



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Enriquecimiento y flujos de elementos potencialmente
tóxicos (As, Cd, Zn) en registros sedimentarios de la
Laguna de Términos, Campeche

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A :

ZUBIA JOCELYN CISNEROS RAMOS

TUTOR

DR. JORGE FELICIANO ONTIVEROS CUADRAS

CD. UNIVERSITARIA, CDMX, 2024





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.

Datos de la alumna

Cisneros
Ramos
Zubia Jocelyn
5563757245
Universidad Nacional Autónoma de
México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
314096818

Datos del tutor

Dr.
Jorge Feliciano
Ontiveros
Cuadras

Datos del sinodal 1

Dra.
Elsa
Arellano
Torres

Datos del sinodal 2

Dra.
Rocío
García
Martínez

Datos del sinodal 3

Dra.
Valerie
Pompa
Mera

Datos del sinodal 4

Q.F.B.
Susana
Santiago
Pérez

Datos del trabajo escrito

Enriquecimiento y flujos de elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Zn) en registros sedimentarios de la laguna de Términos, Campeche
76 p
2024

Esta investigación se realizó en el laboratorio de Química Acuática del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, y formó parte del proyecto “Evaluación de la contaminación por metales y metaloides en laguna de Términos, Campeche durante los últimos 150 años” financiado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT (clave IA202420).

*A Zubia de 6 años que soñaba con ser
astronauta, exploradora y estudiar el mar* ∞

*A mis padres Ermita y Juan
A mis hermanas Karla y Cynthia*

*Todo, todo ocurre en un momento
Un punto diminuto, un granito de arena
Una mota de polvo del universo
Todo, todo ocurre en un instante
Las estrellas dicen
Que nosotros somos los fugaces
Blue, diminuto planeta azul
Donde habitan los nuestros
Donde habitas tú,
Blue, diminuto planeta azul
Donde habitan los nuestros
Donde habitas tú
Blue, el punto de vista lo pones tú...*

- Macaco

Agradecimientos

Agradecimientos institucionales

A mi asesor, el Dr. Jorge Feliciano Ontiveros Cuadras por su gran apoyo, por compartirme sus conocimientos, por guiarme durante este proceso y por tenerme paciencia para escribir la tesis.

A la Lic. Susana Santiago a quien estimo mucho y agradezco por ser una gran guía en el laboratorio, por sus enseñanzas y sus consejos.

Al equipo de trabajo del laboratorio GEOCRON y a la Dra. Ana Carolina Ruiz por haber realizado la radiocronología con ^{210}Pb y el análisis de tamaño de grano en los núcleos de sedimentos del presente trabajo.

A mis sinodales porque no solo me brindaron de su tiempo y me hicieron observaciones objetivas y constructivas para la mejora del presente trabajo, sino que además como docentes enriquecieron mucho mis conocimientos, me escucharon y me dieron grandes consejos de vida, los cuales aprecio infinitamente.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por ofrecerme un lugar y las herramientas necesarias para poder llevar a cabo este trabajo.

A la Facultad de Ciencias por brindarme un espacio para poder desempeñarme académica y personalmente. Además de permitirme conocer a grandes profesores como la Dra. Elsa Arellano, la Dra. Mariel Barjau, el Dr. Guillermo Montero, la Dra. Lyssette Muñoz, al Dr. Harry Álvarez y al M. Héctor Díaz.

Agradecimientos personales

Quiero agradecer infinitamente al mar porque gracias al asombro que causo en mi a mis 4 años, con esos variados tonos de azul, el olor a pez, la brisa, el sonido de sus olas cuando rompen en la playa y todo lo que lo caracteriza, es que decidí estudiarlo. El mar ha sido mi mayor motivación durante la carrera y en este proceso.

Agradezco a mis padres Ermita y Juan por apoyarme durante este proceso en todos los aspectos, especialmente por los grandes consejos y por hacerme crecer en un entorno que me permitió relacionarme de la forma más bonita con la naturaleza.

A mis hermanas Karla y Cynthia con las que he compartido hermosas experiencias y quienes no solo me han acompañado en cada etapa de mi vida, sino que además me han motivado y enseñado que la hermandad es de las cosas valiosas que hay en la vida.

A mi gran amiga Ari por las grandes y profundas pláticas sobre la vida, por apoyarme, aconsejarme, por compartir extraordinarios momentos en la facultad y por ayudarme a realizar los mapas del área de estudio que presentaré en este trabajo. También agradezco a mis amigas Sofí y Pao por sus consejos, enseñanzas y por hacer ameno este proceso.

A mis compañeros de laboratorio Aarón y Argelia, por el gran equipo que formamos para que esto pudiera ser posible y por los bonitos momentos que compartimos en el laboratorio.

índice

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 1 |
| 1. Introducción | 3 |
| 1.1. Antecedentes..... | 4 |
| 1.2 Objetivos..... | 8 |
| 1.2.1 Objetivo general | 8 |
| 1.2.2 Objetivos particulares..... | 8 |
| 2. Marco teórico..... | 9 |
| 2.1 Lagunas costeras | 9 |
| 2.2 Sedimentos y la acumulación de EPT | 9 |
| 2.3 Elementos potencialmente tóxicos..... | 10 |
| 2.3.1 Arsénico | 10 |
| 2.3.2 Cadmio | 11 |
| 2.3.3 Zinc | 11 |
| 2.4 Fechado con ²¹⁰ Pb..... | 12 |
| 3. Área de estudio | 13 |
| 3.1 Clima..... | 13 |
| 3.2 Hidrología | 14 |
| 3.3 Propiedades fisicoquímicas | 14 |
| 3.3.1 Salinidad | 14 |
| 3.3.2. Oxígeno disuelto y nutrientes..... | 15 |
| 3.4 Geología | 15 |
| 3.5 Biodiversidad | 16 |
| 3.6 Actividades económicas | 17 |
| 4. Metodología | 19 |
| 4.1 Muestreo | 19 |
| 4.2 Tamaño de grano | 20 |
| 4.3 Fechado con ²¹⁰ Pb..... | 20 |
| 4.4. Determinación de MO | 21 |
| 4.5. Determinación de carbonatos | 21 |
| 4.6. Determinación de elementos mayores..... | 21 |
| 4.7. Determinación de EPT | 22 |
| 4.7.1. Digestión..... | 22 |

| | |
|---|----|
| 4.7.2. Absorción Atómica (AA) | 22 |
| 4.8. Factor de enriquecimiento | 24 |
| 4.9. Flujo de EPT | 25 |
| 4.10. Control de calidad y análisis estadísticos | 25 |
| 4.10.1 Control de calidad | 25 |
| 4.10.1.1 Tamaño de grano | 25 |
| 4.10.1.2 MO y carbonatos | 25 |
| 4.10.1.3 Elementos mayores | 26 |
| 4.10.1.4 EPT (As, Cd y Zn) | 27 |
| 4.10.2 Análisis estadístico | 27 |
| 5. Resultados | 28 |
| 5.1 Tamaño de grano | 28 |
| 5.2 Materia orgánica..... | 29 |
| 5.3 Carbonatos | 30 |
| 5.4 Elementos mayores | 35 |
| 5.5 Elementos potencialmente tóxicos..... | 31 |
| 5.5.1 Arsénico | 31 |
| 5.5.2. Cadmio | 32 |
| 5.5.3. Zinc | 33 |
| 5.6 Fechado con ²¹⁰ Pb..... | 34 |
| 5.6.1. ²¹⁰ Pb total..... | 34 |
| 5.6.2. ²¹⁰ Pb base y ²¹⁰ Pb en exceso | 35 |
| 5.6.3. Fechado con ²¹⁰ Pb..... | 35 |
| 5.6.4. Tasas de acumulación másica y sedimentaria | 38 |
| 6. Discusión | 39 |
| 6.1 Tamaño de grano | 39 |
| 6.2 Materia orgánica y carbonatos | 39 |
| 6.3 Elementos mayores (procedencia de los EPT) | 40 |
| 6.4 Concentraciones de As, Cd y Zn | 42 |
| 6.4.1 Factor de enriquecimiento..... | 43 |
| 6.4.2. Flujos históricos | 44 |
| 7. Conclusiones..... | 46 |
| 8. Referencias..... | 47 |

| | |
|---------------|----|
| 9. Anexo..... | 60 |
|---------------|----|

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clima de la región de LT de acuerdo con la clasificación de Köppen. | 14 |
| Tabla 2. Valores de salinidad de LT de acuerdo con la distribución espacial y temporal. | 15 |
| Tabla 3. Litología de la Laguna de Términos. | 16 |
| Tabla 4. Información de los sitios de recolección de los núcleos de sedimentos en la Laguna de Términos, Campeche..... | 19 |
| Tabla 5. Condiciones de digestión para las muestras de sedimento y el lavado de las bombas de teflón. | 22 |
| Tabla 6. Condiciones de lectura de Cd y Zn en el espectrómetro Thermo Electron Corporation modelo GF597. | 23 |
| Tabla 7. Condiciones de lectura para el As en el espectrómetro VARIAN modelo SPECTRA AA-10024 | |
| Tabla 8. Datos de la muestra sextuplicada del núcleo LT03 y los valores de precisión (C.V.) correspondientes a cada tamaño de grano. | 25 |
| Tabla 9. Datos de cada núcleo y valores de precisión (C.V.) correspondientes a la MO y los carbonatos de cada núcleo de LT..... | 26 |
| Tabla 10. Datos de las réplicas de muestras de cada núcleo de LT y los valores de precisión (C.V.) y exactitud (recuperación %) correspondientes a cada elemento. | 26 |
| Tabla 11. Datos de validación de los EPT (As, Cd y Zn) para el análisis de los núcleos de sedimento de LT. | 27 |
| Tabla 12. Tamaño de grano de los núcleos LT01, LT02 y LT03 recolectados en la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 28 |
| Tabla 13. Promedio del contenido (%) de elementos mayores en los núcleos LT01, LT02 y LT03 recolectados en la Laguna de Términos, Campeche, México. | 35 |
| Tabla 14. Intervalo de concentración (%) de los elementos mayores en los núcleos LT01, LT02 y LT03 recolectados en la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 36 |
| Tabla 15. Intervalos de las tasas de acumulación másica ($\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y las tasas de acumulación sedimentaria de (cm año^{-1}) de los núcleos LT01, LT02 y LT03 recolectados en la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 38 |
| Tabla 16. Comparación de las concentraciones de As, Cd y Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$) en sedimentos de lagunas y sitios costeros..... | 43 |
| Tabla 17. Factor de enriquecimiento de los EPT en los núcleos LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche México..... | 44 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de ubicación de la Laguna de Términos, Campeche..... | 13 |
| Figura 2. Vegetación de la Laguna de Términos, obtenida del sitio web LANRESC (Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera: Laguna de Términos)..... | 17 |
| Figura 3. Sitios de recolección de los núcleos de sedimentos (puntos en rojo) dentro de la Laguna de Términos, Campeche..... | 19 |
| Figura 4. Curva de calibración de As | 23 |
| Figura 5. Curva de calibración de Cd | 23 |
| Figura 6. Curva de calibración de Zn | 23 |
| Figura 7. Perfiles de tamaño de grano de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 29 |
| Figura 8. Perfiles de profundidad del contenido de MO (%) en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México. | 30 |
| Figura 9. Perfiles de profundidad del contenido de carbonatos (%) los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 31 |
| Figura 10. Perfiles de profundidad de la concentración de los elementos mayores de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México. | 37 |
| Figura 11. Perfiles de profundidad de la concentración de As en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 32 |
| Figura 12. Perfiles de profundidad de la concentración de Cd en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 33 |
| Figura 13. Perfiles de profundidad de la concentración de Zn en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 34 |
| Figura 14. Actividad de ²¹⁰ Pb en los núcleos de sedimentos LT01, LT01 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 35 |
| Figura 15. Tasas de acumulación másica (g cm ⁻² año ⁻¹) y tasas de acumulación sedimentaria (cm año ⁻¹) respecto al tiempo (Fecha A.D.) en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 38 |
| Figura 16. Gráficos de correlación (r= 0.497, con un nivel significancia α=0.05) entre la MO, los carbonatos y las concentraciones de As y Zn para el núcleo LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 40 |
| Figura 17. Gráficos de correlación (r= 0.497, con un nivel significancia α=0.05) entre los elementos mayores y las concentraciones de As y Zn para el núcleo LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México..... | 41 |
| Figura 18. Flujos históricos de los EPT respecto al tiempo (Fecha A.D.) en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México | 45 |

Resumen

Las lagunas costeras son ecosistemas vulnerables a la contaminación por EPT (elementos potencialmente tóxicos), los cuales se han relacionado con fuentes antropogénicas, como la urbanización, el desarrollo de infraestructuras turísticas, la industria petrolera, la pesca, la descarga de aguas residuales, entre otros. En México, Laguna de Términos (LT), que es una Área Natural Protegida ubicada en la costa de Campeche, está propensa a la contaminación por EPT debido al fuerte desarrollo socioeconómico de la zona, especialmente de la industria petrolera que, desde 1970 se convirtió en una de las actividades más importantes de la región. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo de investigación fue determinar las concentraciones, enriquecimiento y flujos de EPT (As, Cd y Zn) en tres núcleos de sedimento (LT01, LT02, LT03) fechados con ^{210}Pb , que fueron recolectados al interior de LT el 11 de febrero de 2021. Es así que, las edades de los núcleos fueron de 44 ± 14 años (1976 a 2021) en LT01, de 37 ± 12 años (1984-2021) en LT02 y de 127 ± 44 años (1876 a 2021) en LT03. El análisis granulométrico indicó la predominancia de las fracciones de limos (52-66%) y arcillas (27-38%) en los sedimentos. En cuanto al contenido de materia orgánica (MO), se observaron valores de 11.2-17.3% en LT01, 11.4-15.7% en LT02 y 13.1-17.5% en LT03; mientras que los carbonatos, presentaron contenidos de 9.2-14.3% en LT01, 11.8-15.5% en LT02 y 4.1-12.5% en LT03. Las concentraciones generales de los EPT, en los núcleos de sedimento fueron $0.9\text{-}10.7 \mu\text{g g}^{-1}$ para As, $0.07\text{-}0.26 \mu\text{g g}^{-1}$ para Cd y $40.0\text{-}66.0 \mu\text{g g}^{-1}$ para Zn. En cuanto a los factores de enriquecimiento (FE), se observó que los FE de As, Cd y Zn son menores a 1.5, lo que indica que los sitios muestreados en LT no presentan enriquecimientos de estos EPT. De la comparación de los EPT con los valores TEL (nivel de efecto umbral por sus siglas en inglés) y PEL (nivel de efecto probable por sus siglas en inglés), solo el As estuvo por arriba de los valores TEL, aunque por debajo de los valores PEL, indicando que raramente podrían ocurrir efectos adversos en la biota bentónica local.

De las correlaciones entre el tamaño de grano y los EPT, solo se encontraron correlaciones significativas negativas ($p < 0.05$; $r > -0.49$) para LT03, entre las arenas y Cd ($r = -0.53$), así como con As ($r = -0.51$), sugiriendo que las concentraciones de ambos elementos disminuyeron cuando el tamaño de grano grueso (arenas) aumentó. La relación superficie-volumen es baja en sedimentos gruesos, a diferencia de los sedimentos finos, donde la relación superficie-volumen es alta y favorece la acumulación de metales y metaloides. De las correlaciones entre MO, carbonatos y los EPT, se encontraron correlaciones significativas en LT03 para As y Zn, donde el As se correlacionó con la MO ($r = -0.72$) y carbonatos ($r = -0.82$), y el Zn con la MO ($r = -0.55$). Lo anterior sugiere que la MO no es un factor dominante en el transporte y acumulación de los EPT en este núcleo. Asimismo, entre los elementos mayores y los EPT, se observaron correlaciones significativas en LT03, entre As y Zn con el SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 y MnO , indicando que las concentraciones de ambos elementos están fuertemente influenciadas por el transporte de sedimentos de origen terrígeno.

Por último, los flujos de los EPT presentaron los siguientes intervalos: $0.05\text{-}4.82 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ años}^{-1}$ para As, de $0.01\text{-}0.08 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ años}^{-1}$ para Cd y de $1.56\text{-}35.71 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ años}^{-1}$ para Zn. Las variaciones de los flujos en los núcleos de sedimento estuvieron relacionadas con las TAM ($0.03\text{-}0.69 \text{ g cm}^{-2} \text{ años}^{-1}$) y TAS ($0.03\text{-}1.93 \text{ cm años}^{-1}$), así como con las actividades antropogénicas de la

región, especialmente en la industria petrolera, ya que se observó que los incrementos de los flujos de As, Cd y Zn en el núcleo LT03 en la fecha 1972 ± 8.06 probablemente estuvieron relacionados con el desarrollo de la actividad petrolera en 1970. Mientras que en el núcleo LT01 los incrementos de los flujos de Zn y As en 1978 ± 8.36 coincidieron con el derrame de petróleo provocado por el accidente del Pozo Ixtoc en la Sonda de Campeche en 1979, mientras que los flujos de EPT de LT03 incrementaron en 2011 ± 1.25 por lo que pudieran estar relacionados con la explosión de Deepwater Horizon en el Golfo de México en el año 2010.

1. Introducción

Las lagunas costeras (LC) se han convertido en uno de los hábitats más valorados del mundo debido a su riqueza biológica, a los servicios ecosistémicos y bienes sociales que presentan (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2018, 2020), además de constituir cerca del 13% de las costas en el mundo (Simantiris y Avlonitis, 2023). Sin embargo, las LC al ser ecosistemas de transición entre el medio marino y terrestre están sometidas a fuertes presiones antropogénicas, lo que ha generado problemas de contaminación por elementos potencialmente tóxicos (EPT), que se relacionan, por ejemplo, con cambios de uso de suelo, asociado a la urbanización y la agricultura, al desarrollo de infraestructuras para el turismo, la acuicultura, pesquerías o el desarrollo de la industria petrolera (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2018; Garcés-Ordóñez *et al.*, 2022). Los EPT no solo provienen de actividades antropogénicas, sino que están naturalmente presentes en el medio ambiente, como resultado de la meteorización de las rocas de la corteza y las erupciones volcánicas (Alharbi *et al.*, 2022).

Los EPT son un grupo de elementos que pueden ser esenciales y no esenciales para la vida (Daniel *et al.*, 2008), que en altas concentraciones pueden ser peligrosas para los seres vivos como la bioacumulación, toxicidad, carcinogenicidad y no degradabilidad (Hoshyari *et al.*, 2023). Estos elementos se introducen a las LC mediante de la escorrentía, descarga de afluentes, transporte atmosférico y por actividades humanas, como la eliminación de residuos peligrosos, descargas de aguas residuales, construcción y mantenimiento de infraestructura y liberación de EPT de las embarcaciones (Jaramillo y Castañeda, 2018). Los EPT en las LC pueden ser acumulados o liberados desde el sedimento, dependiendo de las condiciones de óxido-reducción (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 2007; Mendoza-Carranza *et al.*, 2016). En consecuencia, los sedimentos no perturbados (por bioturbación o mezcla física) son un registro natural, que pueden utilizarse para evaluar los cambios en la acumulación de los EPT en los sistemas acuáticos costeros (Palleiro *et al.*, 2016). Estos cambios pueden ser evaluados mediante el fechado con ^{210}Pb de núcleos de sedimento, ya que es una herramienta muy útil que permite reconstruir las tendencias temporales de los EPT en las zonas costeras (Ruiz-Fernández y Hillaire-Marcel, 2009; Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2021) y estimar las tasas de acumulación de los sedimentos (Li *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022). En ese sentido, se han realizado estudios en los que se han utilizado núcleos de sedimento para realizar reconstrucciones de la evolución ambiental y caracterizar el impacto antropogénico en las zonas costeras (Ruiz-Fernández *et al.* 2019; Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022).

