticos. El análisis de componentes principales permitió corroborar la relación existente entre las estaciones y los elementos que condicionan el comportamiento de las mismas.

La determinación de concentración de los elementos traza en sedimentos superficiales del Lago de Chapala muestra que hay una disminución temporal de la mayoría de los elementos; pero para el Cr se aprecia un notable incremento temporal de concentración. Se presenta el comparativo con los datos reportados por Rosales-Hoz *et al.* (2000), Trujillo-Cárdenas *et al.* (2010), y Hansen *et al.* (2006), cuyo muestreo es de 13, 8 y 8 estaciones respectivamente con los datos obtenidos en este trabajo de investigación. El análisis se enfoca en 10 elementos, y todos los datos son considerando las 25 estaciones localizadas en el lago. De ello se reporta la información en las tablas 6.3 y 6.4.

Tabla 6.3. Concentraciones promedio para el Lago de Chapala para los diferentes elementos de interés en diferentes investigaciones presentadas en trabajos previos y en comparación con el actual

Elemento	Concentración (mg kg ⁻¹)			
	Rosales-Hoz <i>et al.</i> (2000) (n=13)	Trujillo-Cárdenas <i>et al.</i> (2010) (n=3)	Hansen <i>et al.</i> (2006) (n=1)	Trabajo 2012 (n=25)
Ba	n. r.	n. r.	n. r.	595.±430.0
Cr	66.1±9.1	43.4±1.8	32.0	90.4±30.0
Cu	29.3±4.4	39.3±1.6	80.0	31.1±10.1
Ni	39.2±5.8	61.1±1.27	35.0	33.8±7.8
Pb	81.7±7.2	225.1±61.7	19.1	21.2±4.8
Zn	102.7±14.1	191.8±73.2	67.0	129±40

n. r. = no reportado o concentración baja

Tabla 6.4. Concentración Fe y Mn en los sedimentos del lago de Chapala.

Elemento	Concentración (%)			
	Rosales-Hoz <i>et al.</i> , 2000 (n=13)	Trujillo-Cárdenas <i>et al.</i> , 2010 (n=3)	Hansen y van Afferden., 2005 (n=1)	Trabajo, 2012 (n=25)
	Fe	3.9±0.3	2.2±0.9	n. d.
Mn	n. r.	0.1±0.4	0.3	0.1±0.0

n. r. = no reportado.

Tabla 6.5. Datos reportados de la concentración promedio para los elementos objeto de estudio de este trabajo en diversos cuerpos acuáticos del mundo (Kemp, 1971; Filipek y Owen, 1979; Horowitz y Elrick, 1987).

Elemento (mg/kg)	Lago							Trabajo 2012
	Bangalore (India)	Presas (Polonia)	Lagos (Polonia)	Balatan (Europa)	Texoma (EUA)	Bruin (EUA)	Ned Wilson (EUA)	
Ba	-	44.3	32.5	-	-	-	-	595.3
Cr	96.7	3.5	5.5	-	-	50	90	90.4
Cu	203.5	52.8	18	5.1	24	25	28	31.1
Fe	-	622.5	18.5	-	-	-	-	60000
Mn	176	757.6	8.5	-	-	-	-	1000
Ni	97.6	18	6	9.2	5	29	66	33.8
Pb	206	60.4	1	3.5	15	22	38	21.2
Zn	220.9	276.7	98.5	126	59	103	113	129.0

En el caso del Ba no se puede comparar con trabajos previos, debido a que no fue determinado, y en este trabajo aunque existen 2 puntos, donde el Ba es muy abundante. Sin embargo, este elemento no se puede considerar como contaminante, ya que el índice de geoacumulación se encuentra en el intervalo de no contaminante, sin perder de vista que el Ba es un elemento abundante que no representa un problema real para los organismos (Suwa *et al.*, 2008). Por eso es que su determinación en otros lagos no lo consideran tan importante; sin embargo, en los lagos y presas de Polonia se aprecia que la concentración se encuentra muy baja, conforme lo reportado en la CCS ($628 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Rudnick, 2003) lo que se relacionaría directamente con la mineralogía.

El Cr es un elemento que ha visto incrementada su concentración con el pasar de los años, muy probablemente por el proceso de curtido que se lleva a cabo en León, Guanajuato (INEGI). De igual forma, la práctica del cromado en la industria en lugares como Toluca resulta como otra fuente potencial de cromo, sin embargo el factor de enriquecimiento indica un origen litogénico. Tal como se puede ver en la Tabla 6.5, el Lago de Chapala presenta valores muy similares a lagos como el Bangalore (India) y Ned Wilson (EUA) donde la presencia de dicho elemento la relacionan con la litología del lugar y actividades antropogénicas, en donde indican que las segundas tienen una gran repercusión.

