

Textura y contenido de materia orgánica de los sedimentos superficiales del Lago de Metztitlán, México

Texture and organic matter content of surface sediments from Metztitlan Lake, Mexico

Alberto Pérez-Rojas¹, Roberto Torres-Orozco B.¹, Alma S. Sobrino-Figueroa² y Giovana J. Loyola-Colín³

Recibido: 09 de febrero de 2016.

Aceptado: 15 de julio de 2021.

Publicado: agosto de 2021.

RESUMEN

Antecedentes: La textura y el contenido de materia orgánica de los sedimentos superficiales de los ecosistemas acuáticos ofrecen información relevante acerca de la naturaleza de los procesos sedimentarios que allí ocurren, además de que ejercen una influencia notable en el aporte de nutrientes en la columna de agua y en la composición y distribución de la biota béntica. **Objetivo:** Debido a que son escasos los estudios sobre las características sedimentarias, en este trabajo se realizó una evaluación de la composición textural y el contenido de materia orgánica de los sedimentos superficiales del Lago de Metztitlán. **Métodos:** Se colectaron 35 muestras de sedimento en las temporadas de secas y lluvias durante 2 años. El análisis granulométrico se realizó mediante la técnica de tamizado en húmedo y pipeteo. El contenido de materia orgánica (MO) se determinó mediante el método de pérdida de peso por ignición a 550°C. **Resultados:** El análisis textural de los sedimentos permitió reconocer un amplio predominio de arcilla limosa en la mayor parte del lago, además de dos grupos menores: limos arcillosos, a lo largo y al frente de la desembocadura del afluente principal, y arcillas francas, en las áreas de menor hidrodinámica. La proporción de materia orgánica en el sedimento varió entre 7 y 12%. Los datos obtenidos no mostraron diferencias significativas entre las épocas del año analizadas. **Conclusiones:** El predominio de sedimentos finos con contenido de materia orgánica, podría tener un papel preponderante en la estructura trófica del lago, al hacer de los detritos una importante vía para el flujo de la energía en el ecosistema.

Palabras clave: Lago de Metztitlán, sedimentos, textura, materia orgánica.

ABSTRACT

Background: Texture and organic matter content of the surface sediments of aquatic ecosystems provide important information about the nature of the sedimentary processes that occur there also to exerting a notable influence on the supply of nutrients in the water column and on the composition and distribution of benthic biota. **Goals:** Due to the lack of antecedents, in this study an evaluation of the textural characteristics and organic matter content of the surface sediments of Lake Metztitlán was carried out. **Methods:** Sediment samples (n= 35) were collected in the dry and rainy season for 2 years. The granulometric analysis was carried out using sieving and pipetting techniques. The content of organic matter (OM) was determined by the ignition technique at 550 °C. **Results:** The textural analysis of sediments allowed to recognize a wide predominance of silty clay in the most of the lake bottom, in addition to two smaller groups: clayey silt, along the front of the mouth of the lake's main tributary, and clays, in the areas of lower hydrodynamic. Furthermore, the proportion of organic matter in the sediments ranged between 7 and 12%. The data obtained did not show significant differences between the seasons of the year analyzed. **Conclusions:** The predominance of fine sediments with content of organic matter, probably have a major role in the trophic structure of the lake being the detritus an important path to the energy flow in the ecosystem.

Keywords: Lake Metztitlán, Mexico, sediments, texture, organic matter.

¹ Laboratorio de Limnología y Geología, Departamento de Hidrobiología, DCBS, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina, Iztapalapa, CDMX, 09340. México

² Laboratorio Alejandro Villalobos, Departamento de Hidrobiología, DCBS, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina, Iztapalapa, CDMX, 09340. México

³ Licenciada en Hidrobiología

*Corresponding author:

Roberto Torres-Orozco B.: alpr@xanum.uam.mx

To quote as:

Pérez-Rojas, A., R. Torres-Orozco B, A. S. Sobrino-Figueroa & G. J. Loyola-Colín. 2021. Textura y contenido de materia orgánica de los sedimentos superficiales del Lago de Metztitlán, México. *Hidrobiológica* 31 (2): 179-191.

DOI: [10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n2/Sobrino](https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n2/Sobrino)

INTRODUCCIÓN

Para la mayoría de los limnólogos y paleolimnólogos, el interés por los sedimentos lacustres radica en el hecho de que en éstos se resume la historia de vida de un lago (Binford *et al.*, 1983; Bradbury, 2000; Isra-de-Alcántara *et al.*, 2010; Ortega-Guerrero & Caballero-Miranda, 2011). Sin embargo, en los sistemas dulceacuícolas también se han estudiado otras propiedades y procesos sedimentarios, tales como la composición, resuspensión y redepositación de sedimentos, la microflora asociada, las tasas de descomposición, la degradación de la materia orgánica, aspectos de contaminación y programas de control (Håkanson & Jansson, 1983; Kalff, 2002; U. S. EPA., 2002; Wetzel, 2001). Aunque el estudio de los sedimentos superficiales de un lago puede brindar información relevante acerca de las condiciones limnológicas que imperan en el presente, todavía son pocos los trabajos que se han hecho en México en este sentido (Pérez-Rojas *et al.*, 2000; Díaz-Vargas *et al.*, 2005; Suárez-Marlen *et al.*, 2013; Ávila-Hendrik *et al.*, 2014).

El lago de Metztlitlán, pertenece a la Región Hidrológica del Alto Pánuco (RH 26) y se encuentra dentro de la Reserva de la Biosfera de la Barranca de Metztlitlán (CONANP, 2003; CONAGUA, 2003).

El lago tuvo su origen en el deslizamiento y depósito de una avalancha de rocas que obstruyó el río Grande de Tulancingo hace unos 500 a 1100 años (Suter, 2004). Aguas arriba, este fenómeno cambió el régimen erosivo del río por el de acumulación de sedimentos aluviales-lacustres, de manera que el típico valle fluvial en forma de V se transformó en un valle intermontano con un cauce y planicie de inundación amplia, casi horizontal, aprovechable para la agricultura, conocida como vega (Lugo-Hubp, 2011).

El lago de Metztlitlán es alimentado principalmente por el río Venados, el cual cambia de nombre a lo largo de su curso de manera que al sur de la Reserva se denomina río Grande de Tulancingo y al norte de la vega, río Metztlitlán. A lo largo de la trayectoria, el río Venados transporta grandes cantidades de sólidos disueltos y suspendidos que tienen como destino final el lago. Asimismo en las riberas de este río se realizan actividades agrícolas, en las cuales se utilizan agroquímicos como fertilizantes, insecticidas, herbicidas, acaricidas y fungicidas (López-Herrera *et al.*, 2015).

El lago tiene una dinámica singular, pues su área superficial varía notablemente año con año. Así por ejemplo, aunque en promedio suele mantener un área de unas 550 ha y 6 m de profundidad, en octubre de 1999 alcanzó 3,338 ha y 30 m, respectivamente; sin embargo, en los años cuando la precipitación es escasa la cubeta lacustre llega a secarse por completo, como ocurrió en julio de 1998, al igual que 10 años atrás (Ibáñez-Aguirre *et al.*, 2002; Mendoza-Cariño *et al.*, 2018). Debido a las alteraciones que tanto la cuenca como la cubeta lacustre han experimentado a través de los años, el lago tiene un área y longitud promedio de 5.52 km² y 14.6 km respectivamente, su forma subcircular y un tanto irregular, de profundidad moderada (2 -10 m), que alberga un volumen de cerca de 20 millones de metros cúbicos de agua y tiene una profundidad promedio de 3.5 metros (Ibáñez-Aguirre *et al.*, 2002; CONAGUA, 2003). Cabe mencionar que, hidrológicamente, el Lago de Metztlitlán y el Río Grande de Tulancingo constituyen los cuerpos de agua naturales más importantes del estado de Hidalgo (García-Arizaga *et al.*, 1996).