México cuenta con un litoral costero de 11,600 kilómetros, donde 567 mil hectáreas corresponden a superficies de lagunas y estuarios (Vázquez y Martínez, 2022), contabilizándose alrededor de 125 a 130 lagunas en todo el país (Lara *et al.*, 2011), entre ellas, Laguna de Términos (LT) se ubica al sur del Golfo de México. La LT es considerada un Área Natural Protegida, lo que significa que es un sitio de conservación y protección de la biodiversidad (CONANP, 2022). No obstante, LT se encuentra vulnerable ante la contaminación de EPT por el crecimiento de la urbanización y la industria petrolera, actividades que se intensificaron en el Golfo de México desde la década de los 1970s (León-Rojas y Sánchez-Peña, 2020). Por lo anterior, LT ha sido foco de diversos estudios, relacionados con la biodiversidad, el análisis de la calidad del agua y los sedimentos y la contaminación por EPT. En ese sentido, el objetivo de este trabajo fue determinar las concentraciones, el enriquecimiento y los flujos de EPT (As, Cd y Zn), para valorar la contaminación asociada a actividades antropogénicas en LT.

1.1. Antecedentes

En las últimas décadas, se han realizado diversos estudios sobre la contaminación de EPT en las lagunas costeras, ya que las altas concentraciones de estos elementos representan un riesgo para los organismos acuáticos y la población humana en general, debido a su toxicidad y persistencia. Además, estos contaminantes metálicos pueden migrar a los diferentes niveles tróficos a través de las cadenas tróficas (Castaneda-Chavez *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2019). Los metales y metaloides ingresan a los ecosistemas acuáticos por fuentes naturales como la meteorización de las rocas, la descarga de afluentes y la deposición atmosférica, así como por fuentes antropogénicas, relacionadas con la industrialización, el cambio de uso de suelo, la urbanización, la extracción de recursos petroleros, la acuicultura y por descargas de aguas residuales urbanas e industriales (Bastami *et al.*, 2014; Hernández-Crespo y Martín, 2015; Shetaia *et al.*, 2022). Una vez que estos elementos se encuentran en los cuerpos de agua, se distribuyen entre la fase acuosa o particulada, y una fracción importante se deposita en los sedimentos (Bastami *et al.*, 2014). Entonces, los sedimentos son sumideros de elementos metálicos, que registran cambios en el ambiente y las actividades antrópicas (Bi *et al.*, 2007). Por esta razón, han sido utilizados en diversos estudios para conocer las concentraciones, los flujos y la procedencia de los contaminantes metálicos, como se describen a continuación.

En cuanto a los trabajos realizados en LT, está el de Magallanes-Ordóñez *et al.* (2015), que determinaron los contenidos de Al, Ca, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Li, V, Pb y Zn en sedimentos superficiales, por el método de ICP-MS (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente por sus siglas en inglés). Los resultados del análisis del factor de enriquecimiento normalizado (NEF), mostraron un enriquecimiento natural de Ni (NEF: 11 ± 4) y Ca (NEF: 19 ± 18), así como un enriquecimiento moderado de As. Para Cu, Mo, Pb, V y Zn, no se reportaron enriquecimientos. No obstante, las concentraciones de As (4.7 mg kg^{-1}), Mn (571 mg kg^{-1}), Li (45 mg kg^{-1}), Cu (36 mg kg^{-1}), Mo (1.7 mg kg^{-1}), Ni (164 mg kg^{-1}), V (61 mg kg^{-1}), Pb (21 mg kg^{-1}) y Zn (69 mg kg^{-1}) se encontraron por arriba de las concentraciones promedio de la corteza terrestre (2, 527, 22, 14,3, 1,4, 18,6, 53, 17 y 52 mg kg^{-1} , respectivamente).

Cuevas Madrid *et al.* (2018) analizaron tres núcleos de sedimentos (C1, C2 y C3) de los manglares del interior de Isla del Carmen en LT. Los elementos mayores (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO, TiO_2) se determinaron por XRF (Fluorescencia de Rayos X), mientras que los metales traza (Zn, Ni, Cu, Pb, Cr, Cd y V) fueron determinados por EAA (Espectrofotometría de Absorción Atómica), con los métodos de flama y horno de grafito. En los núcleos C1 (FE: 7.5) y C2 (FE: 9.2) se encontraron enriquecimientos de Cr de moderados a severos, mientras que en C3 (FE: 3.3), el enriquecimiento de Cr fue menor. Los valores de Cd indicaron un enriquecimiento severo en C1 (FE: 16.7) y de severo a moderado en C2 (FE: 6.2) y C3 (FE: 7.0). Por otro lado, se reportaron valores de Cr (en los tres núcleos) de $102\text{-}353 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ y Ni (en C1 y C2) de $4.22\text{-}22.44 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ por encima del nivel TEL (nivel de efecto umbral) de 52.3 y $15.9 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente propuesto por Buchman (2008), lo que indica que los sedimentos podrían ser tóxicos para los organismos bentónicos.

Ruiz-Fernández *et al.* (2019) determinaron los niveles preindustriales de As, Ba, Cr, Cu, Pb, Ni, V y Zn, mediante la técnica de XRF, a partir del análisis 13 núcleos de sedimento recolectados al sur del Golfo de México. De los 13 núcleos solo 1 corresponde a la LT (LT1), en el cual, se observó que las concentraciones de Cr de $136.4\text{-}186.7 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ excedieron los valores TEL de $52.3 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ y PEL

(nivel de efecto probable; Buchman, 2008) de $160 \mu\text{g g}^{-1}$, del mismo modo, los valores de Ni ($64.3\text{-}104.4 \mu\text{g g}^{-1}$) se encontraron por arriba del valor PEL ($42.8 \mu\text{g g}^{-1}$), por lo que estos EPT podrían generar efectos negativos en la biota bentónica. Los factores de enriquecimiento de Cr y Ni en la mayoría de los núcleos fueron indicativos de fuentes naturales, tomando en cuenta esto en los núcleos de LT1 e Ixtoc1, donde los rangos de Cr y Ni fueron significativamente más altos ($p < 0.01$) que los otros núcleos, se concluyó que probablemente los elementos de Cr y Ni siempre han estado presente en el Sur del Golfo de México, relacionados con filtraciones de petróleo, la erosión de las rocas de composición félsica y máfica intermedia y la erosión por afloramientos ultramáficos-máficos, ricos en Cr y Ni, procesos de precipitación-disolución de la cromita en la costa de Tabasco, aporte de sedimentos enriquecidos con Cr por el río Grijalva-Usumacinta, y descargas de sedimentos fluviales.

Navarrete-Rodríguez *et al.* (2020) analizaron los contenidos de Pb y Cd por EAA, en sedimentos superficiales del sistema fluvial-lagunar-deltaico del río Palizada. Los índices de geoacumulación (I_{geo}) mostraron que el Cd se encontró en el rango de moderadamente a altamente contaminante y el Pb como no contaminante. Por otro lado, el Cd fue el elemento que presentó mayores concentraciones, con un valor máximo de $53.9 \pm 5.0 \mu\text{g g}^{-1}$, mientras que el valor máximo para Pb fue de $10.4 \pm 0.2 \mu\text{g g}^{-1}$. En cuanto a las comparaciones de las concentraciones de los EPT con los valores SQG (pautas de calidad del sedimento por sus siglas en ingles), se encontró que Las concentraciones de Cd de $53.9 \pm \mu\text{g g}^{-1}$ obtenidas en los sitios de muestreo presentaron valores que superaron los valores ERL (valores mínimos del umbral por sus siglas en ingles) de $1.2 \mu\text{g g}^{-1}$ y ERM (valores máximos del umbral) de $9.6 \mu\text{g g}^{-1}$, donde ERL, indica la concentración por debajo de la cual rara vez ocurren efectos adversos, mientras que el ERM es representativo de concentraciones por encima de las cuales, ocurrirían frecuentemente efectos adversos en organismos acuáticos (NOAA, 1999).

Ontiveros-Cuadras *et al.* (2022) reconstruyeron la acumulación histórica y los flujos de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn, mediante tres núcleos de sedimentos recolectados en áreas de praderas de pastos marinos del margen norte de LT. Los elementos se determinaron por XRF, excepto por Cd que se midió por EAA (horno de grafito). Los resultados mostraron enriquecimientos de moderados a fuertes de As (FE: 0.6-21.6) y menores para Cd (FE: 0.7-1.8), Ni (FE: 0.9-2.9), V (FE: 0.8-1.7) y Zn (FE: 1.0-1.7). En cuanto al análisis de la evaluación de riegos, se encontró que las concentraciones de Cu ($13.1\text{-}19.9 \mu\text{g g}^{-1}$), As ($0.5\text{-}13.7 \mu\text{g g}^{-1}$), Cr ($65\text{-}136 \mu\text{g g}^{-1}$) y Ni ($12.9\text{-}33.7 \mu\text{g g}^{-1}$) superaron los niveles TEL ($18.7, 7.2, 52.3$ y $15.9 \mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente), lo que indica que se podrían generar efectos adversos en la biota bentónica de la laguna.

Referente a investigaciones realizadas en otras lagunas costeras en México, Ruiz-Fernández *et al.* (2009) realizaron la reconstrucción histórica del enriquecimiento de Cd, Cu, Hg y Pb en núcleos de las lagunas costeras Ohuira, Chiricahueto y el Estero de Urías, ubicados en la planicie costera del sureste del Golfo de California. Los análisis del contenido de metales se realizaron por EAA. Los autores observaron que el sedimento de Chiricahueto, presentaba signos consistentes de contaminación por metales, con factores de enriquecimiento (FE) de 7, 10, 12 y 18 para Cu, Hg, Cd y Pb, respectivamente. Asimismo, los sedimentos de la laguna Ohuira, presentaron enriquecimiento por Cd con valores máximos de 8 y 27, mientras que en Estero de Urías se encontraron sedimentos enriquecidos por Hg con FE de 80.

Castañeda-Chávez *et al.* (2017) determinaron las concentraciones de Pb, Cd, Cu, Cr y Co, en el complejo lagunar de Alvarado en Veracruz, mediante la técnica de EAA. Las concentraciones de Pb, Cu y Cr estuvieron por debajo del límite permisible (Pb = 5 $\mu\text{g g}^{-1}$, Cu = 10 $\mu\text{g g}^{-1}$, Cr = 20 $\mu\text{g g}^{-1}$), que son valores de referencia para sedimentos no contaminados, propuestos por Sadiq (1992); sin embargo, el contenido promedio de Cd (0.858 ± 1.019 $5\mu\text{g g}^{-1}$) superó los valores de referencia para sedimentos no contaminados (1 $\mu\text{g g}^{-1}$) y los valores TEL (0.7 $\mu\text{g g}^{-1}$; Buchman, 2008).

Ontiveros-Cuadras *et al.* (2019) evaluaron la distribución, enriquecimiento y los flujos históricos de EPT, en tres núcleos de sedimento, EUI, EUII y EUIII de la laguna Estero de Urías, Mazatlán, con edades de 127 ± 5 , 78 ± 5 y 125 ± 7 respectivamente. Los elementos mayoritarios (Na, Al y Cl) y trazas (V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Br, Mo, Hg, Pb y U) se analizaron por XRF. Se identificaron enriquecimientos menores (FE 1.5- 3) para Cu (FE: 0.7-2.3), Zn (FE: 0.8-2.3), Pb (FE: 0.8-2.5) y As (FE: 0.3-2.9), así como enriquecimientos moderados (FE 3-5) de V (FE: 0.7-5.5), Ni (FE: 0.5-4.3) y Hg (FE: 0.7-20.0); también, se mencionó que las concentraciones de Hg (3.9-197.7 ng g^{-1}) y Ni (12.1-93.6 $\mu\text{g g}^{-1}$) podrían representar riesgo toxicológico para la biota debido a que superaron los valores TEL (130 ng g^{-1} y 15.9 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente) y PEL (700 ng g^{-1} y 42.8 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente, Buchman, 2008). En otro estudio, Ontiveros-Cuadras *et al.* (2021), determinaron las concentraciones de Al, Si, Cl, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, Ba, Pb y Th por XRF, en el sistema lagunar Xola-Paramán, México. Sus resultados mostraron un enriquecimiento menor de Ni, Cu, Zn y As en el sitio. Las concentraciones de Cu y Zn fueron más altas en comparación con otras áreas costeras de México, mientras que los valores de Ni y Cu superaron los niveles de referencia TEL (Buchman, 2008).

A nivel internacional, Pitacco *et al.* (2018) analizaron la distribución de los EPT, en sedimentos superficiales de la laguna Comacchio en Italia de 2002-2013. Los metales y metaloides (Fe, Mn, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, As y Hg) fueron analizados por ICP-MS. Los resultados mostraron que las concentraciones de Ni (48.2-70.5 mg kg^{-1}) y Cr (48.2 -105.6 mg kg^{-1}) excedieron los valores de estándares de calidad ambiental (EQS por sus siglas en inglés) establecidos por la agencia de la Unión Europea, pero no los valores naturales; lo anterior, sugirió que las concentraciones de Ni y Cr probablemente eran de origen natural. Por otro lado, durante el periodo estudiado se observó que las concentraciones de As (6.9 mg kg^{-1}), Cd (0.2 mg kg^{-1}) y Hg (0.04 mg kg^{-1}) no superaron los valores EQS, indicando la buena calidad de los sedimentos, ya que ninguno de estos elementos podría generar efectos adversos en los organismos bentónicos.

Shetaia *et al.* (2022) evaluaron las concentraciones y distribuciones de Pb, Mn, Cu, Fe, Zn y Cd, en 12 muestras de sedimentos superficiales y 4 núcleos de sedimento de la laguna Burullus en Egipto, por EAA. Sus resultados mostraron que, los principales contaminantes en el sitio fueron el Zn y Cd, ya que sus concentraciones de 276-1495 y 0.3-7.1 mg kg^{-1} respectivamente superaron los valores de la corteza continental superior (70 y 0.2 mg kg^{-1}) y los valores basales locales (104 y 0.4 mg kg^{-1}); en cambio, Fe, Cu y Hg (18.182-84.260, 17-62 y 0.0013-0.052 mg kg^{-1}) se encontraron dentro del intervalo de valores locales y regionales. En cuanto a la evaluación de los sedimentos superficiales con base a las pautas de calidad de los sedimentos (SQG), se observó que las concentraciones de Zn (308-1509 mg kg^{-1}) superaron los valores PEL (271 mg kg^{-1}), lo que indicaría impactos adversos frecuentes en la biota que está en contacto con los sedimentos. Las concentraciones de Cu (20.8-63.9 mg kg^{-1}) y Cd (0.75-6.3 mg kg^{-1}) se encontraron entre los valores TEL (18.7 y 0.68 mg kg^{-1} respectivamente) y PEL (108 y 4.21 mg kg^{-1} respectivamente), lo que indica un impacto adverso ocasional en la biota, mientras que, los contenidos de Pb (11.9-36.2 mg kg^{-1}) y

Hg ($0.004\text{-}0.052\text{ mg kg}^{-1}$) estuvieron por debajo de los valores TEL (30.2 y 0.13 mg kg^{-1} respectivamente) y TEC (53 y 0.18 mg kg^{-1} respectivamente), lo que significa que raramente se presentan efectos biológicos.

En la laguna Pinqin, ubicada en la provincia de Guangdong al sur de China, Xian *et al.* (2022) analizaron el contenido de metales y metaloides (Al, Fe, Mn, V, Zn, Cr, Co, Ni, Cu, As, Cd, Sb, Ba, Pb) en tres núcleos de sedimento: PQ1, PQ2 y PQ3, donde PQ2 fue seleccionado como núcleo maestro, ya que abarca desde el año ~ 1855 . Elementos como el Al, Fe, Mn, V y Zn fueron medidos por ICP-AES, mientras que Cr, Co, Ni, Cu, As, Cd, Sb, Ba y Pb se midieron por ICP-MS. Los resultados del índice de contaminación (C_i^I) de este estudio indicaron que los valores de Cu alcanzaron el estado de contaminación moderada, mientras que el resto de los elementos se clasificaron como contaminación baja. En cuanto los valores medios del factor de riesgo del metal individual (E_r^i), se identificó un riesgo ecológico medio para el Cd, y un riesgo bajo para el resto de los elementos. Del análisis de conglomerados que se utilizó para relacionar a los EPT con sus posibles fuentes, se encontró que la mayoría de los EPT (Cu, Zn, Cd, Pb, As, Sb) provienen de fuentes antropogénicas (e.g., fertilizantes químicos, combustión de combustibles fósiles, la extracción y fundición de metales no ferrosos).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar las concentraciones, enriquecimiento y flujos de As, Cd y Zn en núcleos de sedimento fechados con ^{210}Pb , recolectados en laguna de Términos, Campeche.

1.2.2 Objetivos particulares

1. Determinar las concentraciones de As, Cd y Zn en las muestras de sedimento.
2. Evaluar las concentraciones naturales y los factores de enriquecimientos de As, Cd y Zn en los núcleos de sedimento.
3. Describir los cambios temporales en los flujos de As, Cd y Zn utilizando la radiocronología con ^{210}Pb .

2. Marco teórico

2.1 Lagunas costeras

Las lagunas costeras (LC) son cuerpos de agua poco profundos (~2m), parcialmente aislados del mar por una barrera sedimentaria (Barnes, 2001). Se ubican en una zona de transición entre el océano y el continente, lo que permite el ingreso de aguas marinas y continentales (e.g., descarga de ríos). Esta característica determina la existencia de intensos gradientes de salinidad y temperatura (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019). Asimismo, las LC reciben importantes cantidades de materia orgánica, nutrientes y sedimentos a través de los ríos, las aguas subterráneas y el mar (Durán y Méndez, 2010).

Lo anterior hace que las lagunas costeras sean ecosistemas diversos, complejos y de los más productivos del mundo, donde se desarrollan humedales, pastos marinos, arrecifes de coral, marismas y manglares (Wit, 2011; Basset *et al.*, 2013). Así mismo, las LC son un refugio, lugar de crianza y alimentación de diferentes microorganismos, plantas y animales (residentes y migratorios), como peces, aves y crustáceos (Newton *et al.*, 2018; Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019; Garcés-Ordóñez *et al.*, 2022).