El Cu muestra una concentración inferior en los sedimentos con respecto de lo reportado previamente, quizá porque se empezó a cambiar el entubado de cobre por PVC en el abastecimiento de agua potable (INEGI, 2010). Se muestra una inconsistencia con lo reportado por Trujillo-Cárdenas *et al.* (2010), ya que hay un ligero incremento, probablemente por el uso de insecticidas y fungicidas. Observando que en lagos como el Bangalore en la India muestra un alto enriquecimiento de Cu con respecto a la CCS, atribuido principalmente a la actividad industrial de la región, y contrastando en Polonia la concentración de elementos traza de los sedimentos en sistemas lénticos es muy bajo, sugiriendo que se debe a la existencia de plantas tratadoras de agua.

En cuanto al Ni, los valores reportados pueden considerarse uniformes, resaltando que la concentración es baja con respecto del reportado para la corteza continental superior, en la que se reporta $47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, además de acuerdo al valor del índice de geoacumulación, se considera como no contaminante. En lagos europeos y estadounidenses se verifica una concentración muy baja del elemento en cierta medida por la litología de la cuenca, pero también por el tratamiento que se les da a los residuos, mientras que en el Lago Bangalore en la India, hay un enriquecimiento por causa antropogénica. Esto muestra una gran diferencia en el modo de tratar a los sistemas acuáticos, dependiendo de los países involucrados.

Para el Pb existe una amplia variabilidad de los datos obtenidos, encontrando que los reportados en este trabajo, concuerdan con los de las muestras de hace 20 años, que puede ser un reflejo de que, a pesar del incremento de Pb, por diversos factores, actualmente los tratamientos a residuos, se muestran funcionales y se puede mejorar la calidad del sistema, además de considerar que al ser un sistema RAMSAR, existe el compromiso nacional de cuidarlo.

Para el Zn se encontró un enriquecimiento, ya que en la corteza continental superior lo encontramos en una concentración de 67 mg kg^{-1} ; a diferencia de otros elementos, el Zn ha aumentado su presencia, probablemente por el proceso de galvanizado en la industria presente en la cuenca.

El Cr y el Zn se encuentran asociadas principalmente a la fracción litógenica, lo que puede explicarse con sustituciones estructurales entre cationes, con respecto de las arcillas.

De forma general el Lago de Chapala en sus sedimentos no se puede considerar contaminado y, comparando con otros lagos, la concentración de los elementos traza en sus sedimentos está muy relacionada con la litología tanto de la cuenca de drenaje como del lugar, y el tratamiento de las aguas residuales.

6.7. Movilidad geoquímica

De acuerdo con Hansen et al. (2001), es muy recomendable realizar el estudio de biodisponibilidad, el cual fue realizado en dos trabajos previos, según lo reportado por Rosales Hoz et al. (2000) y Trujillo-Cárdenas et al. (2010), en el primer caso encuentra biodisponibilidad para elementos como son: Cu, Cr, Ni, Pb, Zn y Fe, para el segundo caso reportan una gran biodisponibilidad para Pb y Cr, una disponibilidad media para Mn, Ni, Cu y Zn, mientras en la presente investigación sólo se encuentra que de forma biodisponible están el Ba y Mn, ya que son los únicos elementos presentes en la fracción intercambiable y carbonatada. Esto puede ser por el simple hecho de que han aumentado el número de represas a lo largo de la cuenca Lerma-Chapala, además de que se ha incrementado la cantidad de plantas tratadoras de agua, reduciendo el aporte de metales que puedan precipitar con el sedimento.

7. CONCLUSIONES

Las condiciones fisicoquímicas del agua muestran un cuerpo de agua no estratificado.

El sedimento superficial en el Lago de Chapala presenta un tamaño de partícula fino, de arenas a arcillas, predominando las primeras en la zona de la Ribera, y en las otras dos áreas predominan los limos y limo-arcilloso.

Los minerales presentes corresponden a plagioclasas cálcicas en su mayoría y las arcillas presentes son del grupo de las esmectitas, quienes retienen a los elementos pesados en su estructura mineral.

La presencia de materia orgánica y carbonatos es bastante homogénea en el sistema, salvo en la región Lerma-Santiago donde se ve disminuida su concentración.

Se identifican 3 zonas principales, denominadas Centro del lago, Lerma-Santiago y Ribera, de acuerdo con el análisis estadístico, realizado en función de la composición química de elementos mayores, materia orgánica, carbonatos y granulometría.

El Lago de Chapala se considera un ambiente poco contaminado en su sedimento superficial, de acuerdo con los valores obtenidos para el índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento.

Los elementos potencialmente móviles y biodisponibles en el Lago de Chapala son el Ba y el Mn, asociados a las fracciones carbonatada y la intercambiable, mientras que los elementos Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn se encuentran principalmente en la fracción litogénica.