Los primeros estudios realizados con los sedimentos del lago de Metztlitlán mostraron que una de sus características relevantes era la gran abundancia de materia orgánica asociada con los materiales arcillosos (Pérez-Rojas, 2000. com per.). Por su parte, Juárez-Flores & Ibáñez-Aguirre (2003), señalaron que los sedimentos del lago son eminentemente arcillosos y con proporciones de materia orgánica de hasta un 15%. Estos estudios denotaron la importancia de conocer con mayor detalle las propiedades texturales de los sedimentos, pues podrían tener un papel importante en la estructura trófica del lago. En virtud de lo anterior, este trabajo tiene por objetivo determinar las características texturales y el contenido de materia orgánica de los sedimentos superficiales del Lago de Metztlitlán y establecer su distribución espacial en este sistema acuático.

ÁREA DE ESTUDIO

El lago de Metztlitlán está localizado en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, entre las coordenadas extremas 20° 39' y 20° 42' N y 98° 49' y 98° 52' O, a una altitud de 1,240 m.s.n.m. Se emplaza en el fondo de una barranca labrada por el río del mismo nombre en la parte central del estado de Hidalgo, en la región conocida como Sierra Alta de Hidalgo (Fig. 1). El clima de esta región es del tipo *Bh(h)*, esto es semicálido con una temperatura promedio anual de 18° a 22 °C (García, 2004), sin embargo, existen variaciones climáticas importantes en áreas muy próximas entre sí. De esta manera, mientras que en la vega del río Metztlitlán el clima es semicálido y seco, con una precipitación anual de 420 mm, en la Sierra, a 1800 metros de altitud y a tan sólo 12 kilómetros de distancia, la precipitación alcanza un promedio de 1750 mm al año (CONANP, 2003; Pérez-Rojas, 2003). Estas lluvias garantizan un constante suministro de agua que drena hacia la vega a través de cauces superficiales y subterráneos. Las lluvias breves pero intensas en la cuenca de Metztlitlán favorecen que el río colme rápidamente el lago y que éste se desborde ocasionalmente sobre el distrito de riego 08 y localidades cercanas (Mendoza-Cariño *et al.*, 2018). La vegetación circundante es variada pero predomina el matorral xerófilo crassicaule espinoso y rosetófilo (López-Herrera *et al.*, 2015). Desde el año 2000, el lago forma parte de la zona de Reserva de la Biosfera "Barranca de Metztlitlán" (SEMARNAP, 1999) y está considerado como un sitio Ramsar (RAMSAR, 2007); esto es, un humedal de importancia para las aves migratorias. El lago también realiza varias funciones ecosistémicas: retiene nutrientes y sedimentos, recarga el acuífero subterráneo, estabiliza las condiciones climáticas locales y es fuente de riqueza biológica y genética (Mendoza-Cariño *et al.*, 2018). En sus márgenes no existen asentamientos humanos. Mientras la vega del río Metztlitlán es una importante región agrícola, el lago sostiene una pesquería basada en la acuicultura, manejada por pescadores de las comunidades de Hualula y San Cristóbal, que produce principalmente tilapia, bagre y carpa para abastecimiento del mercado local.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de sedimentos superficiales se colectaron en 35 estaciones distribuidas en el lago (Fig. 1.), durante dos temporadas contrastantes del año: secas (junio 2007 y 2008) y lluvias (diciembre 2007, septiembre 2008), empleando una draga tipo Ekman de tres litros de capacidad. En cada estación de muestreo se midió la profundidad y

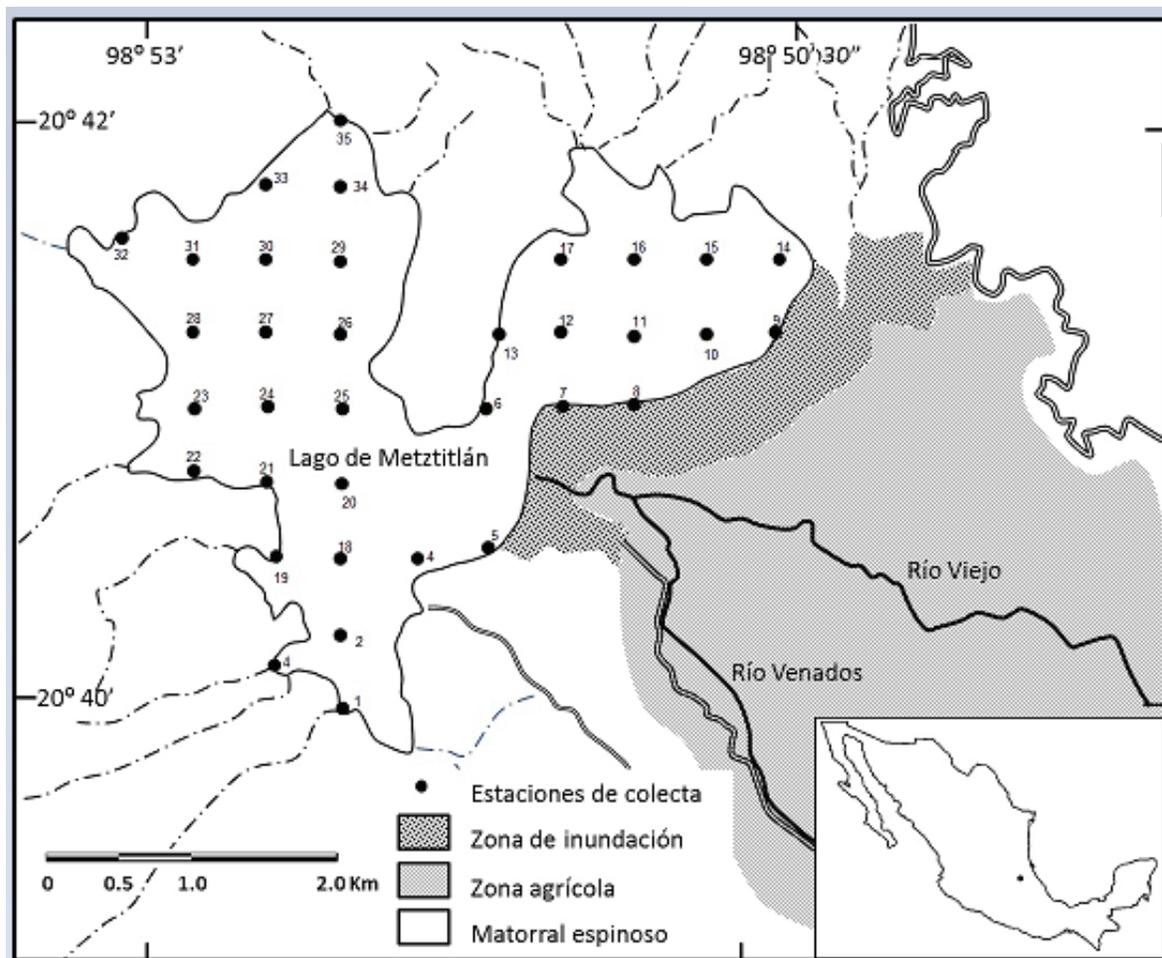


Figura 1. Localización de las estaciones de colecta de sedimentos en el Lago de Metztitlán Hgo.

se registraron las siguientes propiedades de los sedimentos: color, por medio de las tablas de Munsell y olor (organoléptico). Las muestras se guardaron en bolsas de plástico oscuras y se conservaron en refrigeración hasta su procesamiento en el laboratorio.

El análisis granulométrico se realizó mediante las técnicas tradicionales de tamizado y pipeteo propuestas por Folk (1974) y Lewis & McConchie (1994). La fracción arenosa se separó del resto de la muestra por tamizado en húmedo. El porcentaje de la fracción fina (limo y arcilla) se calculó por el método de la pipeta, sobre la base del principio de la Ley de Stokes (1851), según la cual la velocidad de sedimentación de una partícula es directamente proporcional al cuadrado de su diámetro. Con el propósito de conocer la composición mineral de la fracción arcillosa, se seleccionaron las muestras con mayor cantidad de arcillas (4 muestras) y se analizaron por medio del método de difracción de rayos X a intervalo 2θ de 4° a 70° , utilizando un tubo con ánodo de Cu excitado a 30 kV y 20 mA, barriendo a 2° por min (Gibbs, 1968).

El contenido de materia orgánica (MO) se determinó mediante la técnica de pérdida de peso por ignición a 550°C (Dean, 1974). Se eligió esta técnica porque la MO se presenta al menos en pequeñas

cantidades en todos los sedimentos lacustres y es más abundante en los materiales arcillo-limosos. Además, esta técnica permite evaluar todo el material orgánico particulado o disuelto contenido en la muestra.