Las LC ofrecen una variedad de servicios ambientales, ecosistémicos y socioculturales (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019), ya que protegen a la zona de costa de inundaciones, atenúan el oleaje, previenen la erosión y purifican el agua a través de la absorción de contaminantes; además, proveen materias primas y alimentos (recursos pesqueros), permitiendo el desarrollo de la pesca, caza, al igual que el turismo y actividades recreativas y de investigación (Barbier, 2012). Sin embargo, el mal manejo y aprovechamiento de estos servicios y recursos por el hombre ha provocado el deterioro de los mismos, como lo es la contaminación por elementos potencialmente tóxicos (EPT; e.g., As, Cd, Zn) (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019).

2.2 Sedimentos y la acumulación de EPT

La contaminación por EPT en las lagunas costeras está relacionada con los sedimentos, ya que más del 99.9% se almacena en los depósitos sedimentarios, mientras que menos del 0.1% se disuelve en el agua (Pradit *et al.*, 2013). Por ello, los sedimentos son considerados fuente y sumidero de diversos contaminantes, en especial los sedimentos compuestos por partículas finas, del tipo limos y arcillas (Cheng *et al.*, 2019).

Los sedimentos son producto de la desintegración y descomposición de las rocas, acumulan materia orgánica autóctona y alóctona, así como de los precipitados químicos y bioquímicos. Las partículas sedimentarias son transportadas de un sitio a otro por agentes naturales como el aire, el agua y el hielo (Ruhl, 1997; Nichols, 2009; Pérez y Márquez, 2017). Las propiedades físicas y químicas de los sedimentos son factores importantes que determinan la concentración y distribución de contaminantes metálicos (Özşeker *et al.*, 2022). Dentro de las propiedades físicas, se encuentran el tamaño de grano (arena de 0.05-2.0 mm, limo de 0.002-0.05 mm y arcilla <0.002 mm; Mobilian y Craft, 2022), la redondez y el color, mientras que en sus propiedades químicas se incluye la composición, la cantidad y el tipo de minerales, de materia orgánica, de elementos (metales y metaloides) y de sus especies químicas (Ávila *et al.*, 2014; McLennan y Murray, 1998).

El tamaño de grano es una de las propiedades que tienen mayor influencia en la concentración de EPT debido a la relación que hay entre la superficie-volumen y la composición

química, como consecuencia de las reacciones químicas que ocurren en los sedimentos (Özşeker *et al.*, 2022). De este modo, los sedimentos de granos más finos y pequeños, como limos y arcillas, tienen un mayor contenido de metales y materia orgánica, como resultado de interacciones como el intercambio de iones (Ongley, 1997).

Los contaminantes metálicos acumulados en los sedimentos pueden afectar negativamente a los organismos acuáticos y a los ecosistemas a través de los procesos de bioasimilación y bioacumulación. Por tanto, el estudio de la acumulación de los EPT en los sedimentos es indispensable para evaluar las condiciones ambientales de los sistemas acuáticos (Li *et al.*, 2021; Özşeker *et al.*, 2022).

2.3 Elementos potencialmente tóxicos

Los EPT son elementos tanto esenciales, como no esenciales para la vida, que en determinadas concentraciones pueden ser tóxicos para distintos organismos (Daniel *et al.*, 2008; Ávila, 2017). Su toxicidad está en función de la exposición, concentración y biodisponibilidad (Zhang *et al.*, 2022). Dentro de los elementos esenciales se encuentra al cromo (Cr), zinc (Zn) y cobre (Cu), mientras que en los elementos no esenciales están el arsénico (As), mercurio (Hg), cadmio (Cd) y plomo (Pb) (Atamaleki *et al.*, 2020). La concentración y distribución de estos elementos en los sedimentos depende de los parámetros fisicoquímicos como el pH, el potencial redox, la cantidad y composición de la materia orgánica, y la temperatura. Asimismo, un cambio en estos parámetros puede provocar su liberación hacia la columna de agua, siendo un peligro latente para los diferentes organismos acuáticos (Gómez, 2003; Hagnazar *et al.*, 2021).

Las fuentes de los EPT pueden ser naturales, producto de la meteorización de las rocas, la erosión y las erupciones volcánicas o antropogénicas; o antrópicas, producto de las actividades mineras, industriales, petroleras, la descarga de aguas residuales y el uso de pesticidas y fertilizantes en la agricultura (Alharbi *et al.*, 2022; Hoshyari *et al.*, 2023). De hecho, las fuentes antrópicas han sido las responsables del aumento de las concentraciones de los EPT en el ambiente.

A continuación, se hace una breve descripción general de los elementos analizados en el presente trabajo.

2.3.1 Arsénico

El arsénico (As) es un metaloide altamente tóxico y ubicuo en el ambiente (Liu *et al.*, 2022), clasificado como elemento carcinógeno por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, que ocupa el primer lugar en la lista de prioridades de 2001 como sustancia peligrosa, y causante de enfermedades, definido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Shaji *et al.*, 2021). La exposición inmediata al As puede provocar vómitos, dolor abdominal, calambres musculares y diarrea, mientras que una exposición prolongada puede producir lesiones cutáneas (hiperqueratosis), enfermedades cardiovasculares, pulmonares y diabetes (World Health Organization: WHO, 2022).

Este elemento y sus compuestos son utilizados en la medicina, la agricultura, la metalurgia, en la electrónica y en productos como tintes, textiles, pesticidas, papeles y en la alimentación para ganado (Alharbi *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022).

En la corteza terrestre el contenido promedio de As se encuentra alrededor de 1.5 y 2 $\mu\text{g g}^{-1}$, mientras que en los diferentes tipos de rocas es de aproximadamente 5 y 10 $\mu\text{g g}^{-1}$. Los valores más altos de As se han reportado en arcillas marinas ricas en materia orgánica y en suelos ácido-sulfatados, con concentraciones naturales de hasta 900 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Keesari *et al.*, 2022). Generalmente el As en aguas estuarinas, marinas y en sedimentos se puede encontrar en cuatro estados de valencia, +5 (arseniatos), +3 (arsenitos), 0 (metaloide) y -3 (gas arsina), donde el arseniato es la forma dominante (Neff, 1997).

2.3.2 Cadmio

El cadmio (Cd), al igual que el As, es considerado un elemento tóxico y cancerígeno (Zhang y Reynolds, 2019; Wang *et al.*, 2020), ocupa el octavo lugar en la lista de prioridades de las principales sustancias peligrosas de la OMS (Chen *et al.*, 2021). La ingesta de Cd puede provocar vómitos y diarrea, mientras que la exposición prolongada de este elemento puede dañar los pulmones, provocar osteoporosis, diferentes tipos de cáncer (cáncer de mama, pulmón, próstata, nasofaringe, páncreas y riñón) y enfermedades renales y hepáticas (Centers for Disease Control and Prevention 2017; Genchi *et al.*, 2020).

El Cd se utiliza principalmente en la producción de baterías, fertilizantes fosfatados, aleaciones, revestimientos, chapado y estabilizadores para plásticos, así como en el reciclaje de productos electrónicos, desechos metálicos y municipales (Zhang y Reynolds, 2019; Celis-Hernández *et al.*, 2022).

La abundancia del Cd en la corteza terrestre es de 0.15 $\mu\text{g g}^{-1}$, mientras que en el mar es de 1.1 μL^{-1} , en los suelos se encuentra entre 0.1 y 1 $\mu\text{g g}^{-1}$ y en las aguas subterráneas, como producto de la meteorización de las rocas, es de $\sim 1 \mu\text{g L}^{-1}$ (Zhang y Reynolds, 2019; Kubier *et al.*, 2019). Dentro de las especies de Cd que se encuentran en solución en el agua de mar están: CdCl^+ , CdCl_2 y CdCl_3^{-1} (Neff, 2002a).

2.3.3 Zinc

El zinc (Zn) es un metal y micronutriente esencial para la vida (Xie *et al.*, 2019), ya que está involucrado en numerosos procesos bioquímicos, fisiológicos, en la función inmunológica y actúa como cofactor de proteínas y ácidos nucleicos (Marasinghe-Wadige *et al.*, 2014). Por el contrario, las altas concentraciones de este elemento son tóxicas en los seres vivos; en los seres humanos, la ingesta excesiva de Zn puede causar anemia, dañar el páncreas y disminuir los niveles de colesterol bueno (colesterol de lipoproteínas de alta densidad HDL; Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2005).

El Zn es empleado en la producción de metales y galvanización, en la industria automovilística, farmacéutica y electrónica, y en la ingeniería biológica y agroalimentaria (Marasinghe-Wadige *et al.*, 2014; Tonhá *et al.*, 2020).

El Zn representa el 0.012% de la corteza terrestre, así en estuarios y lagunas costeras sus concentraciones pueden variar de entre 4 y 25 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Neff, 2002b). El Zn se puede solubilizar y transportar fácilmente en aguas con altos contenidos de materia orgánica y condiciones ácidas, ya que su especie acuosa dominante es el ion Zn^{2+} (Macphail *et al.*, 2003). En sedimentos anóxicos, el sulfuro de zinc (ZnS) es la fase dominante que causa su inmovilización y limita su biodisponibilidad,

aunque la oxidación del ZnS puede provocar la liberación y movilización del metal a la columna de agua (Xie *et al.*, 2019).

2.4 Fechamiento con ^{210}Pb

El fechado con ^{210}Pb es un método radiométrico que se aplica a sedimentos recientes (menores a 150 años), para construir modelos de profundidad-edad, que permiten examinar cambios ambientales relacionados con actividades antropogénicas o eventos naturales (Courtney-Mustaphi *et al.*, 2019; Abril, 2019). El ^{210}Pb es un radionúclido natural que pertenece a las series de decaimiento del ^{238}U y tiene una vida media de 22.3 ± 0.12 años (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2012). El ^{210}Pb se origina a través de la desintegración del ^{222}Rn , que a su vez procede del ^{226}Ra de origen litogénico (Bonczyk, 2013; Sánchez-Cabeza *et al.*, 2012). De este modo, en los sedimentos se puede encontrar al ^{210}Pb de base, que se produce *in situ* (por la desintegración de ^{226}Ra) y al ^{210}Pb en exceso, que proviene de la incorporación del ^{210}Pb de la atmósfera (Gevao *et al.*, 2021).

Para aplicar los modelos de edad y estimar las tasas de acumulación, se utilizan los perfiles de actividad del ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$), el cual se determina como la diferencia del ^{210}Pb total y el ^{210}Pb de base ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{total}} - ^{210}\text{Pb}_{\text{de base}}$) (Pittauerová *et al.*, 2011). La concentración de ^{210}Pb se puede medir mediante la técnica de espectrometría alfa a través del ^{210}Po , suponiendo equilibrio secular entre ambos radionúclidos (Bonczyk, 2013), y por espectrometría gamma, con detectores de Ge de alta resolución. Uno de los modelos de fechado con ^{210}Pb más utilizados es el CF o flujo constante, también conocido como modelo de tasa constante de suministro (CRS por sus siglas en inglés) (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2012). En este modelo se asume el flujo de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en los sedimentos es constante a lo largo del tiempo, donde la cantidad de ^{210}Pb en cada capa de sedimento es proporcional a su edad (Appleby y Oldfield, 1978); asimismo, en el modelo se asume que no hay procesos de mezcla significativos en el sedimento que puedan afectar la distribución del ^{210}Pb en las capas sedimentarias (Robbins, 2006).

3. Área de estudio

Laguna de Términos (LT) está localizada en el estado de Campeche. Tiene una extensión de aproximadamente 70 km de largo y 30 km de ancho, con una profundidad promedio de 3.5 m (Noreña-Barroso *et al.*, 1999) y un área superficial de 2500 km² (García-Ríos *et al.*, 2014). La laguna se conecta con el mar a través de dos ensenadas: El Carmen y Puerto Real, que están separadas por una barrera rica en carbonatos (isla del Carmen) (Grenz *et al.*, 2017). Por otro lado, LT está separada del Golfo de México por la isla del Carmen (García-Ríos *et al.*, 2014).



Figura 1. Mapa de ubicación de la Laguna de Términos, Campeche.

3.1 Clima

De manera general, el clima de la región es tropical húmedo y se caracteriza por tener una época de secas que va de febrero a mayo, así como una época de lluvias que se presenta de junio a septiembre (Grenz *et al.*, 2017), con una precipitación anual de 1100 a 2000 mm (Carvalho *et al.*, 2009) y una temporada de vientos que soplan del noroeste, conocidos como “nortes”, que se presentan de noviembre a marzo (Fichez *et al.*, 2017; Jensen *et al.*, 1989). De acuerdo con la clasificación de Köppen (Carabias Lillo, 1997), los tres tipos de clima en el área aparecen descritos en la Tabla 1.

Tabla 1. Clima de la región de LT de acuerdo con la clasificación de Köppen.

| <i>Clima</i> | <i>Simbología</i> | <i>Distribución</i> |
|---|-------------------|---|
| Cálido subhúmedo intermedio con lluvias en verano | Aw1(w) | Se distribuye en la Isla Aguada, frente a la Boca de Puerto Real. |
| Cálido subhúmedo con mayor humedad | Aw2(w) | Pertenece a la zona que rodea la Laguna de Términos y la Isla del Carmen. |
| Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano | Am(f) | Se distribuye desde la zona Palizada, Pom-Atasta hasta el Río San Pedro. |

Información obtenida del Programa de Manejo de la Zona de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos del Instituto Nacional de Ecología.

3.2 Hidrología

En LT desembocan los ríos: 1) Palizada, proveniente de la red hidrológica de los ríos Grijalva y Usumacinta; 2) Chumpán, formado en la planicie costera por los ríos Salsipuedes y San Joaquín; y 3) Candelaria-Mamantel, ubicado en la cuenca que situada entre la península de Yucatán y una pequeña porción de la República de Guatemala (Botello, 1977; Noreña-Barroso *et al.*, 1999). Dentro de estos ríos, el río Palizada es el que aporta la mayor cantidad de agua dulce, el cual tiene un caudal promedio de $288 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que los ríos Candelaria y Chumpán presenta un caudal promedio de $72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y de $18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente (David y Kjerfve, 1998). La entrada anual de agua dulce a LT es de $\sim 12.5 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, donde la descarga de ríos representa alrededor del 95.42 %, la precipitación el 4.55 % y la infiltración de agua subterránea el 0.03 % (Fichez *et al.*, 2017).

Por otro lado, las aguas marinas ingresan a LT del lado este, es decir a través de la boca de Puerto Real y circulan en dirección oeste, saliendo por la boca del Carmen. Este patrón de circulación se presenta durante la época de secas, ya que durante la estación húmeda las dos bocas exportan el agua de LT hacia el mar (Grenz *et al.*, 2017). Del mismo modo, la circulación de LT se ve influenciada con la estacionalidad de los vientos, de modo que, durante la temporada de nortes, estos vientos producen un flujo de agua de oeste a este (Noreña-Barroso *et al.*, 1999).

3.3 Propiedades fisicoquímicas

3.3.1 Salinidad

Los valores de salinidad en LT varían en tiempo y espacio, ya que la laguna está sujeta a cambios en el clima (temporada de lluvias y secas) y a la entrada de agua marina y dulce (descarga de ríos). De manera que la salinidad varía a lo largo y ancho del cuerpo de agua, dependiendo de las características de la zona en la que este parámetro sea medido. De esta manera, se tiene registro de los valores de salinidad de 5 zonas, descritas en la Tabla 2. De forma general, los valores promedios de salinidad en LT son de 5-32 ppt; el promedio máximo es 28.6 ppt, durante el mes de junio y el promedio mínimo de 9.2 ppt en noviembre (Bach *et al.*, 2005).

Tabla 2. Valores de salinidad de LT de acuerdo con la distribución espacial y temporal.

| <i>Zona</i> | <i>Valores de salinidad (ppt)</i> |
|--|-----------------------------------|
| Zona afectada por la descarga de los sistemas fluvio-lagunares | 9.2 a 28.6 |
| Zona de transición entre los sistemas fluvio-lagunares y el litoral interno de la Isla del Carmen | 10.0 a 36.0 |
| Norte de la Laguna, al lado de la Isla del Carmen | 14.9 a 34.7 |
| Boca de Puerto Real influenciada por las aguas marinas del Golfo de México (escaso aporte de agua dulce) | 22.0 a 40.0 |
| Boca del Carmen influenciada por la entrada de agua dulce de los sistemas fluvio-lagunares y las aguas marinas del Golfo de México | 6.8 a 31.3 |

Información obtenida del Programa de Manejo de la Zona de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos del Instituto Nacional de Ecología.

Nota: los valores mínimos de salinidad reportados en la tabla por lo general pertenecen a la época de lluvias, mientras que los valores altos pertenecen a la época de secas

3.3.2. Oxígeno disuelto y nutrientes

La LT presenta valores de saturación de oxígeno de 86 a 150%, lo que indica que sus aguas tienen una buena oxigenación (Vazquez Botello, 1978) como resultado de la influencia de los vientos (FIR, 2003). Por otro lado, las concentraciones promedio de silicatos en la LT son de $\sim 70 \mu\text{M}$, mientras que las concentraciones de nitrógeno inorgánico se encuentran entre 0 a $4 \mu\text{M}$ cerca del río Palizada y con valores menores a $1 \mu\text{M}$ en la parte central; de igual forma, las concentraciones promedio de fosfato son de $\sim 0.13 \mu\text{M}$ (i.e., ortofosfato; Grenz *et al.*, 2017).

3.4 Geología

La LT abarca dos provincias fisiográficas, del lado occidental forma parte de la llanura costera del Golfo Sur y del lado oriental de la península de Yucatán. La primera provincia fisiográfica se caracteriza por presentar depósitos de suelos aluviales de textura fina, mientras que la segunda provincia se define por ser una plataforma de rocas sedimentarias principalmente calcáreas y presentar suelos poco desarrollados generalmente arcillosos (INEGI, 2016).

Los sedimentos que predominan en LT son limos y arcillas, con arenas calcáreas situadas en la parte oriental de la laguna. Del lado occidental, los sedimentos se caracterizan por ser limo-arcillosos (terrágenos) (Grenz *et al.*, 2017) como resultado de la descarga de los ríos Palizada y Chumpan (UAC, 2007). Los sedimentos con limos predominantes son ricos en materia orgánica y en donde abundan las arenas, son ricos en silicatos de aluminio y carbonatos (Magallanes-Ordoñez *et al.*, 2015). La isla del Carmen es una barrera de arena calcárea del Holoceno (Contreras *et al.*, 2014). Por otro lado, en la boca oeste de la laguna se forma un delta exterior orientado hacia el oeste del Golfo de México causado por la alta turbidez que generan los materiales terrígenos suspendidos del río Palizada. Asimismo, los sedimentos acumulados fuera de la ensenada Carmen forman un pequeño delta aluvial fuera de la laguna; mientras que en la ensenada de Puerto Real forma un delta aluvial interior como producto de la dirección de la corriente (Grenz *et al.*, 2017).

En cuanto a la litología de LT (Tabla 1), gran parte de las rocas que conforman esta laguna pertenecen a la era Cenozoica, donde el ambiente marino de la región fue somero y permitió el depósito de rocas sedimentarias, hasta que el área emergió a través de los procesos de la orogenia

Laramide, que dieron pie a la formación de rocas detríticas, principalmente en la llanura costera del Golfo Sur (INEGI, 2016).