8. LITERATURA CITADA

- Adamo, P., Arienzo, M., Imperato, M., Naimo, D., Nardi, G., Stanzione, D., 2005.** Distribution and partition of heavy metales in surface and sub-surface sediments of Naples city port. *Chemosphere*. 61, 800-809.
- Ahumada, R. 1998.** Metales traza (Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb, V y Zn) en los sedimentos del Seno Aysén: Línea base y alteraciones ambientales. *Cienc. Tecnol. Mar.*, 21,73-86.
- Ahumada, R. & A. Rudolph. 2004.** Trace metals and other constitutive components in two sediment cores from a remote glacier-fed estuarine lagoon in southern Chile. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 59(2),231-236.
- Ahumada, R., E. González & J.Y. Neira. 2004.** Especiación de Zn en sedimentos marinos del fiordo Aysén. *Invest. Mar.*, Valparaíso, 32(1), 3-10.
- Alcocer, J, Bernal-Brooks, F. W. (2010), *Limnology in Mexico*, *Hydrobiologia*, 644, 15-68.
- Alcocer, J., Kato, E., Robles, E., Vilaclara, G., 1988.** Estudio preliminar del efecto del dragado sobre el estado trófico del lago viejo de Chapultepec. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 4(1), 43-56.
- Andrade, L., Covelo, E. F., Vega, F. A. ,2005).** Uso de arcillas especiales para depuración de aguas residuales, *Información tecnológica*, 16,3-10.
- Barba Brioso, C., Delgado R., J., Fernández C., J. C. 2008.** Distribución de elementos pesados en las fracciones geoquímicas de un suelo agrícola afectado por los lixiviados ácidos de Filón Norte (Minas de Tharsis, Huelva). *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 10, 111-114.
- Belzile, N., R Lecompte & A. Tessier. 1989.** Testing readsorption of trace elements during chemical extractions of bottom sediments. *J. Environ. Sci. Technol.*, 23(8), 1015-1020.
- Birch, G.F., S.E. Taylor & C. Matthai. 2001.** Small scale spatial and temporal variance in the concentration of heavy metals in aquatic sediments: a review and some new concepts. *Environ. Pollut.*, 113, 357-372.
- Buffle, J. 1998.** *Complexation Reactions in Aquatic Systems*. Ellis Horwood Limited, Halted Press, Chichester, 692 p.
- Byers, Sch., C.E.L. Mills & RL. Steward. 1978.** A comparison of methods of determining organic carbon in marine sediments with suggestions for a standard method. *Hidrobiología*, 58(1), 43-47.
- Calvert, S.E. 1976.** The mineralogy and geochemistry of near-shore sediments. Pp. 187-280 In: J.P. Riley & R. Chester (eds.). *Chemical Oceanography*. Academic Press, New York.
- Castañé, P.M., Topalián M.L., Cordero R.R., A. Salibián, 2003).** Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad, *Rev. Toxicología*, 20,13-18.

- Chávez-Alcántar, A., Velázquez-Machuca, M., Pimentel-Equihua, J. L., Venegas-González, J., Montañez-Soto, J. L., Vázquez-Gálvez, G., 2011.** Hidroquímica de las aguas superficiales de la Ciénega de Chapala e índice de calidad de agua. *Terra Latinoamericana*, 29,, 83-94.
- Cotler, H., 2004** La cuenca Lerma-Chapala: algunas ideas para un antiguo problema. *Gaceta Ecológica*. 71
- Cotler, H., Gutiérrez, S., 2005.** Inventario y evaluación de presas de la cuenca Lerma-Chapala. Instituto Nacional de Ecología, México, 198-210.
- Covarrubias Villa F., Ojeda Sampson, A., Arceo Ortega, M. G., 2007.** Las condicionantes del desarrollo turístico del Lago de Chapala y su ribera. *Quivera*. 9, 195-229.
- Curi, A., Granda, W., Hernani, M., Sousa, W., 2006.** Las zeolitas y su aplicación en la descontaminación de efluentes mineros, *Información tecnológica*, 17, 111-118.
- Del Águila Juárez, P., Lugo de la Fuente, J., Vaca Paulín, R., 2005.** Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del Río Lerma. *Ciencia Ergo Sum*. 12, 155-161.
- Díaz-Vargas, Migdalia, Elizalde, E. E., Quiroz, H. García, J., Molina I., 2005.,** Caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos del agua y sedimento del Lago Zempoala, Morelos, México, *Acta Universitaria (Universidad de Morelos)*, 15, 57-65.
- Dundar, M. S., Altundag, H., Eyupoglu, V., Serkan, C., Keskin, C., 2012.** Determination of heavy metals in lower Shakarya Rivers sediments using a BCR-sequential extraction procedure. *Environ. Monit. Assess.* 184, 33-41.
- Espinoza, L. F., Parra, J. P., Villamil, C., 2011.** Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la ciénega grande de Santa Marta, Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 40, 7-23.
- Fernex, F., Zárate del Valle, P., Ramírez Sánchez H., Michaud, F., Parround C., Dalmasso, J., Barci-Funel, G., Guzmán-Arroyo, M., 2001,** Sedimentation rates in Lake Chapala(western Mexico): possible active tectonic control. *Chem. Geol.*, 177, 213-228.
- Filgueiras, A. V., Lavilla, I., Bendicho, C., 2002.** Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. *J. Environ. Monit.* 4, 823-857.
- Flemming, B. W., 2000).**A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams, *Continental Shelf Research*, 20, 1125-1137.
- Folk, R.,2002. *Petrology of sedimentary Rocks*, The walter geology library. .?Cita rara, no completada.