A los datos obtenidos en el análisis de granulometría y de contenido de materia orgánica, se les aplicó un análisis exploratorio con la prueba de Kolmogorov – Smirnov para probar normalidad ($p < 0.05$). Posteriormente la significancia estadística entre medias se determinó mediante un análisis de varianza (ANOVA), las diferencias significativas entre épocas del año, se determinaron mediante comparaciones post hoc utilizando la prueba de Tukey ($p < 0.05$) (Zar, 1996). Los cálculos se realizaron con el programa InfoStat versión 1.1

Posteriormente, con los datos promedio, se realizó un análisis de correlación múltiple entre los diferentes componentes texturales, para detectar las relaciones entre ellos ($p < 0.05$) utilizando el programa Stata versión 2 (Sokol & Rohlf, 2000), conjuntamente se elaboraron los mapas de distribución de tamaño de partículas (arenas, limos y arcillas) y de grupos texturales y el contenido de materia orgánica total en el sistema acuático.

RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación de profundidad, color y olor de las muestras de sedimentos.

La profundidad promedio registrada en el lago fue de 4.43 m. La zona somera se localizó en la porción noreste del lago (estaciones de muestreo de la 6 a la 17) en este sitio la profundidad promedio es de 1.83 m mientras que el área más profunda se detectó en la porción noroeste del sistema (estaciones de muestreo de la 26 a la 35), aquí la profundidad promedio fue de 7.25 mt.

Tabla 1. Profundidad de los sitios de muestro y propiedades de Color y Olor registradas en las muestras de sedimento del Lago de Metztlitlán Hgo.

Estación	Profundidad (m)	Color	Olor
1	1.5	10yr 7/8	Presente
2	2	10yr 6/6	Ausente
3	3	10yr 6/6	Ausente
4	2.5	10yr 7/8	Ausente
5	2	10yr 7/8	Ausente
6	3.9	10yr 7/8	Ausente
7	1.5	10yr 7/8	Ausente
8	1.3	10yr 7/8	Ausente
9	1.3	10yr 7/8	Ausente
10	2	10yr 7/8	Ausente
11	2	10yr 7/8	Ausente
12	1	7.5yr 5/6	Presente
13	1	7.5yr 5/6	Ausente
14	2	10yr 7/8	Ausente
15	2	10yr 7/8	Ausente
16	2	10yr 7/8	Ausente
17	2	7.5yr 5/6	Presente
18	3	10yr 7/8	Ausente
19	8.3	10yr 7/8	Ausente
20	7	10yr 7/8	Ausente
21	5	10yr 7/8	Ausente
22	4	10yr 7/8	Ausente
23	8.5	10yr 6/6	Ausente
24	7	10yr 7/8	Ausente
25	7	10yr 7/8	Ausente
26	4	10yr 7/8	Ausente
27	9.1	10yr 7/8	Ausente
28	4	10yr 7/8	Ausente
29	5	10yr 7/8	Ausente
30	5	10yr6/6	Ausente
31	8.8	7.5yr 5/6	Presente
32	10.3	7.5yr 5/6	Ausente
33	8.8	10yr 6/6	Ausente
34	8.7	7.5yr 5/6	Presente
35	8.8	7.5yr 5/6	Presente

El color de los sedimentos, de acuerdo con las tablas de Musell varió de 7.5 YR 5/6, 10YR 7/8 y 10 YR6/6, que corresponde a un color grisáceo-café con tonalidades claras y oscuras. Los sedimentos con tonalidades más oscuras se colectaron en la zona norte del sistema, en sitios donde la concentración de MO fue alta (> 10%). La mayoría de las muestras no presentaron olor con excepción de las obtenidas en la zona noroeste del lago (Tabla 1).

El análisis de ANOVA hizo evidente de que no se registraron diferencias significativas entre los datos de granulometría y materia orgánica obtenidos en las diferentes épocas del año analizadas (arena $p = 0.5538$, limo $p = 0.3978$, arcilla $p = 0.995$, Mat Org $p = 0.1730$) (Tabla 2), por esta razón se utilizaron los valores promedio para elaborar los mapas de distribución de tamaño de partículas (arenas, limos y arcillas) y el contenido de materia orgánica total en el lago.

El análisis textural de los sedimentos superficiales permitió reconocer tres grupos en el diagrama ternario de Shepard (1954): a) limos arcillosos, b) arcillas limosas y c) arcillas francas (Fig. 2). Los limos arcillosos aparecen depositados de forma lenticular en la transición del espejo de agua con los terrenos agrícolas, en profundidades menores de 1 m y por lo tanto sujetas a inundaciones periódicas. También se presentan en el interior de la bahía ubicada en el extremo sur del lago, hacia donde son transportados por las corrientes impulsadas por los vientos del norte. El grupo de las arcillas limosas cubre la mayor parte del fondo del sistema acuático, formando depósitos laminares extensos en la parte central de la laguna. Las arcillas, por su parte, se localizan en las zonas que se hallan protegidas del viento y las corrientes generadas por éste, debido a la cercanía de las montañas, en la zona norte de la cubeta lacustre (Fig. 3). En el análisis de correlación múltiple se detectó una relación inversa entre los limos y las arcillas, y entre las arcillas y las arenas (Tabla 3).

Con la finalidad de reconocer detalladamente las facies texturales, se elaboraron mapas de distribución porcentual de los contenidos de arcilla, limo y arena (Fig. 4, 5 y 6). Cabe mencionar que no se observaron sedimentos detríticos gruesos en el interior del lago.

Origen y procedencia. Los sedimentos alóctonos inorgánicos del lago de Metztlitlán están constituidos por lodos y escasas arenas silico-clásticas, que se forman en el exterior del vaso lacustre y son transportados por corrientes superficiales, por escurrimientos, y por la erosión de la línea de costa. El sedimento endogénico (carbonato de calcio) se deriva de la alteración química que sufren las calizas y suelos de tipo fluvisol calcárico circundantes (CRM, 2003; SPP, 1992), seguida de su precipitación y sedimentación en el fondo.

El resultado del análisis por difracción de rayos X de los sedimentos con porcentajes de arcilla mayores de 75% mostró una composición homogénea, representada por arcillas del grupo de las esmectitas (principalmente montmorillonita), además de caolinita, cuarzo y óxidos de zirconio y escandio (Fig. 7). Esto sugiere la procedencia volcánica de los sedimentos, mismos que aquí se mezclan con aportes importantes de carbonatos en disolución que, al precipitarse, actúan como cementante en los lodos, a los que les confieren una fuerte cohesión cuando están húmedos y un notable endurecimiento una vez secos.

Tabla 2. Resultados del análisis de ANOVA realizado con los datos obtenidos en la evaluación de granulometría y de contenido de materia orgánica de las muestras de sedimentos del Lago de Metztlitlán (n = 35) (p < 0.05).

Arena					
Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
arena	140	0.04	0.00	162.82	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
epocas	0.20	3	0.07	0.70	0.5538
Error	4.82	136	0.09		
Total	5.02	139			
Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=0.30589					
<i>Error: 0.0927 gl: 52</i>					
epocas	Medias	n			
III	0.12	14	A		
I	0.14	14	A		
II	0.24	14	A		
IIII	0.25	14	A		
Letras distintas indican diferencias significativas(p <= 0.05)					
Limo					
Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
limo	140	0.05	3.0E-04	35.29	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
epocas	413.20	3	137.73	1.01	0.3978
Error	7122.36	136	136.97		
Total	7535.55	139			
Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=11.75760					
<i>Error: 136.9684 gl: 52</i>					
epocas	Medias	n			
I	30.00	14	A		
III	30.93	14	A		
IIII	35.86	14	A		
II	35.86	14	A		
Letras distintas indican diferencias significativas(p <= 0.05)					
Arcilla					
Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
arcilla	140	3.1E-04	0.00	30.15	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
epocas	5.79	3	1.93	0.01	0.9995
Error	18864.43	136	362.78		
Total	18870.21	139			
Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=19.13500					
<i>Error: 362.7775 gl: 52</i>					
epocas	Medias	n			
II	62.71	14	A		
I	63.07	14	A		
III	63.36	14	A		
IIII	63.57	14	A		
Letras distintas indican diferencias significativas(p <= 0.05)					