Tabla 3. Litología de la Laguna de Términos.

| <i>Roca/suelo</i> | <i>Edad</i> | <i>Características</i> |
|------------------------|-------------|---|
| Caliza Te(cz) | Eoceno | Calizas microcristalinas pertenecientes a la formación de Chichén Itzá. |
| Arenisca Tm(ar) | Mioceno | Materiales de depósito de talud originados por la Orogenia Chiapaneca. |
| Caliza Q(cz) | Cuaternario | Calizas microcristalinas con fragmentos de fósiles (coquinas) pertenecientes a la formación Carrillo Puerto. |
| Caliche Q(ch) | Cuaternario | Mezcla de carbonato de calcio con arenas, limos, arcillas y gravas. |
| Suelos palustres Q(pa) | Cuaternario | Suelos ricos en sedimentos con alto contenido de arcillas y materia orgánica en descomposición con largos periodos de saturación de agua. |
| Suelos litorales Q(li) | Cuaternario | Suelos de depósitos arenosos provenientes del arrastre del oleaje o del viento. |
| Suelos lacustres Q(la) | Cuaternario | Suelos con materiales de textura fina, ricos en materia orgánica. |
| Suelos aluviales Q(al) | Cuaternario | Suelos conformados por material terrígeno proveniente de rocas preexistentes que se encuentran en la parte alta de las cuencas. |

La información de la tabla se obtuvo del "Estudio de información integrada de la Cuenca Laguna de Términos y otras" realizado por INEGI en 2016.

3.5 Biodiversidad

Las características, físicas, químicas y geológicas de la LT han permitido el desarrollo de una gran biodiversidad, de modo que, para conservarla y protegerla en 1994 fue declarada Área de Protección de Flora y Fauna (APFF), dentro de las categorías de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y sitio RAMSAR en 2004 (Carabias-Lillo *et al.*, 1997).

La vegetación en LT está representada por tipos terrestre, acuática y subacuática, como la selva alta perennifolia y subperennifolia, la selva mediana subcaducifolia, la selva baja perennifolia, los pastizales, el matorral espinoso, los bosques de manglares, pastos marinos, dunas costeras, los popales y los tulares (UAC, 2007; CONANP, 2021). Estos tipos de vegetación han creado diversos hábitats para la fauna de LT, siendo sitios de reproducción, anidación, crianza y migración (Venegas-Pérez, 2003).

Dentro de la fauna que se encuentra en la LT están los organismos terrestres y acuáticos, que representan alrededor de 1468 especies, conformados por 134 especies de mamíferos, 279 especies aves, 48 especies de anfibios, 361 especies peces, 134 especies de reptiles, 7 especies de crustáceos, 207 especies de moluscos y 74 especies de insectos (UAC, 2007; Venegas-Pérez, 2003). Ejemplos de la fauna son el jaguar, el mono araña, el carao, el halcón peregrino, la garza blanca, la cigüeña americana, el cocodrilo de río y de pantano, el caimán el, la tortuga de carey y blanca,

delfines mulares, el manatí, el camarón blanco y rosado, la jaiba, entre otros (UAC, 2007). De las 1468 especies registradas, 30 son endémicas de México, 89 presentan algún grado de riesgo o amenaza y 132 son de interés comercial (Carabias-Lillo *et al.*, 1997).



Figura 2. Vegetación de la Laguna de Términos, obtenida del sitio web LANRESC (Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera: Laguna de Términos).

3.6 Actividades económicas

La región de la LT comprende parte de los municipios El Carmen, Palizada, Escárcega y Champotón (UAC, 2007), con alrededor de 205,487 habitantes (CONANP, 2021), distribuidos en 28 localidades de estos municipios, donde el 85% se asienta en Ciudad del Carmen (Venegas-Pérez, 2003). Parte de la región está distribuida en propiedad privada (23%), donde predominan las actividades pecuarias, así como en terrenos y aguas nacionales (64%) y los terrenos ejidales (13%), que se destinan principalmente a la agricultura temporal (Carabias-Lillo *et al.*, 1997).

Dentro de las actividades económicas que se llevan a cabo alrededor de LT se encuentran la agricultura, la ganadería, la pesca, el turismo, la acuicultura y la extracción de petróleo y gas. Estas últimas son de las más importantes, ya que representa el 80% de crudo y el 30% de gas de la producción nacional, donde PEMEX extrae ~2 millones de barriles por día en la bahía de Campeche (Carvalho *et al.*, 2009; Grenz *et al.*, 2017; Venegas-Pérez, 2003). La extracción de petróleo se realiza principalmente en la sonda de Campeche, Ciudad del Carmen y la península de Atasta (Venegas-Pérez, 2003). Por lo que, Ciudad del Carmen, en términos económicos, se ha convertido en una de las localidades más importantes de Campeche (Carabias-Lillo *et al.*, 1997).

Una de las zonas pesqueras más relevante de la región es la sonda de Campeche, la cual aporta ~34% del rendimiento total de la pesca mexicana en las costas del Golfo y el Caribe (Grenz *et al.*, 2017). Mientras que la pesca y la acuicultura en menor escala se lleva a cabo en las sublagunas de la península Atasta (Bach *et al.*, 2005). Por otro lado, en el municipio de Palizada las

principales actividades económicas son la pesca, la agricultura (para autoconsumo) y la ganadería (Carabias-Lillo *et al.*, 1997). Otras de las actividades económicas de la región están relacionada con el desarrollo de la infraestructura y las vías de comunicación, como la elaboración de carreteras, donde una de las más importantes cruza el Área Natural Protegida Laguna de Términos (i.e., carretera costera del Golfo: Villahermosa – Zacatal y Ciudad del Carmen – Campeche) (Venegas-Pérez, 2003).

4. Metodología

4.1 Muestreo

El 11 de febrero de 2021 fueron recolectados 3 núcleos de sedimento (LT01, LT02 y LT03) en laguna de Términos, Campeche (Figura 2), a través de un nucleador de gravedad tipo UWITEC TM, que utiliza tubos de plexiglás de 1.2 m de longitud, con diámetro interno de 8.6 cm. La información general de los sitios de recolección de los núcleos se muestra en la Tabla 4.

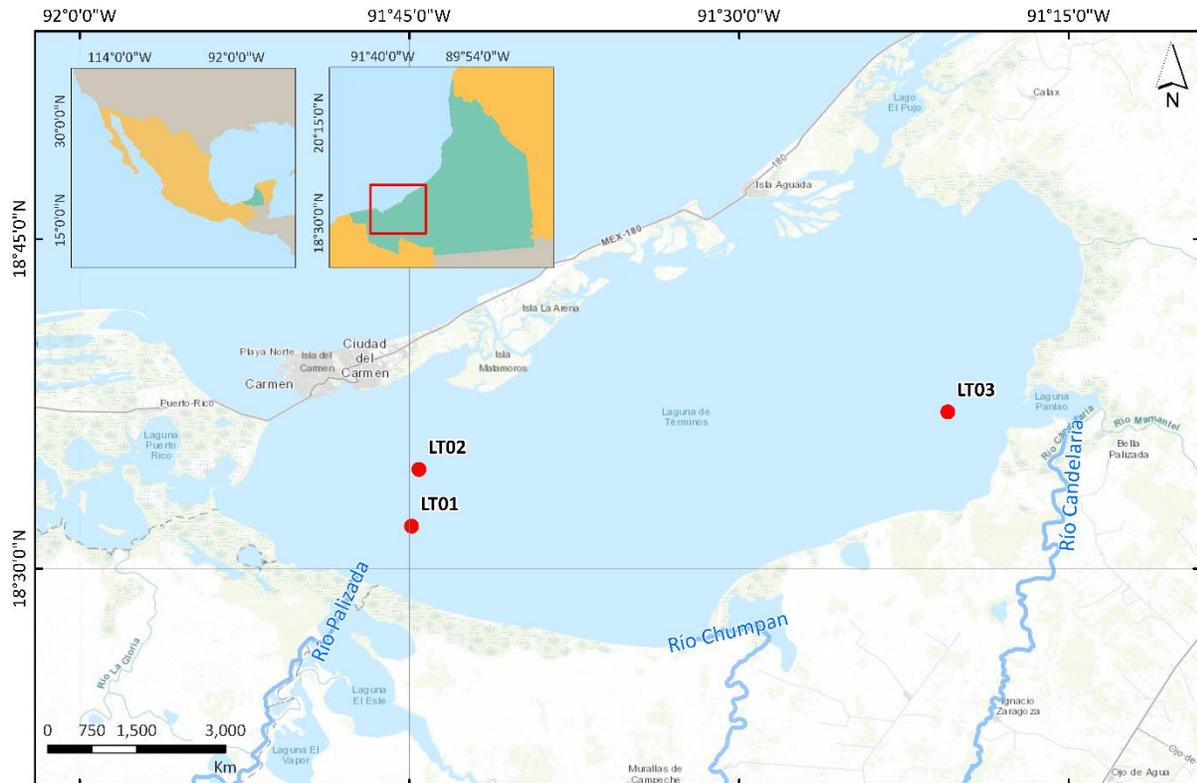


Figura 3. Sitios de recolección de los núcleos de sedimentos (puntos en rojo) dentro de la Laguna de Términos, Campeche.

Tabla 4. Información de los sitios de recolección de los núcleos de sedimentos en la Laguna de Términos, Campeche.

| Núcleo | Coordenadas | Longitud (cm) | Profundidad de la columna de agua (m) |
|--------|-----------------------|---------------|---------------------------------------|
| LT01 | 18°31.56 N 91°44.54 O | 28 | 3.0 |
| LT02 | 18°34.31 N 91°43.94 O | 23 | 3.2 |
| LT03 | 18°37.08 N 91°20.30 O | 29 | 3.0 |

Los núcleos fueron seccionados desde la superficie hasta la base, a intervalos de 1 cm. Posteriormente, en el laboratorio de Geoquímica Isotópica y Geocronología (GEOCRON) del ICML de la UNAM, las secciones de sedimento se congelaron, liofilizaron y homogeneizaron (excepto por las alícuotas utilizadas para el análisis de tamaño de grano) con ayuda de morteros de porcelana, para almacenarse en bolsas de polietileno (Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2021). Del mismo modo, la

radiocronología con ^{210}Pb en los núcleos de sedimento y la distribución de tamaño de grano (granulometría) se obtuvo con apoyo del grupo de investigación GEOCRON.

4.2 Tamaño de grano

La determinación relativa del tamaño de partículas de arenas ($> 63 \mu\text{m}$), limos ($2-63 \mu\text{m}$) y arcillas ($< 2 \mu\text{m}$), se realizó por difracción láser en un equipo Malvern Mastersizer modelo 2000. Se utilizaron alícuotas de sedimento (0.20 g) sin moler, previamente tratadas con H_2O_2 para digerir la materia orgánica y sumergidas en baño sónico durante 3 minutos (Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2019).

4.3 Fechado con ^{210}Pb

Las actividades (Bq kg^{-1}) de ^{210}Pb , ^{226}Ra y ^{137}Cs fueron determinadas por espectrometría gamma, utilizando detectores de HPGe, Ortec-Ametek. En el análisis se utilizaron alícuotas de 4 mL de sedimento homogeneizado, que se colocaron en viales de polietileno de 5.6 cm de largo y 1.1 cm de diámetro interno, los cuales fueron sellados con tapón de goma y cinta teflón. La actividad de ^{210}Pb se determinó en la región de energía de 46.5 keV y la de ^{137}Cs , en la región de 661.7 keV. La actividad de ^{226}Ra (i.e., $^{210}\text{Pb}_{\text{soportado}}$), se determinó mediante el análisis de la actividad de ^{214}Pb (351.9 keV), asumiendo equilibrio secular entre ambos isótopos (Sanchez-Cabeza *et al.*, 2010). Los viales sellados se almacenaron por 21 días, previo a su análisis, para asegurar el equilibrio entre el ^{226}Ra y los descendientes de ^{222}Rn , que es un gas. Los tubos se colocaron en los detectores durante 2-3 días, para obtener una incertidumbre de conteo $<10\%$ para el ^{210}Pb (Díaz-Asencio *et al.*, 2020). Para realizar el fechado con ^{210}Pb , calcular las TAM y TAS, se utilizó el modelo de flujo constante (Sanchez-Cabeza *et al.*, 2012). Entonces, considerando que:

Δz_i : es el espesor de la sección i (m) y se obtiene de:

$$\Delta z_i = z(i) - z(i-1)$$

Donde: $z(i)$ es la profundidad de la capa (i) (m).

Δm_i : es la masa de la sección i (kg), determinada experimentalmente.

Δt_i = es el período de formación de la sección i (años) y se obtiene de:

$$\Delta t_i = t(i) - t(i-1)$$

Donde: $t(i)$ es la edad media de la capa.

Se calculo las TAM y TAS con las siguientes ecuaciones:

$$r_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i} \quad S_i = \frac{\Delta z_i}{\Delta t_i}$$

Para el fechado de cada sección del núcleo se tomó en cuenta que: 1) el inventario total de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Bq m^{-2}) del núcleo es constante ($I \equiv A(0)$); donde el inventario, se refiere al balance que hay entre el flujo de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ y su desintegración radiactiva. Del mismo modo $A(i)$, que es la actividad acumulada por unidad de área debajo de la capa (i) (Bq m^{-2}), se consideró constante ($A(i, t=0) = A(0)$), ya que la actividad acumulada en una capa desde el momento de su formación fue la superficie

del núcleo. Entonces, la ecuación para la actividad acumulada por unidad de área bajo la capa (i) que es:

$$A(i) = A(i, t = 0) e^{-\lambda t}$$

Se puede expresar como:

$$A(i) = A(0) e^{-\lambda t}$$

Despejando t de la ecuación anterior, la edad de cada capa (i) se obtiene con la siguiente ecuación:

$$t(i) = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A(0)}{A(i)}$$

4.4. Determinación de MO

Para determinar el contenido de MO (%) en los núcleos de sedimento se utilizó el método de pérdidas por ignición (PPI) (Berglund *et al.*, 1986; Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2019). Para ello se pesaron 1.5 g de sedimento seco y homogeneizado en una balanza analítica (Sartorius modelo M-pact) y se colocaron en crisoles de porcelana a peso constante, los cuales fueron calcinados en una mufla (Thermolyne, modelo Furnace 1500) a 550 °C durante 4 horas. Posteriormente se cuantificaron las diferencias de peso en las muestras después de la combustión, para estimar el contenido de MO.

4.5. Determinación de carbonatos

Del mismo modo, la determinación de carbonatos (%) se llevó a cabo por el método PPI. Donde se utilizaron 0.4 g de la muestra calcinada producto de la determinación de carbono orgánico y fueron llevadas a la mufla a 950 °C por 4 horas en crisoles a peso constante. Así se prosiguió con la cuantificación de las diferencias de peso en las muestras después de la combustión, para estimar el contenido de carbonatos.

4.6. Determinación de elementos mayores

Las concentraciones de elementos mayores (%) se determinaron por Fluorescencia de Rayos-X (FRX), utilizando un equipo Bruker S2 Ranger. Previamente calibrado, a través de 20 materiales de referencia certificados, incluyendo cemento, arcillas, feldespatos, caliza, dolomita, sedimento, magnesita, bauxita, yeso y diferentes rocas, los cuales permiten establecer un amplio rango de calibración, permitiéndonos leer 11 elementos mayores en forma de óxido en muestra geológicas (Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, SO₃, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO y Fe₂O₃).

Las muestras analizadas, se prepararon en forma de perlas para su lectura en el equipo Bruker S2 Ranger, usando 0.4 g del sedimento calcinado (950 °C) de la determinación de carbonatos y 5.0 g de tetraborato de litio como fundente, los cuales fueron colocados en crisoles de platino en una perladora de marca Fluxana modelo Vulcan Fusion Technology. De este modo se obtuvieron 45 perlas, de las cuales 16 correspondieron al núcleo LT01, 13 al núcleo LT02 y 16 al núcleo LT03. Es importante mencionar que antes de realizar la lectura de las muestras para la determinación de elementos mayores, el espectrómetro se verifica, realizando la lectura con una pastilla de cobre y el estándar BAXS-S2.

4.7. Determinación de EPT

4.7.1. Digestión

Las determinaciones del contenido de As, Cd y Zn se realizaron por Espectrometría por Absorción Atómica (EAA). En la digestión de las muestras (0.5 g de sedimento seco y molido), estándares (PACS-2 y MESS-3) y blancos, se utilizaron bombas de teflón, a las que se adicionó 5 mL de ácido nítrico (HNO₃), 4 mL de ácido clorhídrico (HCl), y 1 mL de ácido fluorhídrico (HF) concentrado. Posteriormente, las bombas fueron colocadas en un microondas CEM modelo MarsXpress, bajo las condiciones indicadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de digestión para las muestras de sedimento y el lavado de las bombas de teflón.

| | <i>Etapa</i> | <i>Potencia</i> | <i>Temperatura (°C)</i> | <i>Tiempo (min)</i> |
|------------|--------------|-----------------|-------------------------|---------------------|
| EPT y | 1 | 400 W al 80% | 100 | 20 |
| estándares | 2 | 800 W al 100 % | 130 | 40 |
| Lavado | | 1200 W al 100% | 160 | 15 |

Por otro lado, en tubos de centrifuga (viales) se colocaron 0.15 g de ácido bórico, a los que se les añadió las muestras digeridas una vez que se enfriaron. De este modo se prosiguió con el aforamiento a 20 mL de los viales usando agua tipo I (18.2 MΩ). Posteriormente, los viales fueron colocados en un vortex para disolver el ácido bórico. A continuación, los tubos se introdujeron en una centrifuga (IEC modelo Clinical Centrifuge), durante 10 min a 4000 rpm. Una vez que las muestras fueron centrifugadas se vertieron a envases de polipropileno de 25 mL, se etiquetaron y refrigeraron.

4.7.2. Absorción Atómica (AA)

En la determinación de las concentraciones de los EPT (As, Cd y Zn) se utilizó la técnica de EAA, donde se emplearon diferentes métodos. Así, los análisis del contenido de As y Cd se realizaron por horno de grafito, donde el As fue leído además por el método de adición estándar, con una dilución 1/20 en las muestras. Mientras que el contenido de Zn se cuantificó por el método de flama. Para las lecturas de Cd y Zn, se usó un espectrómetro de absorción atómica con un automuetsreador de marca Thermo Electron Corporation modelo GF597; mientras que, para el As, se utilizó el espectrómetro marca VARIAN modelo SPECTRA AA-100. Las condiciones de medición del As, Cd y Zn se muestran en las Tablas 6 y 7. Para el análisis de cada elemento se realizó una curva de calibración, donde los puntos para el As fueron cuatro (0, 15, 30 y 45 µg L⁻¹ figura) con una *r* de 0.9974, para el Cd fueron siete puntos (0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 y 5.0 µg L⁻¹, figura) con una *r* de 0.9971 y para el Zn fueron cinco puntos (0, 0.25, 0.5, 1.0 y 1.5 mg L⁻¹, figura) con una *r* de 0.9973.