- Ford T., Ryan D., 1995.** Toxic metals in aquatic ecosystems: a microbiological perspective, *Environmental Health Perspectives*, 103:25-28.
- Förstner, U., G. Müller & R. Staffers. 1978.** Heavy metals contamination in estuarine and coastal sediment: source, chemical association and diagenetic effects. In: *Biogeochemistry of Estuarine Sediments*. Proceeding of UNESCO/SCOR Workshop. UNESCO, Paris, pp. 49-69.
- García Rico, L. Soto Cruz. M. S., Jara Marini, M. E., Gómez Álvarez A. 2004.** Fracciones geoquímicas de Cd, Cu, Cr y Pb en sedimentos costeros superficiales de zonas ostrícolas del Estado de Sonora, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 20(4), 159-167.
- Gaudette, H., W. Flight, Toner L. & D. Foldger. 1974.** An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *J. Sediment. Res.*, 44(1): 249-253.
- Hansen A. M., Van Afferden M., 2001, *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Kluwer Academic/Plenum Publishers New York. U. S. A. , 377 pp.
- Hendozco, E., Szefer, P., J. Warzocha, 2010.** Heavy metals in Macoma Balthica and extractable metals in sediments from the southern Baltic Sea. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 73, 152-163.
- Hernández Madrigal, V. M., Garduño-Monroy V. H., Ibáñez-Garduño, D., Arreygue-Rocha, E., R. Álvarez , 2005.** Estudio del deslizamiento de masa en la ribera noroeste del Lago de Chapala, Jal., México. *Geotermia.* 18(2), 21-31.
- Hernández-Paredes, O., 2006.** Evaluación general de la distribución agua-sedimento de metales potencialmente tóxicos presentes en la cuenca Lerma-Chapala. Tesis de Maestría, PCMyL, UNAM.
- Howard, J.L. & W. J. Vandenbrink, 1999.** Sequential extraction analysis of heavy metals in sediments of variable composition using nitrilotriacetic acid to counteract resorption. *Environ. Pollut.* 106, 285-292.
- Hwang, K. Y., Kim, H. S., and I. Hwang, 2011,** Effect of resuspension on the release of heavy metal and water chemistry in anoxic and oxic sediments, *Clean Soil and Water*, 39, 10, 908-915.
- Juan-Aracil, I. R., 2011.** Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en suelos de la comunidad de Madrid. Memoria para obtener grado de doctor. Universidad Complutense de Madrid.
- Kyung-Yup H., Hong-Seok, K., H. Inseong, 2011.** Effect of resuspension on the release of heavy metals and water chemistry in anoxic and oxic sediments. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 39(10), 908-915.
- Libes, S.M. , 1992.** *An Introduction to Marine Biogeochemistry.* John Wiley & Sons, New York, 734 pp.

- Lizano, G. O., Alfaro, E. J., A. Salazar Matarrita, 2011.** Un método para evaluar el enriquecimiento de metales en sedimentos marinos en Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 60, 197-211.
- López-Julián, P. L., J. M. Mnadado Collado, 2002.** Extracciones químicas de metales pesados. Aplicación en Ciencias Geológicas. *Estudios Geol.* 58, 133-144.
- Loring, D.H. & G. Asmund. 1989.** Heavy metals contamination of a Greenland fjord system by mine waste. *Environ. Geol. Water Sci.*, 14: 61-71.
- Loring, D.H. & G. Asmund. 1996.** Geochemical factors controlling accumulation of major and trace elements in Greenland coastal and fjord sediments. *Environ. Geol.*, 28), 2-11.
- Luoma, S.N. & J.A. Davis. 1983.** Requirements for modelling trace metal partitioning in oxidized estuarine sediments. *Mar. Chem.*, 12: 159-181.
- Márquez, A., Senior, W., G. Martínez, 2000.** Concentraciones y comportamientos de metales pesados en una zona estuarina de Venezuela. *Interciencia*, 25, 284-291.
- Martin, J.M., P. Nirel & A.J. Thomas, 1987.** Sequential extraction techniques: promises and problems. *Mar. Chem.*, 22, 313-341.
- Matesanz Sáez, E., 2011.** Aplicaciones de la difracción de rayos x por el método del polvo, C. A. I. de Difracción de Rayos X, Universidad Complutense de Madrid, España, 44 pp. (Versión 2011/10/24).
- Mook, D. & C. Hoskin, 1982.** Organic determinations by ignition: caution advised. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 15, 697-699.
- Provoost, J., Cornelis C., F. Swartjes, 2006.** Comparison of soil clean-up standards for trace elements between countries: Why do they differ?. *Journal of Soils and Sediments.* 6(3), 173-181.
- Rainbow, P., 1995.** Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 31 , 183-192.
- Ramírez, J. J. and J.F. Noreña, 2004.** Caracterización del sedimento de una laguna tropical rasa. *Caldasia*, 26, 173-184.
- Ramos, A., I, Legorburu1990.** Impacto ambiental por metales pesados en sedimentos superficiales de los estuarios exteriores de Guipuzcoa. *Lurralde*, 13,157-164.
- Rapin, F., Tessier, A., Campbell P.G.C. & R. Carignan. 1986.** Potential artifacts in the determination of metal partitioning in sediments by sequential extraction procedure. *J. Environ. Sci. Technol.*, 20, 836-840.
- Rasmussen, R.E., 1996.** Trace metals in the environment: a geological perspective. *Geological Survey of Canada. Bulletin*, 429, 1-26.