Tabla 2. Continúa

Materia orgánica					
Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
materia	140	0.09	0.04	19.08	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
epocas	19.57	3	6.52	1.73	0.1730
Error	196.55	136	3.78		
Total	216.13	139			
Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=1.95320					
<i>Error: 3.7799 gl: 52</i>					
epocas	Medias	n			
III	9.23	14	A		
II	10.27	14	A		
I	10.43	14	A		
III	10.83	14	A		
Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)					

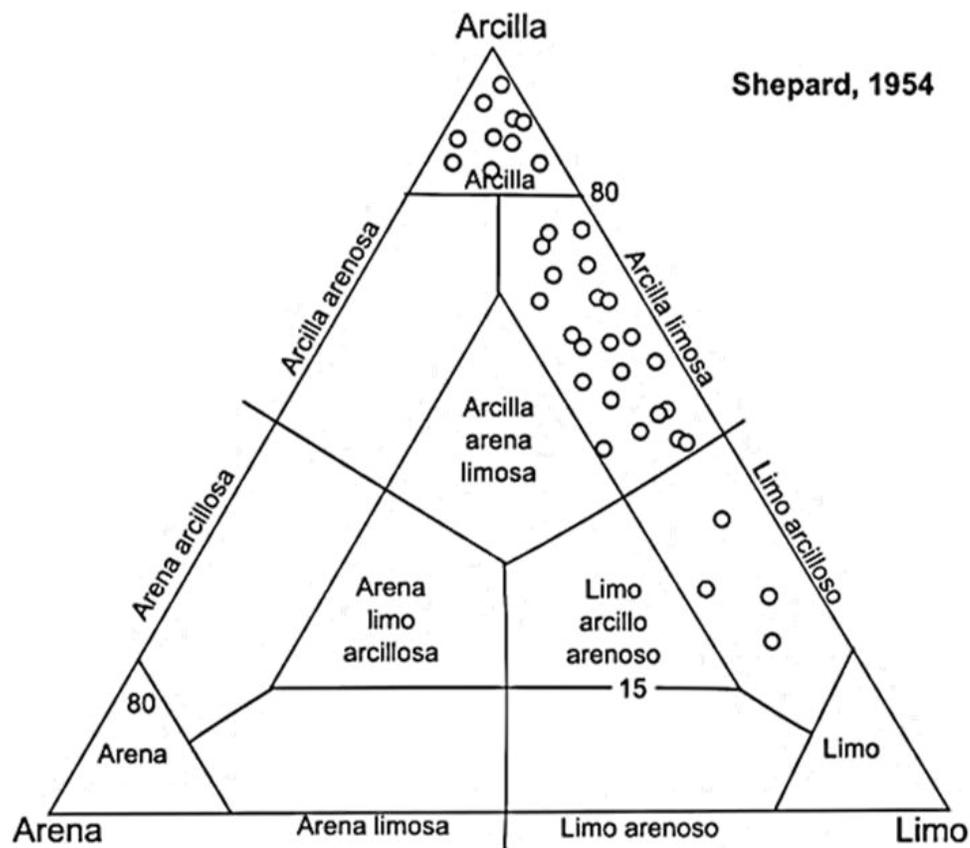


Figura 2. Ubicación de las muestras de sedimentos del Lago de Metztitlán en el diagrama ternario de Shepard de acuerdo con su valor granulométrico.

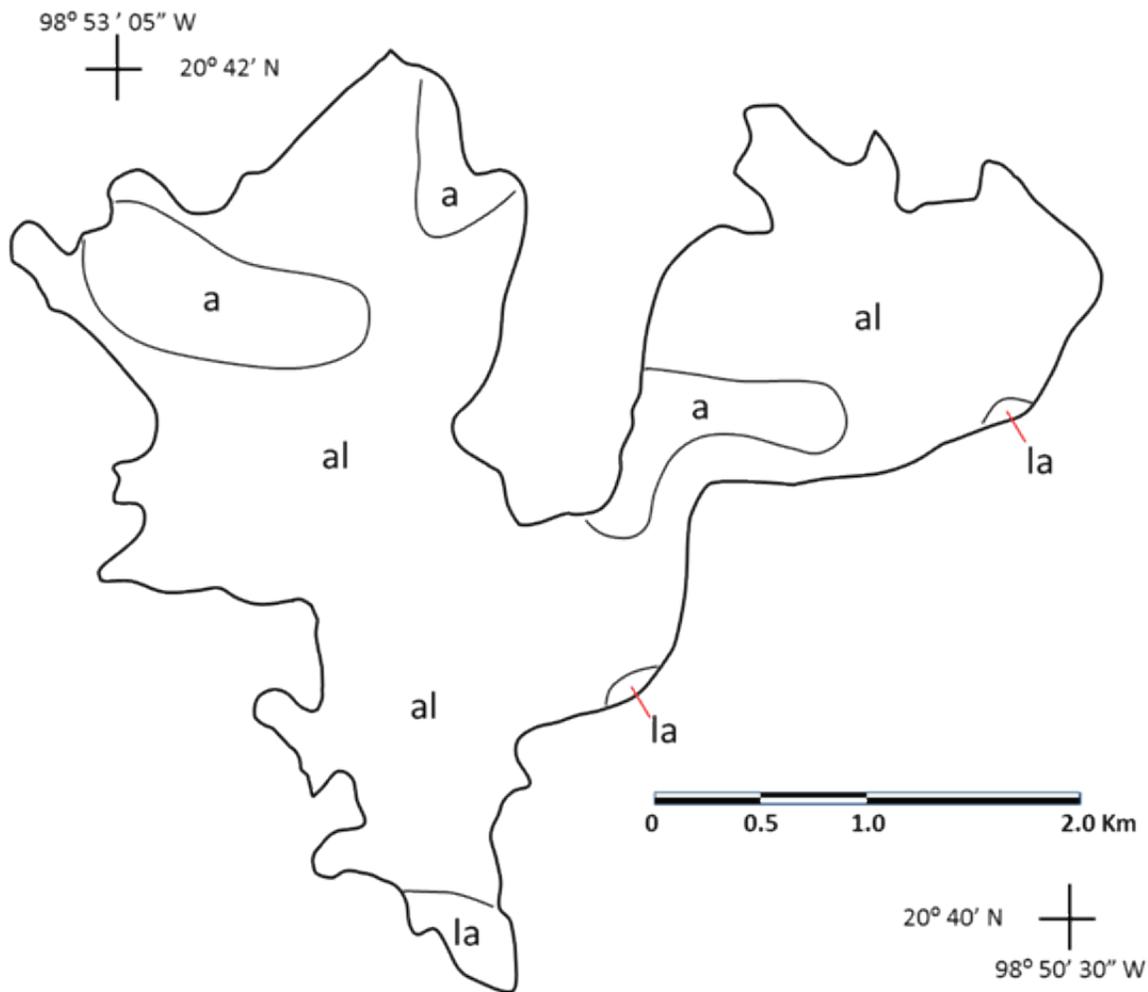


Figura 3. Distribución espacial de los sedimentos recientes del Lago de Metztitlán. Abreviaturas: a) Arcillas, al) Arcillas limosas, la) Limos arcillosos.

La materia orgánica (MO) constituye una fracción importante de los sedimentos superficiales del lago de Metztitlán, cuyo porcentaje varía entre 7 y 12%. Las mayores proporciones de MO coinciden en gran medida con las áreas ricas en arcillas de la parte norte del lago, pero también se presentan en la bahía ubicada en el extremo sur, hacia donde la corriente impulsada por el viento del norte transporta la MO en suspensión y la deposita en la margen más alejada (Fig. 8). Este hecho se corroboró en el análisis de correlación múltiple realizado con los diferentes componentes texturales de los sedimentos, donde se observó una relación directa entre las arcillas y el contenido de materia orgánica de las muestras ($p < 0.05$) (tabla 3). Las arcillas limosas, que predominan en la mayor parte del fondo del lago, están asociadas a valores de MO que varían entre 8 y 11%.