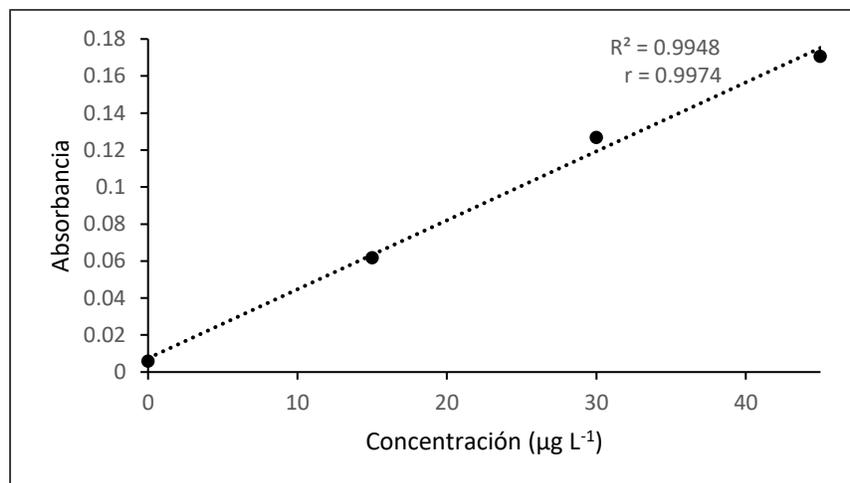


Figura 4. Curva de calibración de As

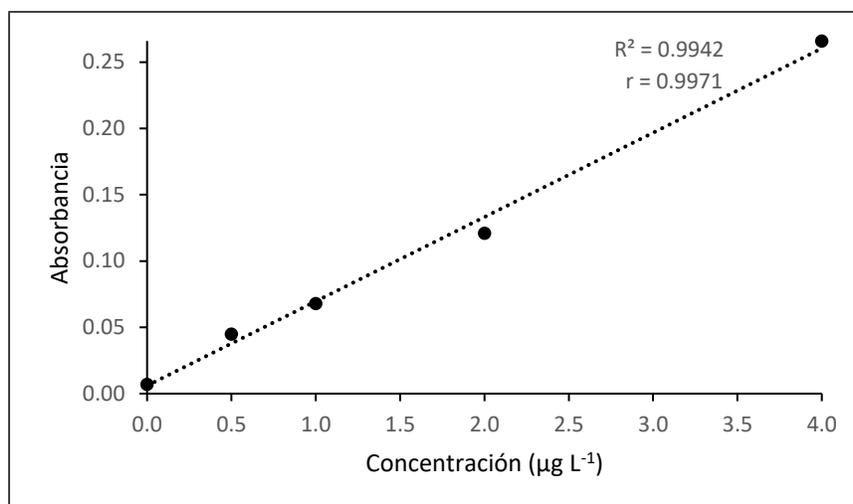


Figura 5. Curva de calibración de Cd

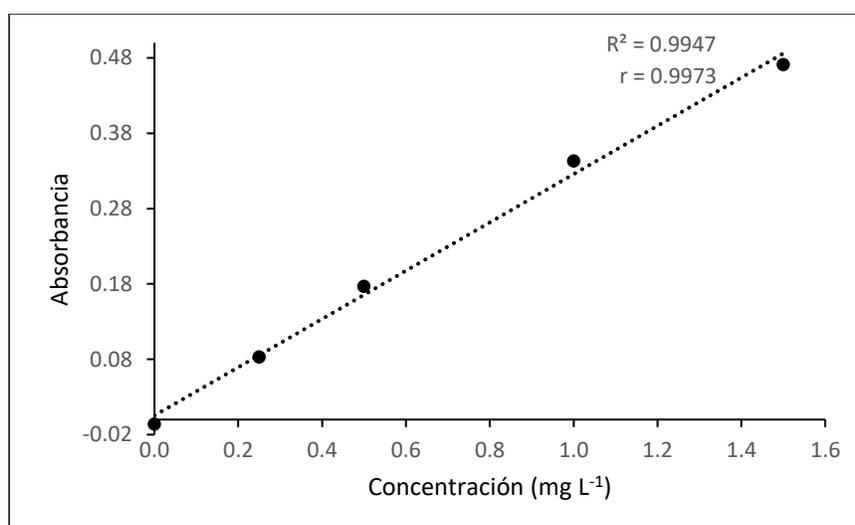


Figura 6. Curva de calibración de Zn

Tabla 6. Condiciones de lectura de Cd y Zn en el espectrómetro Thermo Electron Corporation modelo GF597.

| <i>Parámetros</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> |
|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|
| <i>Parámetros del espectrómetro</i> | | |
| Método | Horno de grafito | Flama |
| Longitud de onda (nm) | 228.8 | 213.9 |
| Corrección de fondo | D2 | D2 |
| Tiempo medida | 3 | 2 |
| Modo de medida | Absorbancia | Absorbancia |
| Volumen de trabajo | 20 | - |
| Rendija (nm) | 0.5 | 0.2 |
| Corriente de lámpara (%) | 50 | 75 |
| <i>Parámetros de muestreo</i> | | |
| Gas | Argón | Acetileno |
| Modificador | Paladio | - |
| Tipo de llama | - | Aire-C ₂ H ₂ |
| Toma del nebulizador (s) | - | 4 |
| Altura del mechero (mm) | - | 0.7 |
| Flujo combustible (L/min) | - | 0.9 |

Tabla 7. Condiciones de lectura para el As en el espectrómetro VARIAN modelo SPECTRA AA-100.

| <i>Parámetros</i> | <i>As</i> |
|--------------------------------------|-----------|
| Longitud de onda (nm) | 193.7 |
| Intensidad de lámpara | 50 |
| Temperatura máxima de calcinado (°C) | 1500 |
| Temperatura de atomizado (°C) | 2600 |
| Gas | Argón |
| Modificador | Paladio |
| Volumen de la muestra (μL) | 10 |

4.8. Factor de enriquecimiento

Para inferir el grado de contaminación de los sedimentos debido a la presencia de EPT, se emplea al factor de enriquecimiento (FE) (Nazneen, *et al.*, 2019), que utiliza a un elemento de referencia conservativo (e.g., Al, Fe, Li, Rb, Sc, Mn), como elemento normalizador (Ho *et al.*, 2012). En este estudio se calculó el FE normalizado con Al, debido a la correlación positiva ($p < 0.05$) que presentó el contenido de este metal, con fracción de tamaño de grano de las arcillas:

$$FE = \frac{(M/Al)_{muestra}}{(M/Al)_{NCL}}$$

Donde $(M/Al)_{muestra}$ es la concentración de los EPT en una muestra, que fue normalizada y el $(M/Al)_{NCL}$ (NCL=nivel de concentración natural) es la concentración natural de los EPT normalizada, que se detectó en las secciones más antiguas de los núcleos de sedimento (>100 años) y que, por lo tanto, corresponde a la era preindustrial (Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2022). Entonces, los NCL para As, Cd y Zn, se determinaron como el promedio de las secciones entre los 25 y 29 cm de profundidad del núcleo LT03. Por otro lado, los valores del FE se clasificaron como: sin enriquecimiento ($FE < 1.5$),

enriquecimiento menor ($1.5 < FE < 3$), enriquecimiento moderado ($3 < FE < 5$) y enriquecimiento fuerte ($FE > 5$; Essien *et al.*, 2009).

4.9. Flujo de EPT

Los flujos de EPT ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) se estimaron como el producto de la concentración del EPT y las TAM ($\text{g cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$), en cada sección de los núcleos de sedimento (Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2022).

4.10. Control de calidad y análisis estadísticos

4.10.1 Control de calidad

La precisión describe la dispersión aleatoria de una muestra que es analizada varias veces, ya que los resultados individuales medidos, rara vez son los mismos (Harvey, 2000). De este modo la precisión se estimó calculando el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las réplicas obtenidas del tamaño de grano, los elementos mayores y los estándares certificados de los EPT. Por otro lado, la exactitud indica la cercanía que existe entre un valor medido y el valor real o aceptado (Skoog *et al.*, 2015), el cual, generalmente, se reporta como el error relativo porcentual, que se obtiene de la diferencia que hay, entre el resultado obtenido y el resultado esperado, dividido entre el resultado esperado, como se muestra a continuación (Harvey, 2000):

$$\text{Error \%} = \frac{\text{valor obtenido} - \text{valor esperado}}{\text{valor esperado}} \times 100$$

En este estudio los valores esperados o aceptados fueron los estándares certificados que se mencionan en los siguientes subtemas.

4.10.1.1 Tamaño de grano

Para calcular la precisión del tamaño de grano se calculó el valor de precisión de sextuplicados pertenecientes a la muestra de la sección 7-8 del núcleo LT03, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 8. Datos de la muestra sextuplicada del núcleo LT03 y los valores de precisión (C.V.) correspondientes a cada tamaño de grano.

| | <i>Arenas</i> | <i>Limos</i> | <i>Arcillas</i> |
|------------|---------------|--------------|-----------------|
| Promedio | 9.76 | 47.62 | 42.62 |
| Desv. Est. | 1.44 | 1.82 | 2.75 |
| CV | 14.78 | 3.83 | 6.45 |

4.10.1.2 MO y carbonatos

La precisión de la MO y los carbonatos se obtuvo calculando el C.V. de tres muestras duplicadas de cada núcleo de las secciones 13-14, 15-16 y 27-28 cm en LT01; 9-10, 11-12 y 13-14 cm en LT02 y 23-24, 25-26 y 28-29 cm en LT03). Los valores de presión de la MO y los carbonatos de cada núcleo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9. Datos de cada núcleo y valores de precisión (C.V.) correspondientes a la MO y los carbonatos de cada núcleo de LT.

| | <i>MO</i> | | | <i>Carbonatos</i> | | |
|------|-----------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------|
| | <i>Promedio</i> | <i>Desv. Est.</i> | <i>C.V.</i> | <i>Promedio</i> | <i>Desv. Est.</i> | <i>C.V.</i> |
| LT01 | 13.10 | 1.66 | 12.64 | 12.92 | 1.38 | 10.65 |
| LT02 | 13.72 | 0.88 | 6.42 | 13.77 | 0.94 | 6.81 |
| LT03 | 14.41 | 0.78 | 5.39 | 6.01 | 0.95 | 15.79 |

4.10.1.3 Elementos mayores

La precisión de los elementos mayores se calculó a partir de las 9 réplicas obtenidas de cada núcleo de sedimento, donde se utilizaron las muestras de las secciones 13-14 cm (37) en LT01, 11-12 cm (23) en LT02 y 23-24 cm (13) en LT03. Por otro lado, la exactitud (% recuperación) de los elementos mayores se obtuvo utilizando los valores de los estándares certificados QC_GEOMAJ-01, QC_GEOMAJ-03 y MESS-3. Los valores de precisión y exactitud se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 10. Datos de las réplicas de muestras de cada núcleo de LT y los valores de precisión (C.V.) y exactitud (recuperación %) correspondientes a cada elemento.

| | | <i>Promedio</i> | | | | |
|-----------------------------|---------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------|
| <i>Muestra</i> | <i>Núcleo</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MnO</i> |
| 13 | LT03 | 41.87 | 11.38 | 0.52 | 4.50 | 0.055 |
| 23 | LT02 | 30.41 | 8.22 | 0.39 | 3.60 | 0.060 |
| 37 | LT01 | 31.31 | 8.47 | 0.41 | 3.83 | 0.058 |
| | | <i>Desviación estándar</i> | | | | |
| <i>Muestra</i> | <i>Núcleo</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MnO</i> |
| 13 | LT03 | 0.49 | 0.17 | 0.01 | 0.05 | 0.00094 |
| 23 | LT02 | 0.44 | 0.14 | 0.02 | 0.09 | 0.0032 |
| 37 | LT01 | 0.36 | 0.09 | 0.02 | 0.06 | 0.0018 |
| | | <i>C. V.</i> | | | | |
| <i>Muestra</i> | <i>Núcleo</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MnO</i> |
| 13 | LT03 | 1.18 | 1.47 | 2.57 | 1.05 | 1.71 |
| 23 | LT02 | 1.45 | 1.69 | 4.50 | 2.39 | 5.32 |
| 37 | LT01 | 1.14 | 1.02 | 4.40 | 1.53 | 3.11 |
| | | <i>Recuperación (%)</i> | | | | |
| <i>Estándar certificado</i> | | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MnO</i> |
| QC_GEOMAJ-01 | | 110.52 | 107.20 | 110.53 | 105.99 | 87.78 |
| QC_GEOMAJ-03 | | 95.49 | 95.00 | 93.88 | 97.57 | 92.39 |
| MESS-3 | | 93.71 | 95.10 | 93.81 | 95.35 | 79.17 |

4.10.1.4 EPT (As, Cd y Zn)

La precisión y la exactitud de los EPT se obtuvieron de las réplicas de los estándares certificados del Consejo Nacional de Investigación de Canadá NRC-CNRC. Por otro lado, el límite de detección fue calculado por el método de Miller.

Tabla 11. Datos de validación de los EPT (As, Cd y Zn) para el análisis de los núcleos de sedimento de LT.

| EPT | Valor certificado (ppm) | Valor observado (ppm) | Desviación estándar | C.V. | Recuperación (%) | LD (ppm) | LC (ppm) | N |
|-----|-------------------------|-----------------------|---------------------|------|------------------|----------|----------|---|
| As | PACS-2 26.2±1.5 | 24.31±1.28 | 1.67 | 6.47 | 92.78 | 0.0076 | 0.0254 | 9 |
| Cd | MESS-3 0.24 ± 0.01 | 0.24±.019 | 0.02 | 7.41 | 98.05 | 0.0004 | 0.0012 | 6 |
| Zn | MESS-3 159 ± 8 | 169.6 ±8.14 | 6.55 | 3.86 | 106.69 | 0.1100 | 0.3700 | 5 |

n=número de réplicas utilizadas

4.10.2 Análisis estadístico

4.10.2.1 ANOVA

Para comparar las similitudes y diferencias entre las variables geoquímicas de los núcleos de sedimento, se realizaron los análisis de ANOVA y Tukey. El análisis estadístico de ANOVA se usa para determinar si hay o no similitudes entre las medias poblacionales (Skoog *et al.*, 2015), mientras que la prueba de Tukey se utiliza para detectar las diferencias significativas (Wang *et al.*, 2020). En ambas pruebas los valores significativos se consideraron cuando los valores de $p > 0.05$.

4.10.2.2 Correlación de Pearson

Para analizar las relaciones entre los EPT y las variables geoquímicas (tamaño de grano, MO, carbonatos y elementos mayores) de los sedimentos de la LT, se calculó la correlación de Pearson, considerando valores significativos cuando $p > 0.05$. En la correlación de Pearson se asignan valores que van de -1 a 1, donde el 0 indica que no hay correlación entre las variables, mientras que el 1 indica una correlación positiva y el -1 significa que la correlación es negativa (Nettleton, 2014).

5. Resultados

5.1 Tamaño de grano

Los resultados del análisis de la distribución granulométrica en los tres núcleos (LT01, LT02, LT03) mostraron una predominancia de la fracción de limos (con promedios de $65.8 \pm 4.3\%$, $68.4 \pm 2.0\%$ y $51.5 \pm 3.4\%$, respectivamente), seguida de arcillas ($26.8 \pm 2.1\%$, $27.3 \pm 0.8\%$ y $38.1 \pm 4.1\%$) y arenas ($7.4 \pm 5.2\%$, $4.3 \pm 2.1\%$ y $10.4 \pm 3.4\%$). Además, los valores de tamaño de grano en cada núcleo fueron distintos (Tabla 10), donde LT01 presentó intervalos más amplios en arenas y limos que LT02 y LT03, mientras que los contenidos de arcillas fueron mayores en LT03, en comparación con LT01 y LT02.

Tabla 12. Tamaño de grano de los núcleos LT01, LT02 y LT03 recolectados en la Laguna de Términos, Campeche, México.

| <i>Núcleo</i> | <i>Arenas (%)</i> | <i>Limos (%)</i> | <i>Arcillas (%)</i> |
|---------------|-------------------|------------------|---------------------|
| LT01 | 1.7-21.7 | 54.2-72.1 | 23.1-30.5 |
| LT02 | 1.2-8.3 | 64.0-71.7 | 26.0-28.8 |
| LT03 | 5.4-16.0 | 47.8-59.7 | 26.9-43.7 |

Al realizar la comparación de los perfiles de tamaño de grano entre los núcleos (Figura 3), se observó que LT01 y LT02 (Tukey $p > 0.05$; Anexo 13) tuvieron una distribución granulométrica similar de arenas, limos y arcillas, mientras que el núcleo LT03 presentó una distribución distinta. Para el caso de los perfiles de arenas de LT01 y LT02, se observó un incremento en su contenido con la profundidad, desde las secciones superiores de los núcleos (donde se reportaron los valores mínimos para ambos núcleos de 1.7 % en LT01 y 1.2% en LT02), hasta los 6 cm de profundidad (7.1 y de 6.4%, respectivamente), seguido de una disminución a los 8 cm (3.5% en LT01 y de 5.1 en LT02). Posteriormente, se identificó un aumento, en ambos registros, que en LT01 inicia a los 16 cm, hasta un máximo (21.7%) a los 26 cm de profundidad, mientras que LT02 se registró el valor máximo (8.32 %) a los 20 cm de profundidad. Por otro lado, el núcleo LT03 no presentó un patrón específico, aunque sí un máximo en la sección de 2 cm (16%) y un mínimo (5.4%) a los 20 cm.

En cuanto a los perfiles del contenido de limos, LT01 y LT02, además de tener una distribución similar, presentaron valores mayores a LT03. Los perfiles de limos de LT01 y LT02 fueron similares desde la parte superior de los núcleos hasta la sección de los 24 cm. Es decir, de los 4-6 cm de profundidad ambos núcleos disminuyeron (4.0% en LT01 y 2.7% en LT02), en las secciones de los 8-12 cm la distribución se mantuvo constante, de los 18-20 cm nuevamente el contenido de limos decreció (6.2% en LT01 y 4.6% en LT02) y de los 20-24 cm se incrementó (5.8% en LT01 y 4.1% en LT02). Luego, el núcleo LT01 presentó una gran disminución (13.7%) hasta los 26 cm, siendo la sección donde se reportó el valor mínimo (54.2 %), mientras que en LT02, el valor mínimo de limos (64%), se registró en la sección de 20 cm. Al contrario, el núcleo LT03 presentó incrementos y disminuciones en los limos en las primeras secciones del núcleo (0-10 cm de profundidad), mientras que, de los 12-20 cm el contenido de limos fue constante y a partir de los 22-26 cm incrementó (9.4%). El contenido mínimo (47.8%) de limos en LT03 se reportó en la sección de los 6 cm de profundidad, mientras que el valor máximo (59.7%) fue registrado a los 8 cm.