- Rizzo, A., Daga, R., Arcagni M., Pérez Catán, S., Bubach, D., Sánchez, R., Ribeiro Guevara, S., M.A. Arribére, 2010.** Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos de lagos andinos de Patagonia Norte. *Ecología Austral*, 20, 155-171.
- Rodríguez Reinoso, F., 2004.** Adsorbentes en la Solución de Algunos Problemas Ambientales. Programa CYTED, España, 212 pp.
- Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A. and M. López-Hernández, 2000.** Heavy metals in sediments of a large, turbid tropical lake affected by anthropogenic discharges. *Environmental Geology*. 39, 378-383.
- Rosales-Hoz, L., Cundy, A. B., J.L. Bahena-Manjarrez, 2003.** Heavy metals in sediment cores from a tropical estuary affected by anthropogenic discharges: Coatzacoalcos estuary, Mexico, *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 58, 117-126.
- Rosas-Elguera, J., J. Urrutia-Fucugauchi, 1998.** Tectonic control of the volcano-sedimentary sequence of the Chapala Graben Western Mexico. *International Geology Review* 40, 350-362.
- Samecka-Cymerman A. and A.J. Kempers, 2001** Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification. *The Science of the Total Environment* 281, 87-98
- Sarmiento, A. M., Casiot, C., Nieto, J. M., Elbaz-Poulichet, F., M. Olías, 2005.** Variación estacional en la especiación y movilidad de Fe y As en aguas afectadas por drenajes ácidos de mina en la cuenca del Río Odiel (Huelva). *Geogaceta*, 37, 115-118.
- Silva, N., C. Calvete & H. Sievers, 1997.** Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero CIMAR 1 Fiordo). *Cienc. Tecnol. Mar*, 20, 23-106.
- Silva, N., C. Calvete & H.A. Sievers, 1998.** Masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre Puerto Montt y laguna San Rafael, Chile (Crucero CIMAR 1 Fiordo). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21, 17-48.
- Silva, N. and R. Prego, 2002.** Carbon and nitrogen spatial segregation and stoichiometry in the surface sediments of southern Chilean inlets (41°-56°S). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 55: 763-775.
- Soltan, M. E., Rashed, M. N., G.M. Taha, 2006.** Heavy metal level and adsorption capacity of Nile River sediments. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 80 , 167-186.
- Sosa-Nájera, S., Lozano-García, S., Roy, P., M. Caballero, 2010.** Registro de sequías históricas en el occidente de México con base en el análisis elemental de sedimentos lacustres: El caso del Lago Santa María del Oro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 437-451.
- Spijker, J, Mol, G., L. Posthuma, 2011,** Regional ecotoxicological hazards associated with anthropogenic enrichment of heavy metals. *Environ. Geochem. Health*, 33, 409-426.