DISCUSIÓN

La historia reciente del Lago de Metztitlán se inicia a partir de la transformación de un sistema lótico de una cuenca abierta en uno

léntico de una cuenca endorreica. La interrupción del flujo de un río y su transformación en un lago produjo notables cambios hidrodinámicos que dieron como resultado una elevada tasa de sedimentación. A partir de la diferencia de altitud entre el nivel actual del fondo del lago y el punto en donde las aguas resurgen al otro lado del represaamiento natural, en un manantial ubicado en el valle de Almolón, a un par de kilómetros al noroeste del lago, Suter (2004) ha estimado que los depósitos lacustres de Metztitlán tienen un espesor aproximado de 250 m, mismos que divididos entre el tiempo transcurrido desde el origen del embalsamiento 500 a 1100 años (Suter, 2004) resultan en una tasa de sedimentación elevada, de 12.5 a 25 cm a^{-1} (Montero, 2008). Se estima que si estas tasas de aporte de sedimentos no disminuyen, para el año 2050, el sistema tendría serios problemas de azolve ocasionando una pérdida en su profundidad y en su capacidad de almacenamiento cercano a un 50%, lo que repercute significativamente en los riesgos de inundación aguas arriba (Mendoza-Cariño *et al.*, 2018).

El transporte en suspensión y la depositación son los procesos dominantes en el lago. Durante la época de lluvias, los sedimentos, la materia orgánica y otros constituyentes adsorbidos a dichos materiales son transportados por el agua y conducidos al lago; al llegar a éste, a medida que la energía de la corriente fluvial se disipa las partículas se depositan progresivamente en función de su tamaño, de tal suerte que las más pequeñas llegan a los puntos más distantes del lago.

El análisis granulométrico permitió distinguir diversas facies de depósito en el ambiente y reconocer a las arcillas originadas de la alteración de las rocas volcánicas como el principal componente alóctono de los sedimentos. La importancia de las arcillas radica en las reacciones que se producen en la interface agua-sedimento, además de que su estructura laminar y su carga eléctrica negativa les permite asociarse con diversos compuestos orgánicos, como el amonio (NH_4^+), e inorgánicos, como los cationes (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+) (Håkanson & Jansson, 1983). Aunque el lago está rodeado en gran parte por laderas montañosas, en el fondo lacustre no se observan sedimentos de textura gruesa, con excepción de algunas playas angostas al pie de las montañas al nor-noroeste, constituidas por clastos del tamaño de bloques, guijas, guijarros, gravas y arenas gruesas que, en virtud de la retícula de muestreo empleada en este estudio, no aparecieron en las muestras analizadas.

La MO constituye un rasgo muy importante en los sedimentos del lago de Metztlitlán y es la fracción sedimentaria de mayores implicaciones ecológicas, debido a que su concentración podría tener un papel preponderante en la estructura trófica del lago al hacer que la materia orgánica en forma de detritos, constituya una importante vía para el flujo de la energía en el ecosistema (Wetzel, 2001). Los niveles más elevados de MO se detectaron en las áreas donde los sedimentos son básicamente arcillosos y de color más oscuro, lo que, de acuerdo con Valette (1993), confirma que a menor tamaño de la partícula es mayor la acumulación de materia orgánica. Ya que esta MO requiere para ser degradada de un suministro constante de oxígeno disuelto, las aguas profundas del lago eventualmente podrían desarrollar condiciones anóxicas, sin embargo esto no ocurre debido a la agitación continua de las aguas, promovida por la acción de los vientos, frecuentes en el área, que produce una mezcla en toda la columna de agua (Ibáñez-Aguirre *et al.*, 2002; Montero, 2008; Mendoza-Cariño *et al.*, 2018). Los datos obtenidos en la evaluación de olor, nos confirman que no existieron condiciones de anoxia en la mayoría de los sitios donde se tomaron las muestras, con excepción de las estaciones 34 y 35 localizadas en la parte norte del sistema donde se localizan las facies arcillosas de color oscuro y los sedimentos presentaron un olor a materia en descomposición. Las concentraciones de MO detectadas en los sedimentos tuvieron un valor promedio de $10.14 \pm 1.24\%$, es importante mencionar

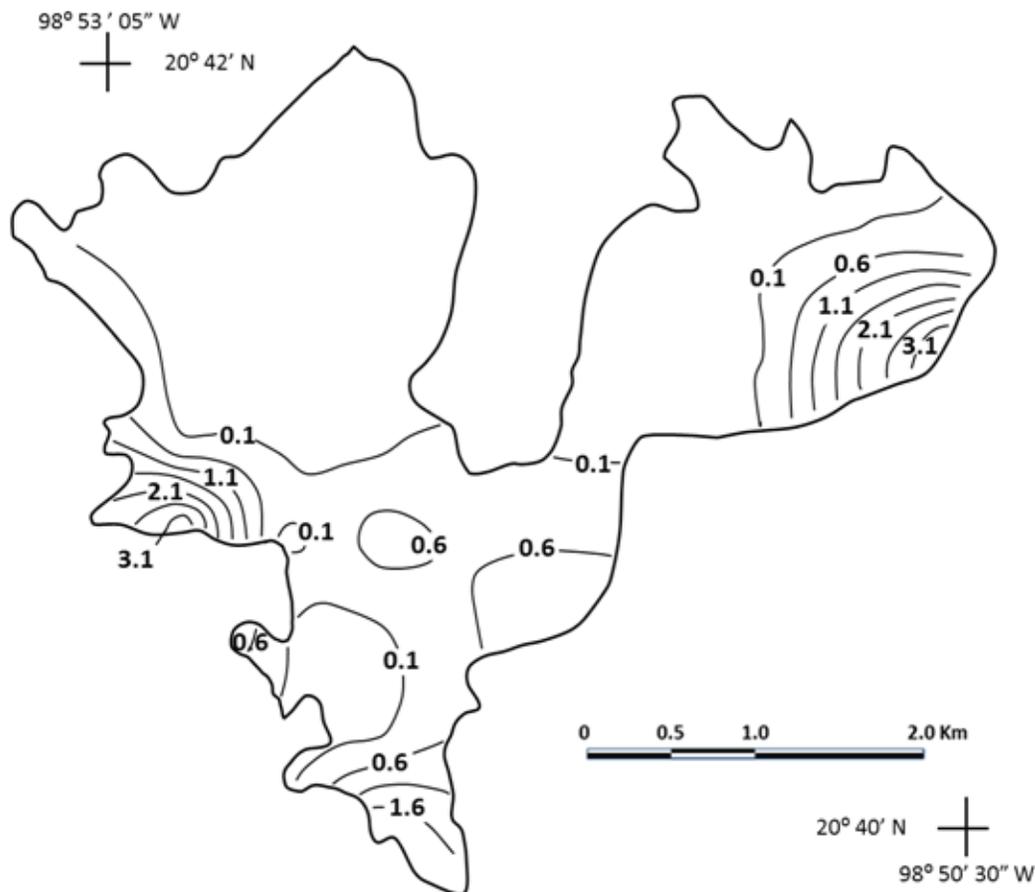


Figura 4. Isopletas de la concentración de arenas en los sedimentos el Lago de Metztlitlán. Los valores se expresan en porcentajes.