Para el caso de la distribución de las arcillas, se observó que, los valores en LT01 y LT02 fueron más bajos que los de LT03 (Figura 3). Al igual que en los perfiles de limos y arenas, los núcleos LT01 y LT02 tuvieron comportamientos y contenidos de arcillas similares. En las secciones de los 8-16 cm de profundidad, la distribución de arcillas fue casi constante, ya que no presentó grandes variaciones. Los valores mínimos en LT01 fue a los 6 cm (23.1%) y en LT02 a los 8 cm (26%), mientras que los valores máximos se registraron en LT01 a los 2 cm (30.5%) y en LT02 a los 22 cm (28.8%) de profundidad. Del mismo modo, LT03 presentó alternancias entre contenidos bajos y altos de arcillas, desde los 6 cm hasta los 29 cm. El valor mínimo (26.9%) de arcillas se registró en la sección de los 8 cm y el máximo (43.7%) en la sección de los 20 cm de profundidad.

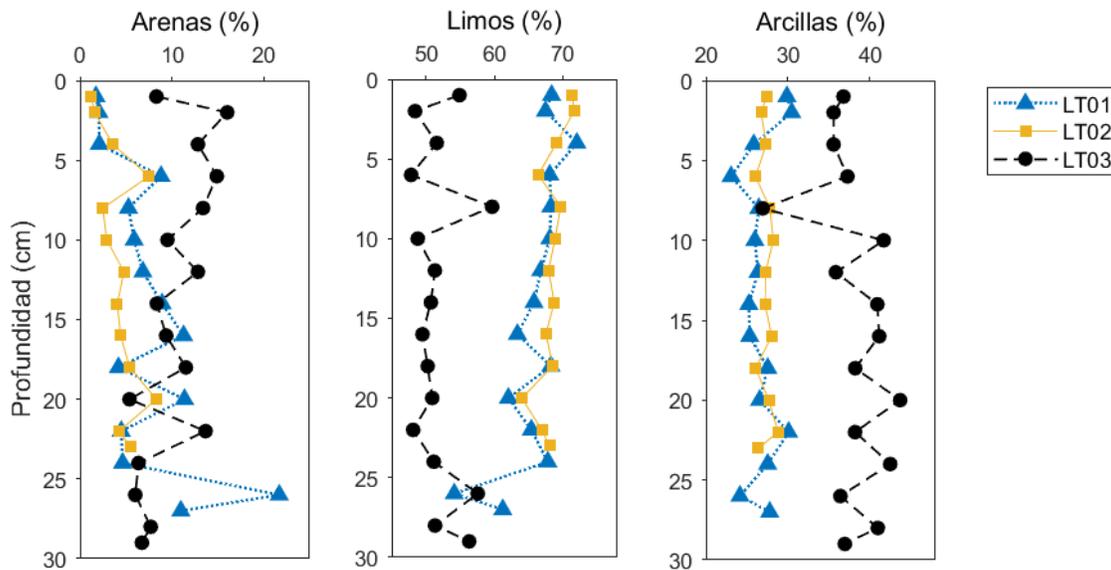


Figura 7. Perfiles de tamaño de grano de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

5.2 Materia orgánica

El promedio del contenido de materia orgánica (MO) en LT01 fue de $14.3 \pm 1.8\%$, mientras que LT02 presentó un promedio de $13.8 \pm 0.9\%$ y LT03 de $15.4 \pm 0.8\%$. El núcleo LT02 presentó concentraciones de MO más bajas que los núcleos LT01 y LT03 (Figura 4). Los intervalos del contenido de MO de cada núcleo fueron de 11.2-17.3% en LT01, 11.4-15.7% en LT02 y 13.1-17.5% en LT03. De acuerdo con los perfiles de MO (Figura 4), se observó que en los tres núcleos hubo una tendencia a disminuir en el contenido de MO conforme se incrementa la profundidad del sedimento. De modo que, los máximos de MO se encontraron en las secciones superficiales de los núcleos, con valores de 17.3% a los 2 cm de profundidad para LT01, de 15.7% a 1 cm de profundidad en LT02 y de 17.5% a los 4 cm de profundidad para LT03. Por el contrario, los valores mínimos se encontraron en la base de los núcleos (28 cm en LT01, 22 cm en LT02 y 24 cm en LT03).

Los valores de MO con la profundidad no fueron tan variables en LT01 como en LT02 y en LT03. En LT01, entre las secciones 1-2 cm, se registró un aumento de MO (16.1-17.3%), seguido de una disminución (2.3%) a los 4 cm. A partir de esta sección y hasta los 16 cm, el contenido de MO se

mantuvo homogéneo (14.5-14.9%), ya que después de los 18 cm comenzó a disminuir (3.5%), hacia la base del núcleo (28 cm). Por otro lado, LT02 tuvo una disminución (2.4%) de los 10-12 cm, seguido de un aumento (2.8%) entre los 12 a 16 cm, una disminución (3.5%) de los 16 a los 22 cm de profundidad, con un último incremento (1.2%) hasta los 23 cm. La MO en LT03, presentó un comportamiento muy homogéneo (15.2-16.6%) de los 10 a los 18 cm, seguido de una alternancia entre la disminución y aumento de los 18 a los 26 cm; a partir de esta profundidad y hasta los 29 cm hubo una disminución (1.2%) del contenido de MO.

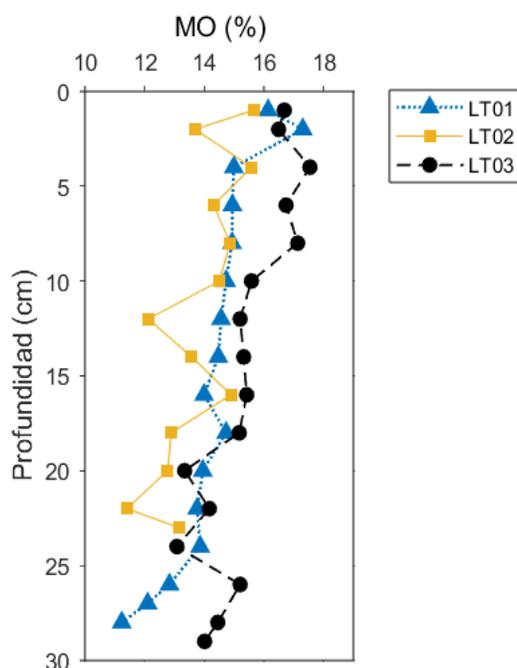


Figura 8. Perfiles de profundidad del contenido de MO (%) en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

5.3 Carbonatos

El análisis de ANOVA ($p > 0.05$) mostró que las medias de las concentraciones de carbonatos entre los núcleos fueron distintas (Anexo 14), donde los promedios fueron de 11.6 ± 1.4 % en LT01, de 13.8 ± 0.9 % en LT02 y de 8.5 ± 1.0 % en LT03. Así, los intervalos de concentración para cada núcleo fueron: 9.2-14.3% en LT01, 11.8-15.5% en LT02 y 4.1-12.5% en LT03. El perfil de carbonatos (Figura 5) del núcleo LT01, en la primera sección (1-2 cm) presentó una disminución (1.8%) y de los 4 a los 16 cm incrementó (1.6%), mientras que, entre la sección de los 16-18 cm disminuyó nuevamente (1.5%), y entre los 20-28 cm aumentó (2.4%). El valor mínimo (9.1%) de carbonatos fue registrado a los 2 cm de profundidad, mientras que el valor máximo (14.3%) se encontró en la base del núcleo (28 cm). Para el núcleo LT02, la distribución del contenido de carbonatos fue muy variable, donde las profundidades en las que se reportaron los valores mínimos (4.1%) y máximos (12.5%), fueron a los 16 y 22 cm, respectivamente. En LT03, desde la parte superior hasta los 28 cm de profundidad se identificó una disminución de 8.4% en los valores de carbonatos, acompañado de pequeños intervalos (8-10 y de 18-22 cm) donde aumentó su concentración (de 0.9 y 1.7% respectivamente),

sin exceder el valor máximo registrado en la parte superior del núcleo (12.5%). El valor mínimo de carbonatos se registró a los 28 cm (4.1%).

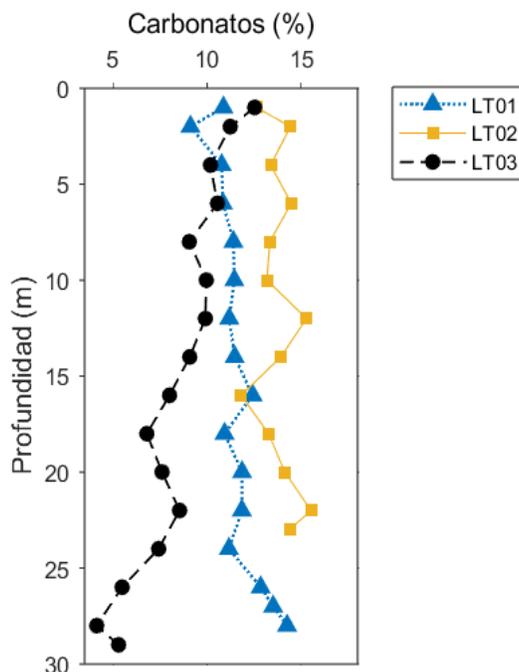


Figura 9. Perfiles de profundidad del contenido de carbonatos (%) los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

5.5 Elementos potencialmente tóxicos

5.5.1 Arsénico

De acuerdo con el análisis de ANOVA ($p > 0.05$; Anexo 16) no hubo diferencia significativa en el promedio de las concentraciones de As en los tres núcleos. Los promedios de la concentración de As fueron de $5.8 \pm 1.8 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT01, $3.6 \pm 2.0 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT02 y $5.1 \pm 3.5 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT03. Los intervalos de concentración para cada núcleo fueron: 2.8-8.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ en LT01, 1.1-7.1 $\mu\text{g g}^{-1}$ en LT02 y 0.9-10.7 $\mu\text{g g}^{-1}$ en LT03. En LT01, el perfil de As (Figura 7) presentó disminuciones en las secciones 2-4, 6-8, 14-16, 22-24 y 26-28 cm, mientras que, en las secciones 4-6, 8-10, 16-22 y 24-26 cm, se observaron incrementos. El valor máximo de As ($8.3 \mu\text{g g}^{-1}$) para este núcleo se encontró a los 2 cm de profundidad y el mínimo ($2.8 \mu\text{g g}^{-1}$) a los 8 cm. Para el perfil LT02, en las secciones 4-6 y 14-18 cm las concentraciones de As incrementaron (4.7 y $4.9 \mu\text{g g}^{-1}$), mientras que, en las secciones 6-10 y 18-20 cm las concentraciones disminuyeron (4.2 y $3.54 \mu\text{g g}^{-1}$). El valor mínimo ($1.1 \mu\text{g g}^{-1}$) de As se encontró a los 2 cm de profundidad y el valor máximo ($7.1 \mu\text{g g}^{-1}$) a los 18 cm. En LT03, las concentraciones de As aumentaron con la profundidad, presentando variaciones a lo largo del perfil; por ejemplo, en las secciones 1-2, 14-18, 22-26 y 28-29 cm se presentaron incrementos del contenido del metaloide, y en las secciones 2-6, 12-14, 20-22 y 26-28 cm se registraron disminuciones. En cuanto a la concentración máxima y mínima de As, se reportaron valores de $10.7 \mu\text{g g}^{-1}$ en la base del núcleo (28-29 cm) y de $0.9 \mu\text{g g}^{-1}$ la sección superficial (0-1 cm).

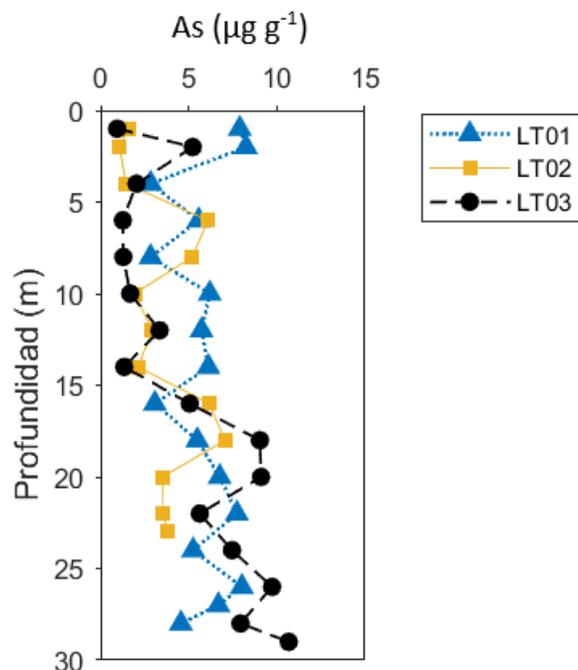


Figura 11. Perfiles de profundidad de la concentración de As en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

5.5.2. Cadmio

Del análisis de ANOVA se observó que, el promedio de las concentraciones de Cd entre núcleos fue distinto ($p < 0.05$; Anexo 16), de modo que al hacer la prueba de Tukey se encontró que las diferencias significativas ($p < 0.05$) están entre los núcleos LT01-LT03 y LT02-LT03. Los promedios del contenido de Cd en cada núcleo fueron de $0.11 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$ para LT01, de $0.11 \pm 0.02 \mu\text{g g}^{-1}$ para LT02 de $0.2 \pm 0.04 \mu\text{g g}^{-1}$ para LT03, mientras que los intervalos fueron de $0.07\text{-}0.14 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT01, $0.08\text{-}0.15 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT02 y $0.12\text{-}0.26 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT03. Los perfiles de Cd en LT01 y LT02 (Figura 8), fueron homogéneos; los valores máximos de Cd, en cada núcleo fueron de $0.14 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT01 ubicado a 1, 6, 10 y 28 cm de profundidad, y de $0.15 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT02 en la base del núcleo (22-23 cm). Mientras que los valores mínimos fueron de 0.07 en LT01 a los 2 cm de profundidad y 0.08 en LT02 a los 6 cm de profundidad. En cuanto al perfil del núcleo LT03, se registraron incrementos de Cd en las secciones 2-4, 6-16 y 18-26 cm. Por otro lado, en las secciones 4-6 y 16-18 cm las concentraciones del metal disminuyeron (0.14 y $0.05 \mu\text{g g}^{-1}$). El valor mínimo ($0.12 \mu\text{g g}^{-1}$) de Cd se registró a los 6 cm y el máximo ($0.26 \mu\text{g g}^{-1}$) a los 4 cm de profundidad.

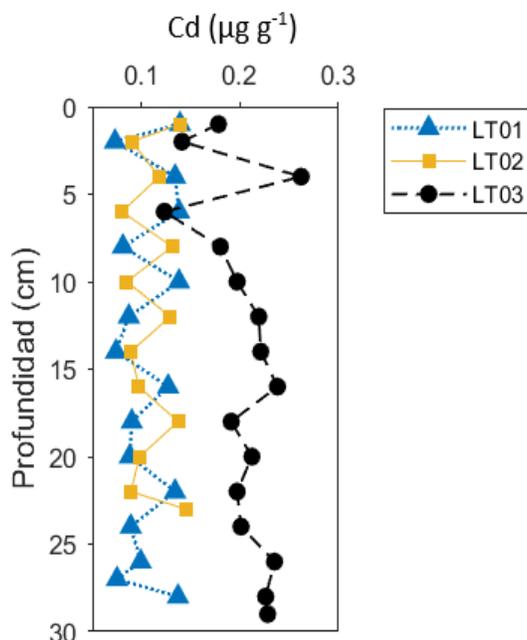


Figura 12. Perfiles de profundidad de la concentración de Cd en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

5.5.3. Zinc

Del análisis de ANOVA ($p > 0.05$; Anexo 16), se observó que la media de las concentraciones de Zn entre núcleos fue similar. El promedio de los contenidos de Zn en los núcleos fue de $54.7 \pm 3.5 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT01, $51.4 \pm 3.2 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT02 y $53.2 \pm 7.7 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT03; por otro lado, sus intervalos de concentración fueron: $47.6\text{-}62.4 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT01, $44.6\text{-}56.4 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT02, y $40.0\text{-}66.0 \mu\text{g g}^{-1}$ en LT03. En el perfil LT01 (Figura 9), se presentaron incrementos en los contenidos de Zn en distintas secciones (1-2, 4-8, 10-12, 16-18, 22-24, 26-28 cm), con un valor mínimo ($47.6 \mu\text{g g}^{-1}$) a los 16 cm de profundidad y un máximo ($62.4 \mu\text{g g}^{-1}$) a los 2 cm de profundidad. En LT02, se identificaron aumentos en los contenidos de Zn (secciones 4-6, 8-14 y 18-23), así como una concentración mínima ($4.6 \mu\text{g g}^{-1}$) a los 4 cm de profundidad y un máximo ($56.4 \mu\text{g g}^{-1}$) a los 14 cm. En cuanto al núcleo LT03, en general, las concentraciones de Zn incrementaron con la profundidad. En las secciones 8-14 y 18-20 cm las concentraciones de Zn fueron constantes, mientras que en las secciones 1-4, 6-8, 16-18, 22-26 y 28-29 cm las concentraciones aumentaron. Por otro lado, los valores máximos ($66.0 \mu\text{g g}^{-1}$) y mínimos ($40.0 \mu\text{g g}^{-1}$), se encontraron a los 29 y 16 cm de profundidad, respectivamente.

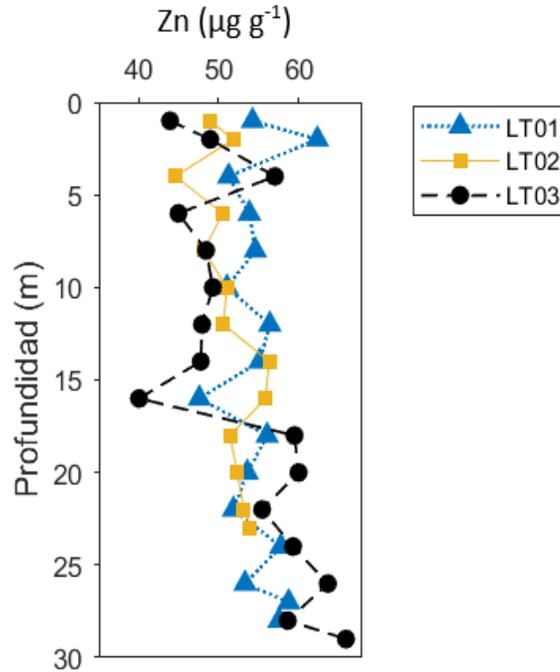


Figura 13. Perfiles de profundidad de la concentración de Zn en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

5.6 Fechado con ^{210}Pb

5.6.1. ^{210}Pb total

Los intervalos de actividad del ^{210}Pb total ($^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$) en los núcleos fueron de 35.4-72.3 Bq kg⁻¹ en LT01, 32.7-63.1 Bq kg⁻¹ en LT02 y 12.3-81.3 Bq kg⁻¹ en LT03. En general, las actividades del $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ en los tres núcleos (Figura 10) decrecieron desde la parte superior de los núcleos hasta su base. Sin embargo, en los perfiles LT01 y LT03, se observaron algunas variaciones en el contenido de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$; por ejemplo, en las secciones intermedias (16-18 cm) de LT01, el $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ incrementó (10.9 Bq Kg⁻¹), mientras que, en LT03 los aumentos (15.7 y 17.5 Bq kg⁻¹) se registraron en las secciones de 12-14 y de 24-26 cm. Dado que los perfiles de ^{210}Pb perfectamente exponenciales son el resultado de una tasa de acumulación de sedimento constante (i.e., condiciones de sedimentación estables; Sanchez-Cabeza *et al.*, 2012; Ruiz-Fernández *et al.*, 2020), los perfiles de la actividad del $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ de LT01 y LT03, sugieren que existen variaciones en la acumulación del sedimento a lo largo de los registros. Por otro lado, en los núcleos LT01 y LT02, no distingue una región asintótica de la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$, mientras que en LT03, la región asintótica se registró a partir de los 16 cm de profundidad.