- Strickland, J.H.D. & T.R. Parsons, 1968.** A Practical Handbook of Seawater Analysis. Fish. Res. Board. Can., Bull., 167, Ottawa, 310 pp.
- Stumm, W. & J.J. Morgan, 1981.** Aquatic Chemistry: an Introduction Emphasizing Chemical Equilibrium in Natural Waters. A Wiley Interscience Publication, New York, 780 pp.
- Tereshchenko, I., Filonov, A., Gallegos, A., Monzón C., R. Rodríguez, 2002.** El Niño 1997-98 and the hydrometeorological variability of Chapala, a shallow tropical lake in Mexico. *Journal of Hydrology*, 264, 133-146.
- Tessier, A., Campbell P.G.C. & M. Bisson, 1979.** Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.*, 51, 844-851.
- Tessier, A. & P.G.C. Campbell, 1988.** Partitioning of trace metals in sediments. Pp. 183-199 in: J. Kramer & H. Allen (eds.). *Metal speciations: theory, analysis and application*. Lewis Publishers, Chelsea
- Trullillo-Cárdenas, J. L., Saucedo T. N., Zárate del Valle, P. F., Ríos-Donato, N., S. Gómez-Salazar, 2010.** Speciation and sources of toxic metals in sediments of Lake Chapala, Mexico. *J. Mex. Chem. Soc.*, 54(2),79-87.
- Urrutia, R., Yevenes, M., R. Barra, 2002.** Determinación de los niveles basales de metales traza en sedimentos de tres lagos andinos de Chile: Lagos Chungará, Laja y Castor. *Bol. Soc. Chil. Quim.* 47 (4), doi: 10.4067/S0366-16442002000400017.
- Vilar, S., Gutiérrez, A., Antezana, J., Carral, P., A. Álvarez, 2003.** Estudio comparativo de diferentes métodos de extracción secuencial para metales pesados en suelos. *Boletín Geológico y Minero*. 114(4), 453-461.
- Vives de Andrés J. B., 2003.** Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos, (Aguas, sedimentos y organismos), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, , 148 pp.
- Wakida F. Lara-Ruiz T. D. Temores-Peña J. Rodriguez-Ventura J. G. Diaz E Garcia-Flores C., (2008)** Heavy metals in sediments of the Tecate River, Mexico, *Environ Geol* 54:637–642.
- Walkley, A., 1947.** A Critical examination of a rapid method for determination of organic carbon in soils - effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63,251-257.
- Walkley, A. and I. A. Black, 1934.** An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37,29-37.
- Wen, L.-S., Santschi, P. , Gill, G. & C. Paternostro, 1999.** Estuarine trace metal distributions in Galveston Bay: importance of colloidal form in speciation of dissolved phase. *Mar. Chem.*, 63, 185-212.

Zárate- del Valle, P. F., Rushdi, A. I., B. R.. T., Simoneit, 2006. Hydrothermal petroleum of Lake Chapala, Citala Rift, western Mexico: Bitumen compositions from source sediments and application of hydrous pyrolysis. *Applied Geochemistry*, 21, 701-712.

http://www.globalnature.org/bausteine.net/f/7176/DEFICITDELLAGODECHAPALA_Presentation.pdf?fd=0

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>

http://www.coniunctus.amc.edu.mx/libros/amc_agua.pdf

<http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=2173>

Fecha de Publicación: 20/5/2009 **Lecturas:** 4868 **Fecha de Impresión:** 21/2/2012

http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong_nal_06/tema_05/22_zaire_gonzalez.pdf

http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/QA/EO/QAO-10.pdf

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipio/15056a.html>

<http://www.geologia.uson.mx/academicos/monreal/CursoSedimentologia/Introduccion%20Sedimentologia.ppt>
#264,12,Diapositiva 12

http://www.google.com.mx/imgres?biw=1053&bih=582&tbm=isch&tbnid=aU5ZEyJWzIDfiM:&imgrefurl=http://www.aiu.edu/publications/student/spanish/180-207/sedimentologia-sedimentology.html&docid=g_8nwqu8Y8FtQM&itg=1&imgurl=http://www.aiu.edu/publications/student/spanish/180-207/images/sedimentologia/image073.gif&w=419&h=371&ei=L0R9UpWuCa7NsQSpYKYBg&zoom=1&iact=rc&dur=813&page=2&tbnh=146&tbnw=165&start=15&ndsp=21&ved=1t:429,r:31,s:0,i:173&tx=64&ty=97

ANEXOS

Anexo 1.. Coordenadas de las estaciones de muestreo.

Estación	Longitud. O	Latitud. N
C11	102.96331	20.18889
C14	102.79114	20.27072
C15	102.79739	20.20633
C16	103.41651	20.27698
C17	103.25447	20.19189
C21	102.79506	20.17039
C22	102.76279	20.17701
C24	102.75589	20.24179
C28	102.82121	20.30574
C29	103.01908	20.3308
C30	103.12477	20.32393
C31	103.21466	20.28931
C32	103.33216	20.2836
C33	102.77058	20.19728
C34	102.78393	20.19893
C35	102.78072	20.22488
C36	102.76582	20.25911
C37	102.78004	20.29131
C38	102.79777	20.3135
C4	103.154	20.234
C6	103.308	20.222
C8	103.08974	20.27092
C9	102.98662	20.27752
G1	102.94565	20.18147
G2	102.94573	20.18138

Anexo 2. Valores obtenidos conforme las titulaciones en porcentajes de materia orgánica y carbonatos en los sedimentos de las estaciones, acorde con la zona en la que se encuentran.