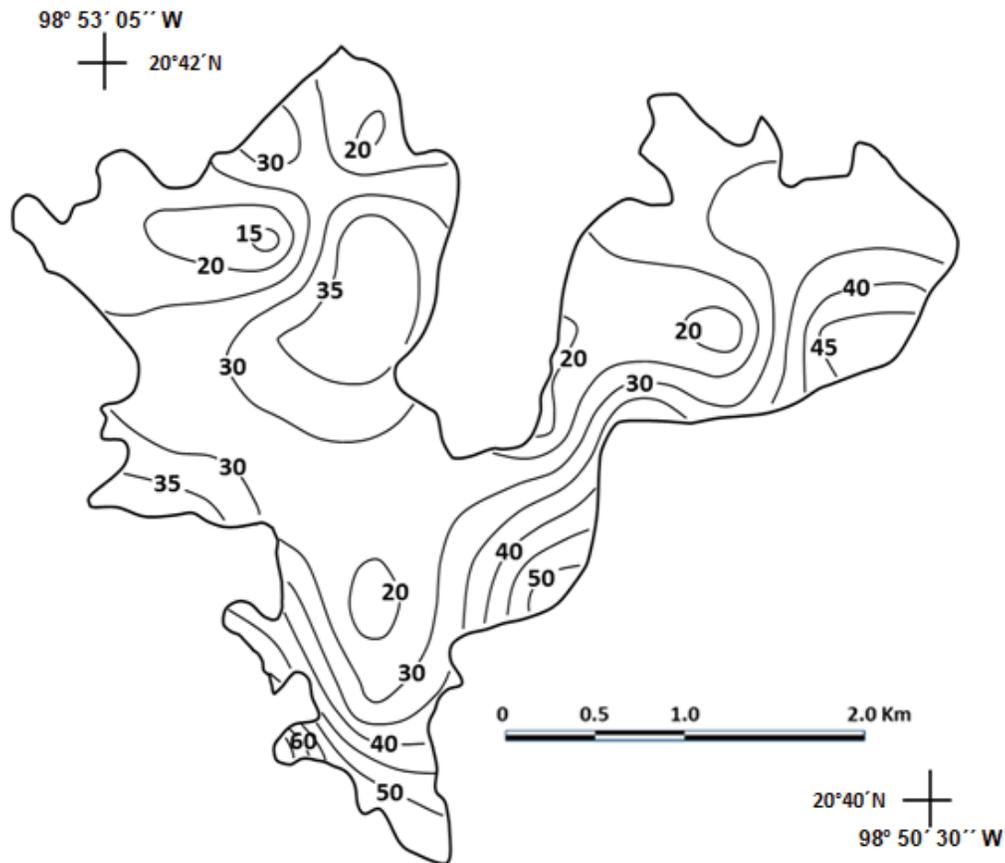


Figura 5. Isopleteras de la concentración de limos en los sedimentos del Lago de Metztitlán. Los valores se expresan en porcentajes.

que en las Tablas de Calidad de Sedimentos (NOAA, 1999), marcan que valores cercanos a 10% se consideran como de riesgo, por su toxicidad, para los organismos bentónicos.

Asimismo los niveles de MO detectados en los sedimentos del lago de Metztitlán se encuentran entre los valores registrados en otros sistemas de agua dulce, como en el lago de Chapala, la laguna de Zempoala, el lago de Pátzcuaro y la laguna Escondida, pero son inferiores al compararlos con los reportados para el lago de Catemaco, el lago de Cuitzeo y la zona de canales de Xochimilco (Tabla 4).

Tabla 3. Valores de coeficientes de correlación (r^2) de los diferentes grupos texturales obtenidos en muestras de sedimentos del Lago de Metztitlán Hgo.

	Arcilla	Limo	Arena	MO
Arcilla	1.00			
Limo	-0.956*	1.00		
Arena	-0.444*	0.439*	1.00	
MO	0.494*	-0.295	-0.1488	1.00

* Relación significativa ($p < 0.05$)

Tabla 4. Contenido de materia orgánica (%) en sedimentos de sistemas acuáticos de México.

Sistema	Concentración de materia orgánica (%)	Fuente
Lago de Chapala, Jal	4.1 - 10	Ramírez, 2001
Laguna de Zempoala	10.5 ± 6.3	Díaz-Vargas <i>et al.</i> , 2005
Xochimilco	17.76 - 27.38	Hernández-Quiroz <i>et al.</i> , 2019
Lago de Patzcuaro, Mich	6.52 - 28.43	Rodríguez-Serna, 2014
Laguna Escondida Ver.	10 - 30	Pérez-Rojas <i>et al.</i> , 2000
Lago de Catemaco, Ver	20 - 30	Torres-Orozco & Pérez Rojas, 2002
Lago de Cuitzeo, Mich	14 - 38	Chacón-Torres <i>et al.</i> , 2007
Lago de Metztitlán	7 - 12	Este trabajo

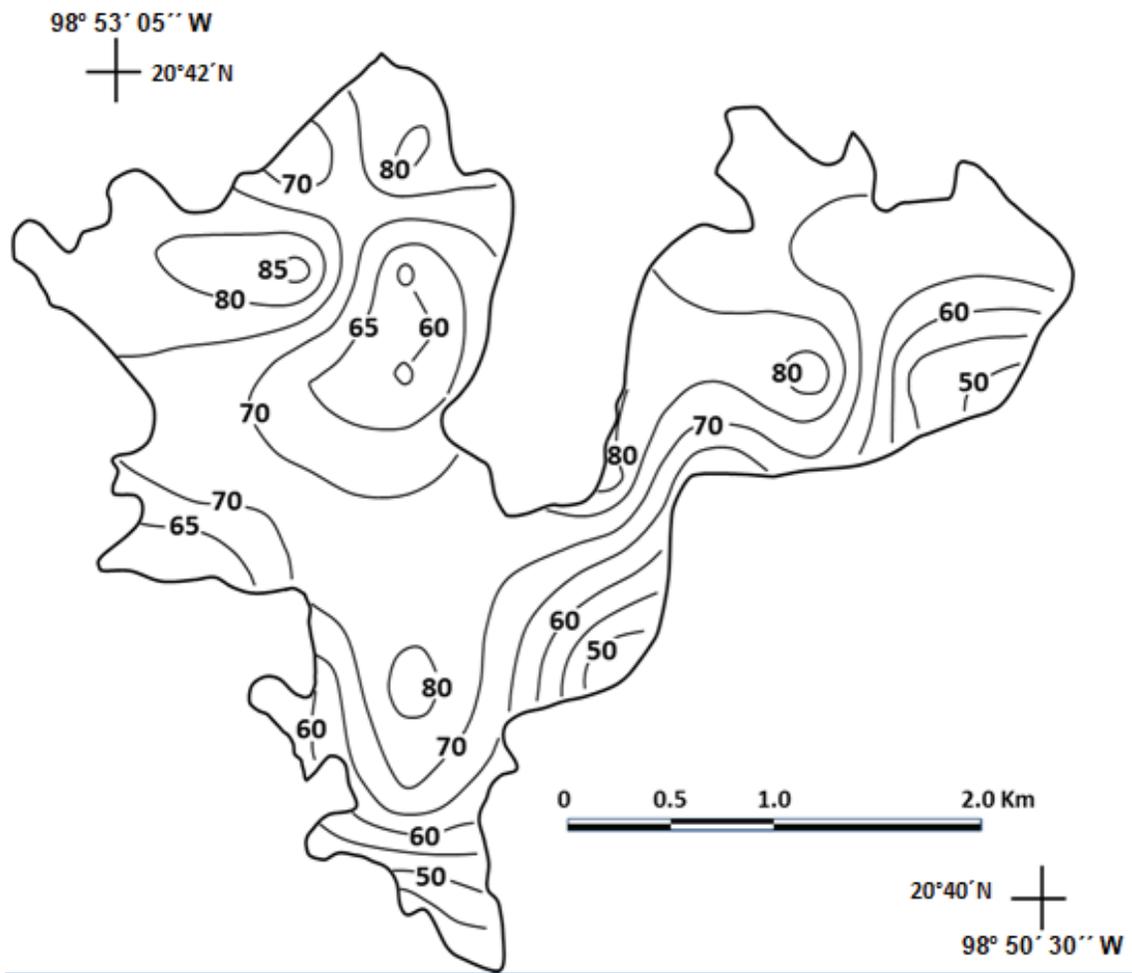


Figura 6. Isopletas de la concentración de arcillas en los sedimentos el Lago de Metztlán. Los valores se expresan en porcentajes.

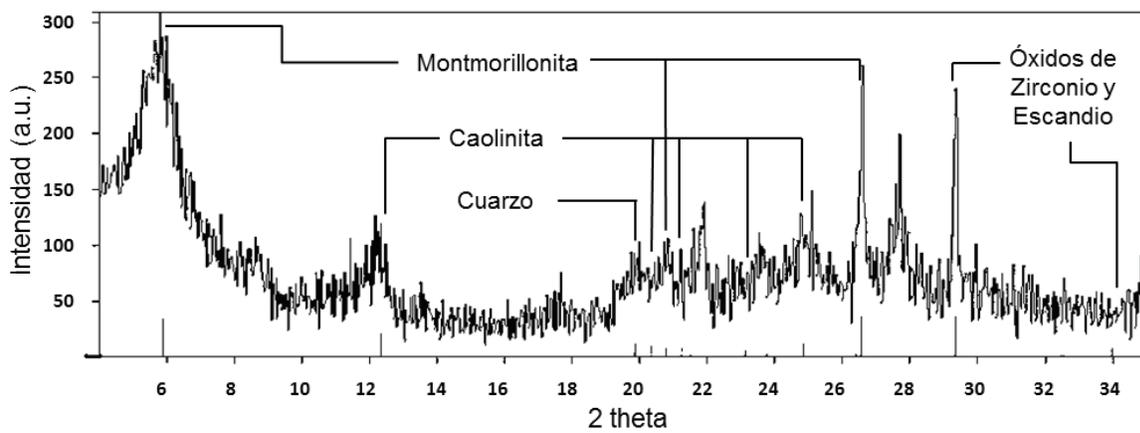


Figura 7. Difractograma de una muestra de la fracción arcillosa de los sedimentos del Lago de Metztlán mostrando los picos sobresalientes de la composición mineral en 2theta.