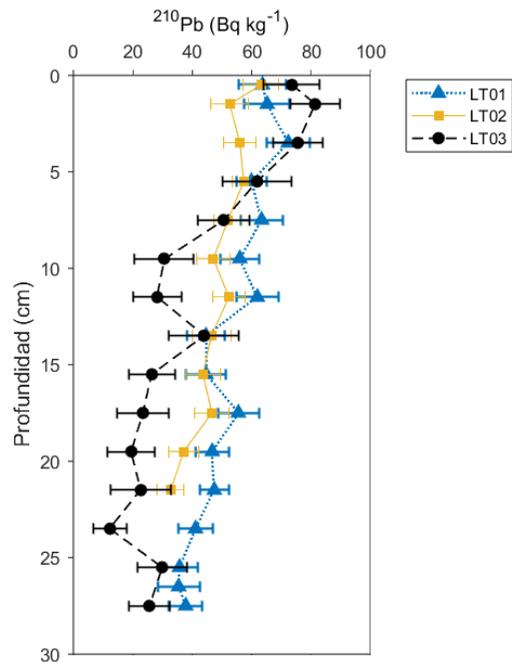


Figura 14. Actividad de ^{210}Pb en los núcleos de sedimentos LT01, LT01 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

5.6.2. ^{210}Pb base y ^{210}Pb en exceso

Los datos utilizados para describir la actividad del ^{210}Pb base en los núcleos fueron los valores de la actividad del ^{226}Ra , con intervalos de $16.9\text{-}22.2 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT01, $17.5\text{-}23.4 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT02 y $18.5\text{-}25.0 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT03. Los promedios de la actividad del ^{226}Ra fueron: $18.9 \pm 1.5 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT01, $20.9 \pm 1.4 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT02 y $20.5 \pm 1.6 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT03. La actividad del ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) fue de $13.3\text{-}51.4 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT01, $15.2\text{-}40.5 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT02 y $12.3\text{-}81.3 \text{ Bq kg}^{-1}$ en LT03. Por otro lado, las actividades del $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en LT01, LT02 y LT03, decrecieron con la profundidad, sin embargo, en los núcleos LT01 y LT03 se observaron incrementos en las actividades de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ de 11.3 Bq kg^{-1} en las secciones de los 16 a los 18 cm en LT01, y de 14.6 y 19.4 Bq kg^{-1} en las secciones 12-14 y 24-26 cm en LT03.

5.4 Elementos mayores

Los promedios y los intervalos de las concentraciones de los elementos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 y MnO) se reportan en las Tablas 11 y 12. Del análisis de ANOVA ($p > 0.05$) se observó que las medias de las concentraciones de los elementos mayores entre núcleos fueron diferentes (Anexo 15).

Tabla 13. Promedio del contenido (%) de elementos mayores en los núcleos LT01, LT02 y LT03 recolectados en la Laguna de Términos, Campeche, México.

| Núcleo | SiO_2 | Al_2O_3 | TiO_2 | Fe_2O_3 | MnO |
|--------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| LT01 | 33.79 ± 1.7 | 9.18 ± 0.6 | 0.43 ± 0.03 | 4.08 ± 0.3 | 0.07 ± 0.01 |
| LT02 | 30.86 ± 5.3 | 8.30 ± 0.5 | 0.39 ± 0.03 | 3.67 ± 0.2 | 0.06 ± 0.01 |
| LT03 | 38.39 ± 1.6 | 10.10 ± 1.4 | 0.46 ± 0.08 | 4.03 ± 0.5 | 0.05 ± 0.01 |

Tabla 14. Intervalo de concentración (%) de los elementos mayores en los núcleos LT01, LT02 y LT03 recolectados en la Laguna de Términos, Campeche, México.

| <i>Núcleo</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MnO</i> |
|---------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------|
| <i>LT01</i> | 30.8-38.0 | 8.4-10.3 | 0.38-0.48 | 3.8-4.6 | 0.06-0.08 |
| <i>LT02</i> | 28.6-35.2 | 7.8-9.6 | 0.32-0.44 | 3.5-4.1 | 0.05-0.07 |
| <i>LT03</i> | 32.9-52.3 | 8.3-13.9 | 0.36-0.64 | 3.4-5.3 | 0.04-0.07 |

En cuanto a los perfiles de los elementos mayores (Figura 6), en los núcleos LT01, LT02 y LT03, en general, se observaron comportamientos similares entre los diferentes elementos. En LT01, a los 26 cm de profundidad, se observó una disminución de la mayoría de los elementos mayores, caso contrario al núcleo LT02, donde a los 22 cm de profundidad sus contenidos aumentaron. Asimismo, en LT03 los valores de los elementos mayores aumentaron con la profundidad. Es así que, en LT01, los contenidos más bajos de SiO₂, Al₂O₃ y TiO₂, se encontraron a los 14 cm de profundidad, mientras que para el Fe₂O₃ se reportó a los 8 cm; en cuanto a los valores más altos de TiO₂, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ se observaron en la parte inferior del núcleo (26-28 cm de profundidad). En LT02, los valores mínimos de SiO₂ y Al₂O₃ se encontraron a los 10 cm de profundidad, de TiO₂ y Fe₂O₃ a los 8 y 14 cm, respectivamente. Los valores máximos de estos cuatro elementos se encuentran a los 23 cm de profundidad, y para el núcleo LT03, los mínimos de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, estuvieron a los 6 cm de profundidad y para TiO₂ a los 4 cm, mientras que los valores máximos de SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ y Fe₂O₃ se ubicaron en la base del núcleo (29 cm). Los perfiles de la distribución de MnO en los tres núcleos fueron diferentes al resto de los elementos mayores. En las secciones superiores (1-4 cm) de LT01, se observa una disminución (0.08 a 0.06%) del contenido de MnO, mientras que de los 4 a los 14 cm los valores fueron constantes, y de los 14 a los 20 cm hubo un incremento (0.06-0.08%). De igual forma, en LT02 y LT03 los valores de MnO fueron casi homogéneos a lo largo de los perfiles.

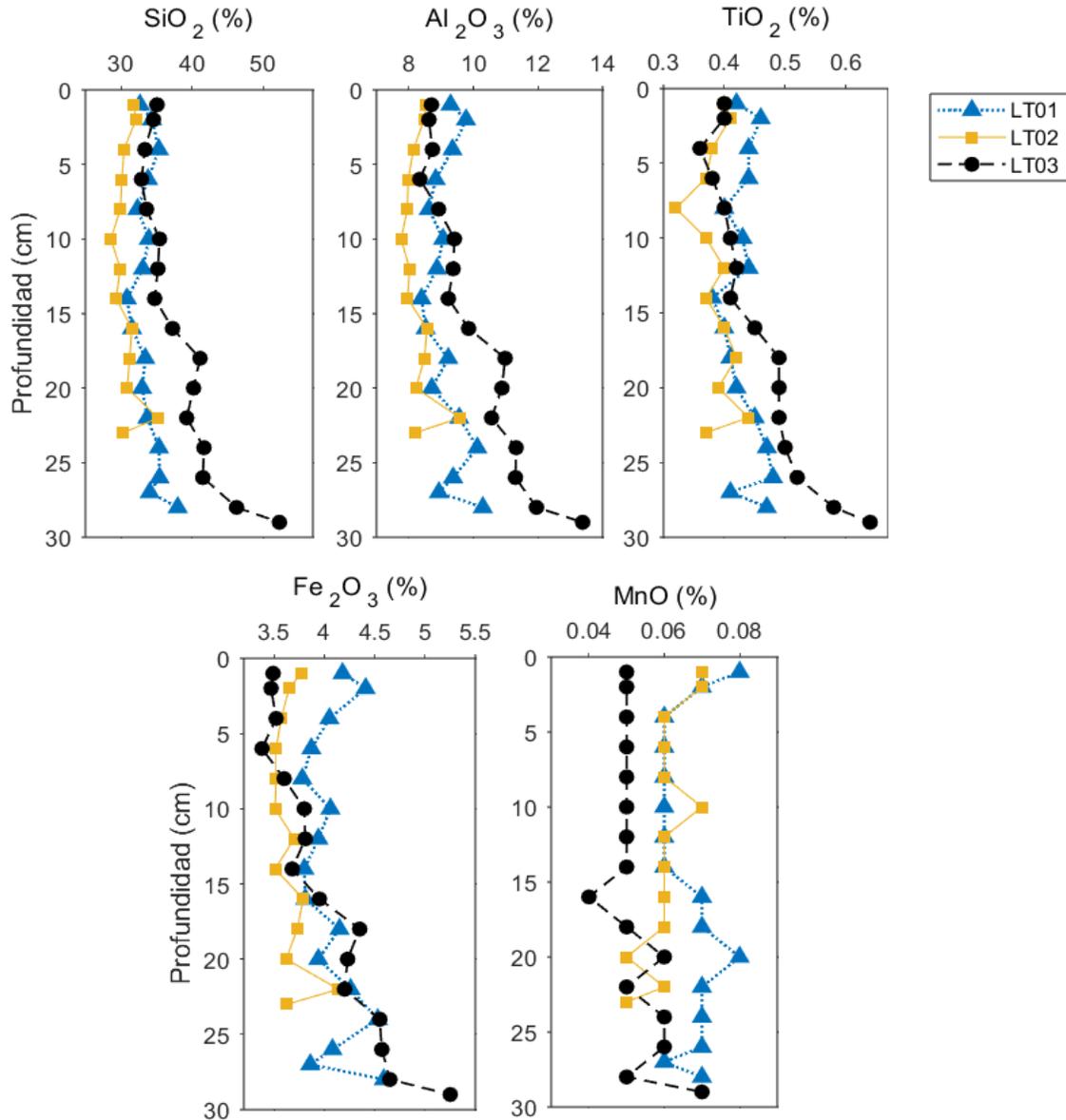


Figura 10. Perfiles de profundidad de la concentración de los elementos mayores de los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

5.6.3. Fechado con ^{210}Pb

Para construir los modelos de edad en los núcleos de sedimento, se utilizó el modelo de flujo constante o CF. De este modo se determinaron las edades para cada núcleo, donde LT01 tuvo una edad de 44 ± 14 años (1976 a 2021), LT02 de 37 ± 12 años (1984-2021) y LT03 de 127 ± 44 años (1876 a 2020). Asimismo, se calcularon las tasas de acumulación másica (TAM, $\text{g cm}^{-2}\text{año}^{-1}$) y las tasas de acumulación sedimentaria (TAS, cm año^{-1}) para cada sección de los núcleos. Las fechas más antiguas detectadas en los núcleos fueron: 1976.4 ± 9.0 años en el núcleo LT01, 1983.5 ± 12.7 años en el núcleo LT02 y 1875.9 ± 84.1 años en el núcleo LT03. Por otro lado, las fechas recientes de cada núcleo localizadas en las secciones superiores de cada uno fueron de 2020.7 ± 0.09 en LT01, 2020.9 ± 0.08 en LT02 y 2020.4 ± 0.15 .

5.6.4. Tasas de acumulación másica y sedimentaria

La tasa de acumulación másica (TAM) y la tasa de acumulación sedimentaria (TAS) en los tres núcleos decrecieron con la profundidad (Figura 11). Los núcleos LT01 y LT02 tuvieron TAM y TAS similares, mientras que LT03 tuvo una TAM y TAS más bajas. Los intervalos de TAM y TAS correspondientes a cada núcleo se muestran en la Tabla 4.

Tabla 15. Intervalos de las tasas de acumulación másica ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) y las tasas de acumulación sedimentaria de (cm año^{-1}) de los núcleos LT01, LT02 y LT03 recolectados en la Laguna de Términos, Campeche, México.

| Núcleo | TAM ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) | TAS (cm año^{-1}) |
|--------|--|------------------------------|
| LT01 | 0.3-0.6 | 0.3-1.4 |
| LT02 | 0.4-0.7 | 0.3-1.9 |
| LT03 | 0.03-0.2 | 0.03-0.7 |

Por otro lado, el valor máximo ($0.6 \pm 0.17 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de TAM para LT01 se registró en dos fechas diferentes, el primero en 2005 ± 2 y el segundo en 2020 ± 0.2 ; en LT02, el máximo en la TAM ($0.7 \pm 0.24 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) se reportó en 2019 ± 0.4 y para LT03 ($0.2 \pm 0.23 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$), se reportó en tres periodos distintos, que son 1964 ± 9.7 , 1968 ± 8.9 y 1972 ± 8.1 . Para el caso de los valores máximos de TAS, en LT01 ($1.4 \pm 0.28 \text{ cm año}^{-1}$) se reportó en 2020 ± 0.2 , mientras que LT02 ($1.9 \pm 0.62 \text{ cm año}^{-1}$) se registró en 2021 ± 0.6 y en LT03 ($0.7 \pm 0.14 \text{ cm año}^{-1}$) se reportó en 2020 ± 0.14 .

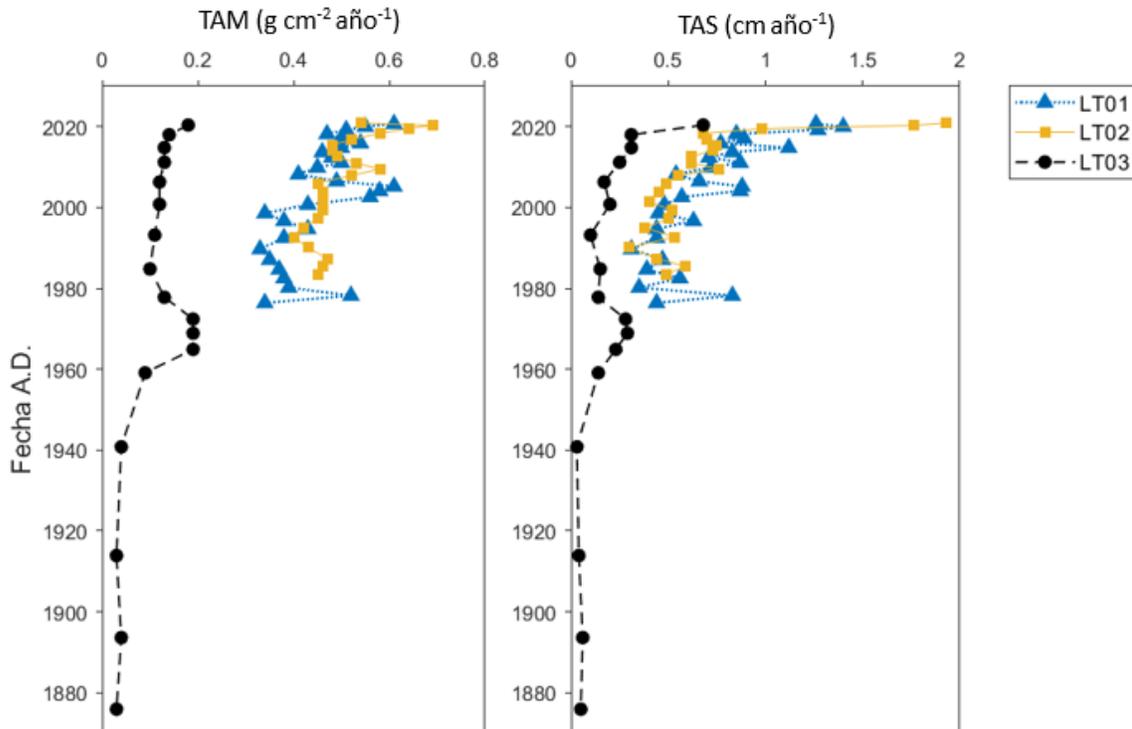


Figura 15. Tasas de acumulación másica ($\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y tasas de acumulación sedimentaria (cm año^{-1}) respecto al tiempo (Fecha A.D.) en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

6. Discusión

6.1 Tamaño de grano

La distribución granulométrica fue similar entre los núcleos LT01 y LT02 y distinta de LT03; en LT01 y LT02, las concentraciones de limos fueron mayores que las de LT03, mientras que, los contenidos de arenas y arcillas fueron mayores en LT03, en comparación con LT01 y en LT02. Lo anterior, podría relacionarse con la ubicación de los sitios de muestreo, ya que LT01 y LT02 se localizan en la parte occidental de la laguna, caracterizada por presentar sedimentos limo-arcillosos, mientras que LT03, se recolectó en la parte oriental, donde los sedimentos predominantes son limos y arcillas, con arenas calcáreas (Grenz *et al.*, 2017).

En cuanto a las correlaciones entre la distribución granulométrica y las concentraciones de los EPT (As, Cd y Zn), se encontraron correlaciones significativas ($p < 0.05$, $r > 0.49$) negativas, solo para el núcleo LT03, entre la concentración de arenas y las concentraciones de Cd ($r = -0.53$) y As ($r = -0.51$). Lo anterior indica que las concentraciones de Cd y As disminuyen cuando el tamaño de grano grueso (arenas) aumenta, ya que la relación superficie-volumen es baja en sedimentos gruesos, a diferencia de los sedimentos finos, donde la relación superficie-volumen es alta; asimismo, en los sedimentos de grano fino la concentración de materia orgánica (MO) aumenta, lo que favorece el incremento de la concentración de metales, como el resultado de un intercambio iónico (Ongley, 1997; Özşeker *et al.*, 2022).

6.2 Materia orgánica y carbonatos

La distribución de MO y carbonatos en los tres núcleos (LT01, LT02, LT03) fue distinta, por un lado, los perfiles de MO mostraron una disminución en la concentración con la profundidad, mientras que los carbonatos no mostraron un comportamiento específico con la profundidad, excepto para el núcleo LT03, en el que las concentraciones de carbonatos disminuyeron con la profundidad. Este comportamiento de los perfiles de MO y carbonatos se relacionó con la distribución del tamaño de grano. Por ejemplo, la MO del núcleo LT01 tuvo una correlación negativa (Anexo 17) con las arenas ($r = -0.68$) y una correlación positiva con los limos ($r = 0.65$), que indica la afinidad que tiene la MO por los sedimentos finos, ya que en este tipo de sedimentos la MO se adsorbe en las superficies minerales debido a que hay mayores aceptores de electrones (Hedges y Keil, 1995). Caso contrario ocurrió a los carbonatos, que presentaron una correlación negativa con los limos ($r = -0.71$) y una correlación positiva con las arenas ($r = 0.72$). Para LT03 se encontraron correlaciones positivas (Anexo 19) entre las arenas, tanto con la MO ($r = 0.63$), como con los carbonatos ($r = 0.57$) y una correlación negativa entre las arcillas y la MO ($r = -0.66$). Las correlaciones positivas entre los carbonatos y las arenas podrían relacionarse con las características geológicas de la región, ya que LT abarca dos provincias fisiográficas, donde una de ellas es la Península de Yucatán, ubicada en lado oriental de la laguna, la cual se caracteriza por presentar arenas carbonatadas (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2017; Madrid *et al.*, 2018).