Zona	Estación	[Mat org]%	%CaCO ₃
Ribera	C16	1.30	3.09
	C28	0.69	4.20
	C29	1.57	4.30
	C32	0.76	3.02
	C38	1.65	8.80
Lerma -Santiago	C14	0.61	3.21
	C15	0.46	2.31
	C21	1.19	2.94
	C22	0.43	3.73
	C24	0.44	2.40
	C33	0.01	0.62
	C34	1.62	0.28
	C35	0.39	3.62
	C36	0.48	2.90
C37	0.32	3.35	
Centro del lago	C11	1.09	4.63
	C17	0.96	3.31
	C1G	0.70	3.71
	C2G	1.19	2.94
	C4	1.14	6.97
	C6	1.24	2.62
	C9	1.33	3.57

Abexo 3. Concentración de elementos mayores (%?) determinada por FRX en las muestras sedimentarias analizadas

Zona	Estación	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC
Ribera	C16	60.64	0.47	20.26	3.40	0.05	1.34	6.27	4.03	1.44	0.12	2.78
	C28	55.04	0.91	17.43	7.07	0.19	2.38	5.25	2.55	1.58	0.31	7.39
	C29	62.25	0.50	16.75	4.66	0.07	1.27	3.28	3.02	2.59	0.31	5.90
	C32	63.48	1.07	15.47	5.66	0.06	1.31	3.05	2.66	3.63	0.18	4.23
	C38	59.64	0.68	16.84	4.21	0.12	1.19	6.23	2.87	1.42	0.60	6.37
Lerma -Santiago	C14	56.00	0.82	18.29	6.62	0.11	1.31	1.37	0.65	1.28	0.16	14.06
	C15	57.47	0.84	16.58	5.99	0.14	1.28	1.66	0.88	1.39	0.27	14.03
	C21	50.17	0.74	18.42	6.61	0.11	1.43	1.49	0.47	1.16	0.18	19.81
	C22	55.25	0.79	17.59	6.39	0.14	1.37	1.50	0.59	1.24	0.21	15.82
	C24	54.17	0.82	18.82	6.77	0.12	1.51	1.33	0.50	1.23	0.15	15.29
	C33	54.21	0.86	17.83	6.58	0.10	1.41	1.48	0.55	1.27	0.16	15.61
	C34	58.00	0.81	17.25	6.07	0.10	1.28	1.49	0.85	1.39	0.15	13.44
	C35	54.66	0.83	17.90	6.47	0.10	1.38	1.40	0.64	1.12	0.17	15.82
	C36	52.10	0.81	20.50	7.24	0.12	1.55	2.12	0.82	1.09	0.26	14.18
C37	57.06	0.82	17.09	6.23	0.10	1.29	1.55	0.70	1.34	0.17	14.49	
Centro del lago	C11	51.52	0.79	18.73	7.33	0.13	1.78	2.48	0.42	1.04	0.19	16.44
	C17	56.80	0.77	18.66	7.48	0.11	3.24	6.35	3.42	1.32	0.17	2.17
	C1G	52.40	0.78	20.49	7.26	0.11	1.89	2.80	1.21	1.05	0.19	12.45
	C2G	51.64	0.81	19.73	7.64	0.13	1.69	1.85	0.58	1.12	0.20	15.25
	C4	50.62	0.78	19.24	7.02	0.13	1.61	2.87	0.34	1.05	0.24	16.95
	C6	51.87	0.73	19.16	6.85	0.13	2.04	4.61	1.55	1.14	0.24	12.40
	C9	50.41	0.78	19.66	7.42	0.14	1.81	2.32	0.37	1.09	0.22	16.44