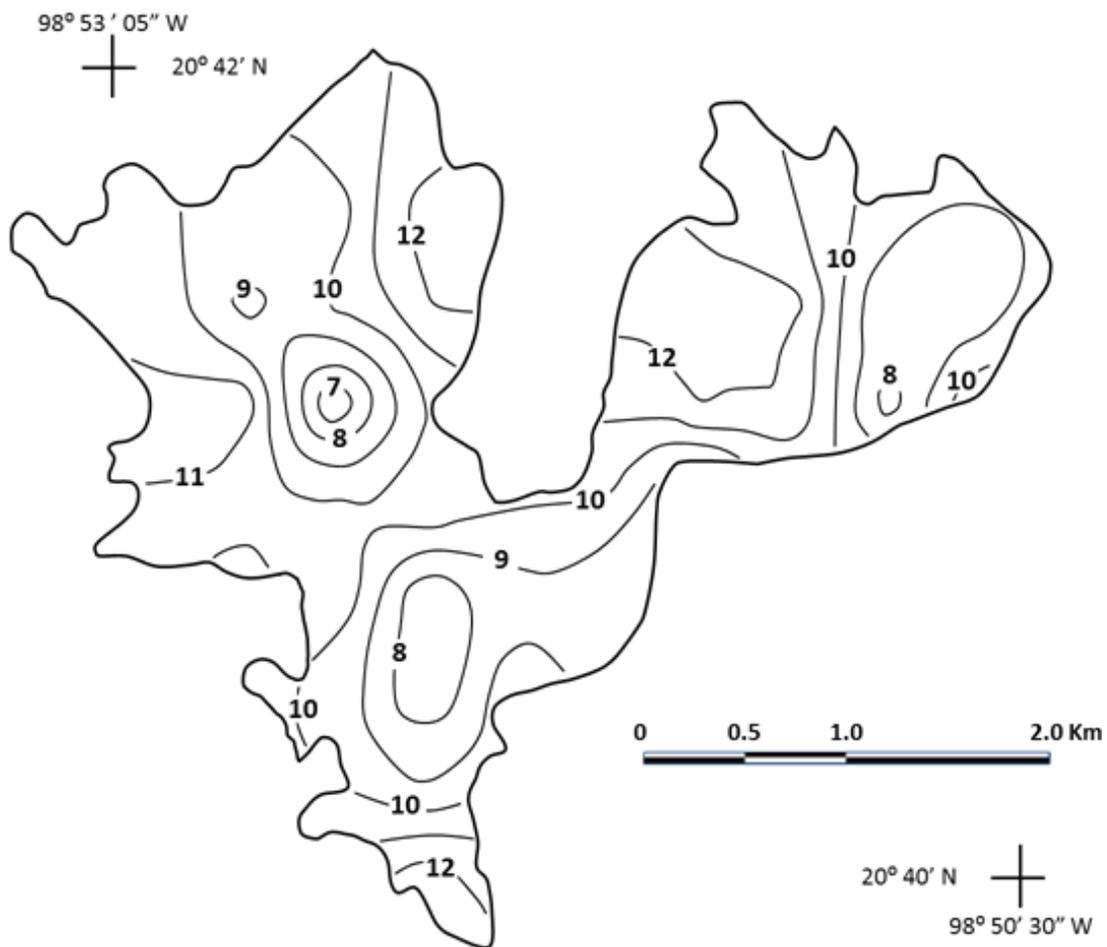


Figura 8. Distribución espacial de las proporciones de materia orgánica en los sedimentos superficiales del Lago de Metztlán, Hgo.

Los sedimentos constituyen el principal aporte de materiales alóctonos al lago; pero éstos también son importantes acarreadores de metales, residuos orgánicos, fertilizantes, plaguicidas y organismos patógenos (Montero, 2008; Sepúlveda *et al.*, 2019). Además constituyen un problema debido a que causan el azolve de los sistemas acuáticos.

En virtud de lo anterior, aunque abatir las elevadas tasas de sedimentación debidas a la erosión de las partes altas de la cuenca sería difícil, costoso e impráctico, pues implicaría la construcción de terrazas, diques y obras para control de cárcavas, además de trabajos de reforestación y construcción de barreras arbóreas (Mendoza-Cariño *et al.*, 2018), sí resulta conveniente para la salud del ecosistema comenzar a tomar algunas medidas para prevenir y reducir en lo posible el ingreso de material particulado y subproductos que pueden ser nocivos para los organismos que habitan en el sistema, derivados de las prácticas agrícolas que se desarrollan en la vega de Metztlán.

CONCLUSIONES

Los sedimentos recientes del lago de Metztlán se caracterizaron por el predominio de la arcilla limosa en la mayor parte del lago; limos arcillosos a lo largo y al frente de la desembocadura del afluente principal, y arcillas en las áreas de menor hidrodinámica. El contenido de materia orgánica de los sedimentos en las estaciones 1, 17, 34 y 35 es elevado (> 10%) y según las Tablas de Calidad de Sedimento pueden constituir un riesgo para los organismos bentónicos. Igualmente, la MO podría tener un papel muy importante en la estructura trófica del mismo. Las propiedades adsorbentes de las arcillas las hacen importantes acarreadoras de diversos tipos de compuestos que pueden ser nocivos, por esta razón conviene evaluar la pertinencia de tratar el agua antes de su ingreso al sistema lacustre.