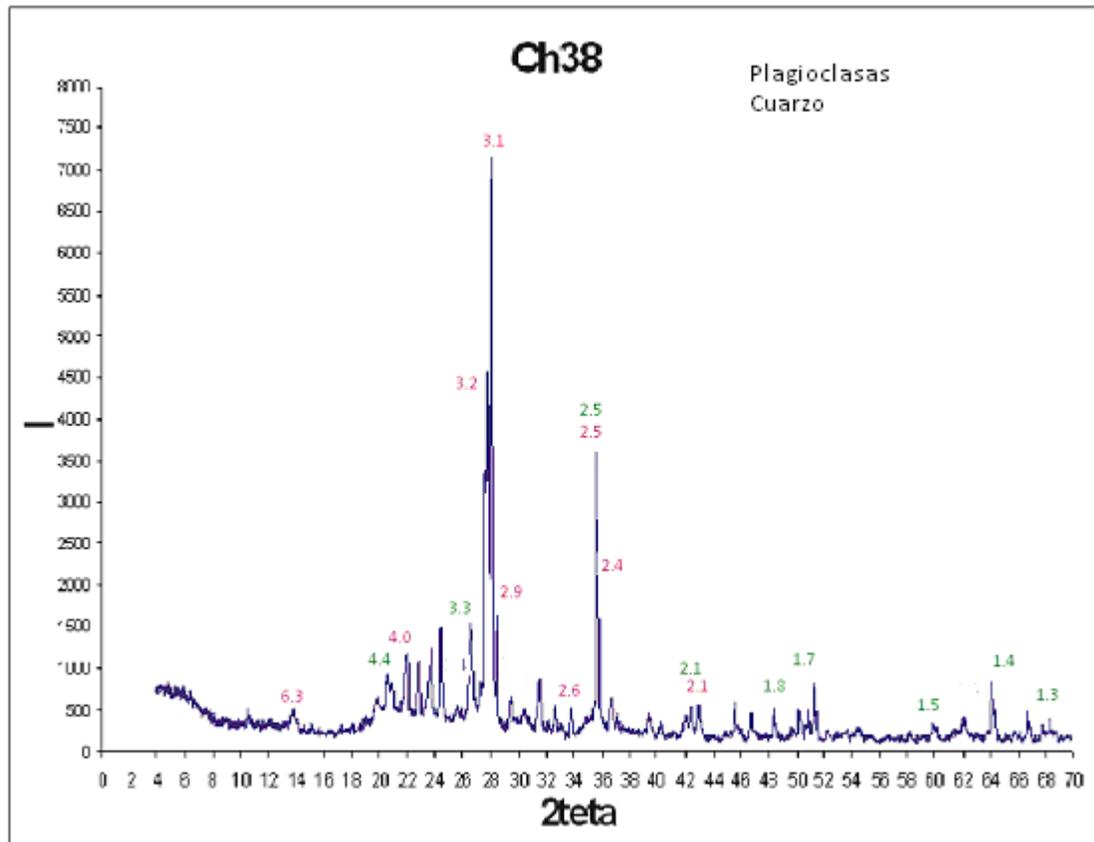
Anexo 4.. Determinación de percentiles para determinar las características granulométricas.

Percentil	Φ5	Φ16	Φ25	Φ50	Φ75	Φ84	Φ95
4	2.2	3.2	3.6	4.7	5.8	6.6	7.2
6	2.8	3.8	4.4	6.0	7.4	7.9	8.8
8	-2.9	1.2	1.4	1.6	2.2	2.6	3.2
9	2.4	3.3	3.8	5.1	7.0	7.6	8.6
11	2.2	3.1	3.4	4.4	5.4	5.8	7.0
14	2.6	3.8	4.0	5.1	6.2	6.6	7.2
15	2.8	3.9	4.4	5.8	7.0	7.6	8.4
16	2.2	2.6	2.9	3.4	7.8	8.6	9.5
17	-4.4	-3.6	-3.0	-1.2	0.8	1.4	2.6
21	2.8	3.7	4.3	5.6	7.2	7.8	8.6
22	2.8	3.6	4.1	5.2	6.2	6.8	7.6
24	2.4	3.3	3.6	4.7	5.8	6.7	7.2
28	-5.0	-2.3	-1.0	1.0	2.2	2.6	3.7
29	0.8	1.6	1.8	2.4	2.9	3.2	3.6
30	1.6	2.2	2.3	2.6	3.1	3.2	3.6
31	-1.1	-0.1	0.2	0.8	1.4	1.6	2.0
32	-1.9	-0.8	-0.4	0.8	2.1	2.8	4.0
33	2.6	3.5	3.9	5.2	6.5	7.2	8.0
34	2.8	3.6	4.2	5.6	7.1	7.6	8.4
35	2.6	3.4	3.9	5.1	6.4	6.8	7.6
36	2.8	3.6	4.2	5.4	7.0	7.4	8.4
37	3.0	4.0	4.6	5.9	7.1	7.4	8.2
38	-3.0	1.8	2.2	2.6	3.4	5.1	8.4
1G	2.4	3.2	3.6	4.6	5.8	6.7	8.4
2G	2.7	3.4	3.8	4.9	6.2	6.7	7.8

Anexo 5. Valores de concentraciones (mg kg⁻¹) de elementos traza en los sedimentos superficiales de lago de Chapala determinados por FRX

Zona	Estación	Ba	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
Ribera	C16	451	93	38	32	140	32
	C28	2520	124	47	2	86	16
	C29	477	62	26	26	130	26
	C32	1132	45	22	36	64	13
	C38	469	191	24	25	64	15
Lerma -Santiago	C14	484	83	34	35	136	23
	C15	480	83	30	52	221	23
	C21	416	77	40	45	163	23
	C22	477	77	36	35	167	19
	C24	436	80	35	35	156	26
	C33	464	85	34	39	157	23
	C34	503	90	31	32	156	23
	C35	450	83	33	45	166	20
	C36	497	86	40	27	141	23
C37	519	89	35	40	142	23	
Centro del lago	C11	472	75	41	29	151	23
	C17	661	72	42	32	74	12
	C1G	445	85	38	34	137	24
	C2G	422	79	38	29	150	25
	C4	508	71	41	28	137	21
	C6	477	80	38	33	112	19
	C9	465	77	40	30	148	23

Anexo 6. Difractograma general de los sedimentos superficiales.



Anexo 7. Difractograma realizado para identificación de arcillas.