REFERENCIAS

- ÁVILA-HENDRIK, H., E. QUINTERO, N. ANGULO, C. CÁRDENAS, M. ARAUJO, N. MORALES & M. PRIETO. 2014. Determinación de metales pesados en sedimentos superficiales costeros del Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela. *Multiciencias* 14 (1): 16-21.
- BINFORD, W. M., S. DEEVEY & T. L. CRISMAN. 1983. Paleolimnology: An historical perspective on lacustrine ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 14: 255-286.
- BRADBURY, J. P. 2000. Limnologic history of Lago de Patzcuaro, Michoacan, Mexico for the past 48000 years: impacts of climate and man. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 163: 69-95.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2003. Análisis integral del río Amajac para definir la problemática que podría presentar aguas debajo de la confluencia con el río Almolón, una vez construido el túnel en la Vega de Metztlán, establecer las características de funcionalidad del río Amajac después de la confluencia del río Almolón para evitar daños en los terrenos agrícolas y unidad de riego ubicadas en las Vegas, Estado de Hidalgo. CONAGUA, México, D.F. 145 p.
- CONANP (COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS). 2003. *Programa de Manejo Reserva de la Biósfera Barranca de Metztlán, México*. CONANP, México, D.F. 202 p.
- CRM (CONSEJO DE RECURSOS MINERALES). 2003. *Carta de inestabilidad de laderas. Reserva de la Biósfera "Barranca de Metztlán"*. Escala 1:100,000. Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Economía. Pachuca, Hidalgo. México.
- CHACÓN-TORRES, A., C. ROSAS MONJE & J. ALVARADO DÍAZ. 2007. Lago de Cuitzeo, Michoacán. In: De la Lanza Espino. (Ed). *Las aguas interiores de México conceptos y casos*. AGT EDITOR, S. A., México D.F., pp. 305-338.
- DEAN, W. E. JR. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; Comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology* 44 (1): 242-248.
- DÍAZ-VARGAS, M., E. ELIZALDE-ARRIAGA, H. QUIROZ-CASTELÁN, J. GARCÍA-RODRÍGUEZ & I. MOLINA-ESTUDILLO. 2005. Caracterización de algunos parámetros físico químicos del agua y sedimento del Lago Zempoala, Morelos, México. *Acta Universitaria* 15 (2): 57-65.
- FOLK, R.L. 1974. *Petrología de las rocas sedimentarias*. Instituto de Geología, UNAM, México. 405 p.
- GARCÍA-ARIZAGA, M. T., J. LUGO-HUBP & D. PALACIOS. 1996. La obturación de valles por procesos de ladera: El origen de la vega de Metztlán (México). In: Grandal d'Anglade, A. & J. Pagés Valcarlos (eds.). *IV Congreso de Geomorfología*. Sociedad Española de Geomorfología, pp. 325-335.
- GARCÍA, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM: Serie Libros Núm. 6, México. 90 p.
- Gibbs, R. J. 1968. Clay mineral mounting techniques for x-ray diffraction analysis. *Journal of Sedimentary Petrology* 38: 242-244.
- HÅKANSON, L. & M. JANSSON. 1983. *Principles of Lake Sedimentology*. Springer-Verlag, Berlín. 613 p.
- HERNÁNDEZ-QUIROZ, M., D. RUIZ-MEZA, F. ROJO-CALLEJAS & C. PONCE DE LEÓN-HILL. 2019. Determinación de la distribución de contaminantes emergentes en agua intersticial en sedimentos de humedal mediante la optimización y validación de un método analítico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 35:407-419.
- IBÁÑEZ-AGUIRRE, A. L., J. L. GARCÍA-CALDERÓN, A. PÉREZ-ROJAS, S. ÁLVAREZ-HERNÁNDEZ, C. ÁLVAREZ-SILVA & E. NÚÑEZ-PORTUGAL. 2002. El lago de Metztlán, Hidalgo. In: De La Lanza-Espino G. & J.L. García-Calderón (eds.). *Lagos y presas de México*. AGT Editor. México, D.F., pp. 253-268.
- ISRADE-ALCÁNTARA, I., R. VELÁZQUEZ-DURÁN, M.S. LOZANO-GARCÍA, V.H. GARDUÑO-MONROY, J. BISCHOFF & G. DOMÍNGUEZ-VÁZQUEZ. 2010. Evolución paleolimnológica del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 62 (3): 345-357.
- JUÁREZ-FLORES, J. & A. L. IBÁÑEZ-AGUIRRE. 2003. Abundance and first record of benthic macroinvertebrates in Lake Metztlán, Mexico. *Hidrobiológica* 13 (2): 137-144.
- KALFF, J. 2002. *Limnology: inland water ecosystems*. Prentice Hall, USA. 592 p.
- LEWIS, D. W. & D. M. McCONCHIE. 1994. *Practical sedimentology*. Chapman & Hall, London. 213 p.
- LÓPEZ-HERRERA, M., L. ROMERO-BAUTISTA, N. AYALA-SÁNCHEZ, I. SORIA-MERCADO & A. PORTILLO-LÓPEZ. 2015. Problemática de contaminación en la zona agrícola de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán, Hidalgo, México. *Estudios en Biodiversidad* 1:142-200.
- LUGO-HUBP, J. 2011. *Diccionario Geomorfológico*. Instituto de Geografía, UNAM. Ciudad de México, México. 479 p.
- MENDOZA-CARIÑO, M., A. L. BAUTISTA-OLIVAS, A. QUEVEDO-NOLASCO & D. MENDOZA-CARIÑO. 2018. Análisis hidrológico de largo plazo en la cuenca del río Metztlán Hidalgo, México, y su relación con el cambio climático. *Hidrobiológica* 28 (1): 17-30.
- MONTERO, A. S. 2008. Caracterización integral de lagunas del Estado de Hidalgo. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados Montecillos. Estado de México, México. 144 p.
- MUNSELL. 1994. Soil color chart.
- NOAA (NATIONAL OCEANIC ATMOSPHERIC ADMINISTRATION). 1999. *Sediment Quality Guidelines*. Seattle WA, NOAA. 34 p
- ORTEGA-GUERRERO, B. & M. S. CABALLERO-MIRANDA. 2011. Registros lacustres del centro de México: Una aproximación a los paleoambientes de los últimos 50000 años. In: Caballero-Miranda, M. S. & B. Ortega-Guerrero (eds.). *Escenarios de cambio climático: Registros del Cuaternario en América Latina. Vol. 1*. Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, UNAM, pp. 163-181.
- PÉREZ-ROJAS, A. 2003. Las vegas de Metztlán, Hidalgo, México. El medio físico. In: Armella, M. A., M. de L. Yáñez & E. Sandoval (eds.). *Metztlán: Lugar de la luna y de las maravillas*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, México D.F, pp. 13-29.

- PÉREZ-ROJAS, A., R. TORRES-OROZCO, E. MORALES-GUTIÉRREZ & E. PÉREZ-MÉNDEZ. 2000. Textura, composición y contenido de materia orgánica de los sedimentos recientes de un lago tropical de México. *Hidrobiológica* 10 (1): 41-50.
- RAMÍREZ-SÁNCHEZ, H. U. 2001. Caracterisation hydrologique et sédimentologique d'un lac tropical; Le Lac Chapala (Mexique). Tesis Docteur en Sciences, Universidad de Niza (Sofía Antipolis), Francia. 251 p.
- RAMSAR. 2007. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Dirección de Áreas Naturales Instituto de Historia Natural y Ecología, Chiapas. 16 p.
- RODRÍGUEZ-SERNA, M. 2014. Análisis ecológico y poblacional de la especie *Cambarellus patzcuarensis* del Lago de Pátzcuaro. In: Huerto-Delgadillo, R. & S. Vargas-Velázquez (eds.). *Estudio ecosistémico del lago de Pátzcuaro: aportes en gestión ambiental para el fomento del desarrollo sustentable*. Vol. 2. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 95-136.
- SEMARNAP (SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y ÁREAS PROTEGIDAS). 1999. *Documento Técnico Justificativo para la Creación de la Reserva de la Biósfera "Barranca de Metztlitlán, Hidalgo"*. SEMARNAP, Delegación Federal Hidalgo. 100 p.
- SEPÚLVEDA, L.D., K. L. LECOMTE, A. I. PASQUINI, E. G. MANSILLA & M. A. E. CHAPARRRO. 2019. Propiedades geoquímicas y magnéticas de sedimentos como indicadores de contaminación. Caso de estudio: río Suquia, Córdoba, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 36(2):183-194
- SHEPARD, F. P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology* 24: 151-158.
- SOKOL, R.R. & F.J. ROHLF. 2000. *Biometry*. 4 Ed., W.H. Freeman and Company, San Francisco, USA. 937 p.
- SPP (SECRETARÍA DE PROGRAMACIÓN Y PRESUPUESTO). 1992. *Síntesis geográfica del estado de Hidalgo*. SPP, INEGI, Aguascalientes, México. 17 p.
- STOKES, G.G. 1851. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 9 (2): 8-106.
- SUÁREZ-MARLEN., E.A. MARCANO, A. RAMÍREZ, Y. SEGURA & L.M. MARCÓ. 2013. Distribución espacial de fósforo en sedimentos superficiales del Lago de Valencia. *Universidad, Ciencia y Tecnología* 17 (66): 2-10.
- SUTER, M. 2004. A neotectonic-geomorphologic investigation of the pre-historic rock avalanche damming Laguna de Metztlitlán (Hidalgo State, east-central Mexico). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21 (3): 397-411.
- U.S.EPA. (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). 2002. *Principles for managing contaminated sediment risks at hazardous waste sites*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC. OSWER Directive 9285. 12 p.
- TORRES-OROZCO, B. R. & A. PÉREZ ROJAS. 2002. El lago de Catemaco In: De La Lanza-Espino G. & J.L. García Calderon (eds.). *Lagos y presas de México*. AGT Editor, Mexico., pp. 213-251.
- VALETTE, S. N. 1993. The use of sediment cores to reconstruct historical trends in contamination of estuarine and coastal sediments. *Estuaries* 16 (3b): 577-588.
- WETZEL, R. G. 2001. *Limnology: Lake and river ecosystems*. Academic Press, San Diego. 1006 p.
- ZAR, J. H. 1996. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, New Jersey. 662 p.