Por otro lado, se ha documentado que la MO puede aumentar la concentración de los EPT, dado que juega un papel en la unión y formación de complejos, de manera que la cantidad de MO influye en la especiación, la movilidad, la biodisponibilidad y la toxicidad de los EPT (Bianchi, 2007;

Blankson y Klerks, 2017). Sin embargo, en este estudio se observaron correlaciones negativas entre la MO y los EPT, lo que podría indicar que la MO no influye directamente en el aumento de la concentración de estos EPT en la LT. De las correlaciones significativas entre MO, carbonatos y los EPT de los núcleos tres núcleos, solo se encontraron en LT03 para As y Zn (Figura 16; Anexo 19). Donde el As tuvo correlaciones negativas significativas con la MO ($r=-0.72$) y carbonatos ($r=-0.82$), y el Zn tuvo una correlación negativa significativa con la MO ($r=-0.55$).

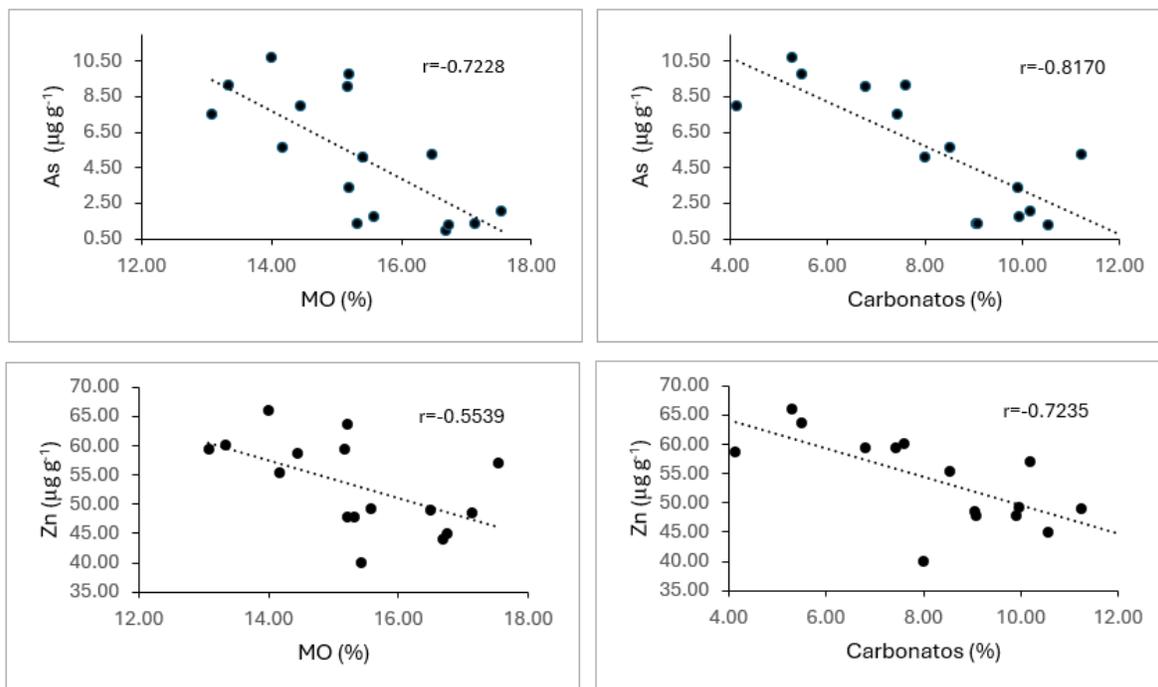


Figura 16. Gráficos de correlación ($r= 0.497$, con un nivel significancia $\alpha=0.05$) entre la MO, los carbonatos y las concentraciones de As y Zn para el núcleo LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

6.3 Elementos mayores (procedencia de los EPT)

De las correlaciones entre los elementos mayores y la concentración de los EPT (Figura 17, Anexo 17, 18 y 19), se encontraron correlaciones significativas sólo en LT03 ($r=0.49$) de As y Zn. En este sentido, las correlaciones de As fueron con SiO_2 ($r=0.85$), Al_2O_3 ($r=0.89$), TiO_2 ($r=0.87$), Fe_2O_3 ($r=0.88$) y de MnO ($r=0.67$); del mismo modo, Zn presentó correlaciones significativas con los mismos elementos (SiO_2 , $r=0.76$; Al_2O_3 , $r=0.80$; TiO_2 , $r=0.73$; Fe_2O_3 , $r=0.80$; MnO , $r=0.84$). Lo anterior sugiere que, tanto el As como el Zn del núcleo LT03, provienen de sedimentos de origen terrígeno, ya que el núcleo LT03 fue recolectado cerca de río Candelaria, el cual contribuye con el transporte de sedimentos terrígenos. Asimismo, las correlaciones entre los óxidos de hierro y manganeso con el As y el Zn señalan que estos EPT son adsorbidos por estos óxidos para formar complejos (Luo *et al.*, 2018).

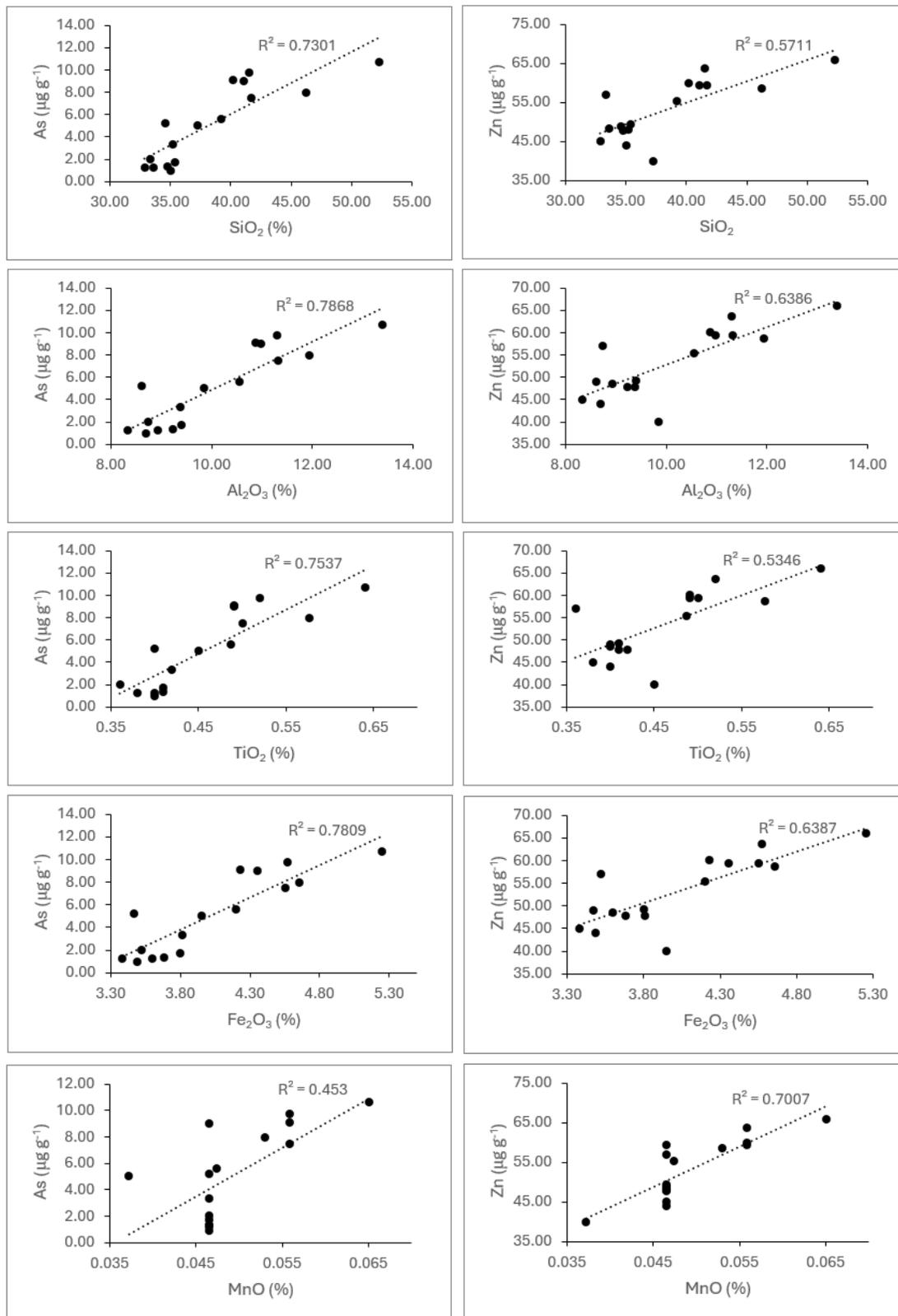


Figura 17. Gráficos de correlación ($r = 0.497$, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$) entre los elementos mayores y las concentraciones de As y Zn para el núcleo LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

6.4 Concentraciones de As, Cd y Zn

Las concentraciones de los EPT (As, Cd y Zn) en los núcleos de LT, fueron comparadas con los valores reportados en otras lagunas costeras de México y del mundo (Tabla 14). De las comparaciones con otros estudios realizados en la LT, Magallanes-Ordóñez *et al.* (2015) recolectaron sedimentos superficiales en 17 estaciones dentro de la LT, reportando concentraciones menores de As y mayores para Zn que las observadas en este estudio. Asimismo, describieron a la LT como un sitio poco contaminado. En cuanto al estudio de Cuevas-Madrid *et al.* (2018), las concentraciones de Cd fueron mayores y las de Zn menores en núcleos de sedimento de los manglares del interior de la isla del Carmen. Ontiveros-Cuadras *et al.* (2022) utilizaron núcleos de sedimento recolectados en lechos de pastos marinos del sitio La Deseada en la LT, reportando concentraciones mayores de As y Cd y concentraciones menores de Zn, a su vez categorizaron a la laguna como ligeramente contaminada. En general, estos estudios concuerdan en que la entrada de materiales terrígenos a través de los ríos adyacentes a LT son una fuente importante de EPT (Magallanes-Ordóñez *et al.*, 2015; Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2022).

Las concentraciones de As, Cd y Zn en otras lagunas costeras de México como El soldado, Lobos y Tóbari en el Golfo de California (Vargas-González *et al.*, 2017), La Salada en Veracruz (Bojórquez-Sánchez *et al.*, 2017), el Estero de Urías en Sinaloa (Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2019) y Xola-Paramán en Jalisco (Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2021), fueron mayores que las reportadas en este estudio. Estas lagunas están clasificadas de moderadamente contaminadas a contaminadas, excepto La Salda en Veracruz, que está clasificada como no contaminada. En los estudios antes mencionados, se describen los factores que influyen en la contaminación de estos cuerpos de agua costeros. Por ejemplo, Vargas-González *et al.* (2017) mencionaron que en la Laguna de Tóbari hay un desarrollo intenso acuícola y pesquero, así como descarga de aguas residuales provenientes de la población alledaña. Mientras que, Bojórquez-Sánchez *et al.* (2017) aluden la presencia de EPT en La Salada en Veracruz con las actividades mineras de la región. En cuanto al Estero de Urías en Sinaloa, Ontiveros-Cuadras *et al.* (2019) mencionan que este cuerpo de agua está rodeado de asentamientos humanos, un parque industrial que incluye un puerto de cabotaje y ultramar que transporta productos derivados del petróleo, así como el vertimiento de aguas residuales de dos camaroneras. Y en la laguna Xola-Paramán en Jalisco, Ontiveros-Cuadras *et al.* (2021) mencionan que la agricultura, se ha convertido en la actividad económica que genera el mayor impacto en la región por su reciente expansión.

Del mismo modo, las concentraciones de As, Cd y Zn fueron mayores en lagunas localizadas fuera de México, que se reportaron como contaminadas. En Chilika, India, Nazneen *et al.* (2019) mencionan que las principales fuentes de EPT, son las aguas residuales domésticas y agrícolas, escapes barcos, así como las pinturas antiincrustantes utilizadas en los barcos y la deposición atmosférica por los escapes de automóviles. En Burullus, delta del Nilo en Egipto, Shetaia *et al.* (2022) atribuyen a la descarga de aguas residuales como una de las problemáticas principales que abonan a la contaminación de EPT. De igual forma, Mna *et al.* (2022) mencionaron que en la laguna Bizerta de Túnez, las posibles fuentes de EPT son la descarga de aguas residuales y los desechos generados por un gran criadero de mejillones, que son vertidos en la laguna. Finalmente, para la Isla

de Meishan en China, Zhang *et al.* (2022) mencionan que la distribución de EPT está influenciada por desarrollo de la acuicultura, la industria, la agricultura y la navegación. Con lo anterior se puede ver que las lagunas costeras son vulnerables a la contaminación por EPT debido a las actividades antropogénicas que se desarrollan alrededor y dentro de estos cuerpos acuáticos.

Tabla 16. Comparación de las concentraciones de As, Cd y Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$) en sedimentos de lagunas y sitios costeros.

| Sitio costero | Ambiente | Clasificación | As | Cd | Zn | Referencia |
|-----------------------------------|----------|---------------|----------|-----------|------------|---|
| *Términos, Campeche | | | 2.8-8.3 | 0.07-0.14 | 47.6-62.4 | |
| LT01 | LC | NC | 1.1-7.1 | 0.08-0.15 | 44.6-56.4 | Sitio de estudio |
| LT02 | | | 0.9-10.7 | 0.12-0.26 | 40.0-66.0 | |
| LT03 | | | | | | |
| **Términos, Campeche | LC | C | 0.7-4.7 | ND | 9.0-69.0 | Magallanes-Ordóñez <i>et al.</i> (2015) |
| Términos, Campeche | LC | NC | ND | 0.04-0.4 | 0.7-21.7 | Cuevas-Madrid <i>et al.</i> (2018) |
| *La Deseada, LT Campeche | LC | MC | 0.5-13.7 | 0.06-0.33 | 8.8-23.8 | Ontiveros-Cuadras <i>et al.</i> (2022) |
| **Golfo de California: El soldado | | | | 0.9-2.5 | 9.7-70.0 | |
| Lobos | LC | MC | ND | 0.2-2.4 | 41.3-118.0 | Vargas-González <i>et al.</i> (2017) |
| Tóbari | | | | <0.04-2.8 | 15.2-84.9 | |
| La Salada, Veracruz | LC | NC | 1.4-15.6 | 0.1-0.6 | 52.4-143.0 | Bojórquez-Sánchez <i>et al.</i> (2017) |
| Estero de Urías, Sinaloa | LC | C | 2.2-34.8 | ND | 26.6-135.0 | Ontiveros-Cuadras <i>et al.</i> (2019) |
| Xola-Paramán, Jalisco | LC | MC | ND | ND | 36.7-103.9 | Ontiveros-Cuadras <i>et al.</i> (2021) |
| Chilika, India | LC | C | ND | 3.5-4.6 | 52.7-103.6 | Nazneen <i>et al.</i> (2019) |
| Burullus, delta del Nilo, Egipto | LC | C | ND | 0.3-7.1 | 276-1495 | Shetaia <i>et al.</i> (2022) |
| Bizerta, Túnez | LC | C | ND | 2.6-11.9 | 163-261 | Mna <i>et al.</i> (2022) |
| Isla de Meishan, China | EC | C | 7.2-15.0 | 0.24-0.79 | 69.7-116.2 | Zhang <i>et al.</i> , (2022) |

LC= Laguna costera; E= Estuario; *= Núcleo de sedimento; **= sedimentos superficiales; ND = No hay dato; C= Contaminado; MC=moderadamente contaminado NC= No contaminado.

6.4.1 Factor de enriquecimiento

La mayoría de los valores del factor de enriquecimiento (FE) de As, Cd y Zn en los núcleos LT01, LT02 y LT03 (Tabla 15) fueron <1.5 (sin enriquecimiento), excepto para Cd en LT03, donde se registró un FE de 1.6 (enriquecimiento menor) a los 4 cm de profundidad. Lo anterior indicó que los sitios de recolección de los núcleos LT no presentan contaminación por alguno estos elementos. Sin embargo, estudios previos realizados en la laguna, como el de Ontiveros-Cuadras *et al.* (2022) detectaron enriquecimientos menores de Cd (FE <1.8) y Zn (FE <1.7) y de moderados a fuertes de As (FE <21.6) en el área de pastos marinos de La Deseada (Isla del Carmen). Asimismo, Madrid *et al.* (2018) encontraron enriquecimientos severos de Cd en el núcleo C1 (FE=16.21) que fue recolectado cerca de la boca de Puerto Real, así como enriquecimientos de severos a moderados en los núcleos C2 (FE= 6.2) y C3 (FE= 7.0), recolectados en el centro de la Isla del Carmen y el manglar cercano a

Ciudad del Carmen, respectivamente; por el contrario, para Zn ($FE < 1$), los autores indicaron que no encontraron enriquecimientos.

Tabla 17. Factor de enriquecimiento de los EPT en los núcleos LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche México.

| | As | Cd | Zn |
|------------------------------|----------|---------|---------|
| LT01 | 0.4 -1.1 | 0.4-0.8 | 1.1-1.3 |
| LT02 | 0.2-1.1 | 0.5-0.9 | 1.1-1.4 |
| LT03 | 0.14-1.1 | 0.8-1.6 | 0.8-1.3 |
| NC ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 9.45 | 0.23 | 62.77 |
| TEL ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 7.24 | 0.68 | 124 |
| PEL ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 41.6 | 4.2 | 271 |

NC=concentraciones naturales

TEL= nivel de efecto umbral (Buchman, 2008)

PEL= nivel de efecto probable (Buchman, 2008)

Las concentraciones de los EPT en la LT fueron comparadas con los valores TEL y PEL (Buchman, 2008), obtenidas de las tablas de referencia de detección rápida (SQuiRT por sus siglas en ingles), que son utilizadas por la NOAA para ayudar a evaluar los riesgos potenciales del agua, los sedimentos o los suelos contaminados, así como los impactos de los recursos costeros y hábitats por contaminantes orgánicos e inorgánicos (NOAA, 2019). De estas comparaciones, se observó que las concentraciones de los EPT de los núcleos y las concentraciones naturales de Cd y Zn se encontraron por debajo de los valores TEL, mientras que el As se encontró por encima de TEL. En cuanto los valores PEL, ninguno de los elementos analizados sobrepasó este nivel. De modo que, el As contenido en los núcleos LT podría generar efectos adversos en la fauna bentónica, mientras que el Cd y Zn no (Birch, 2010).

6.4.2. Flujos históricos

Los flujos de As, Cd y Zn en LT01 y LT02 fueron muy variables en el tiempo, presentaron incrementos y disminuciones, probablemente como resultado de los cambios en la sedimentación de la LT, ya que los valores de TAM y TAS variaron del mismo modo. Por ejemplo, se observó que cuando aumentaron las TAM, también incrementaron los flujos de los EPT. En los tres núcleos, algunos de los flujos máximos de los EPT se reportaron en 2020 ± 0.20 ($\text{As}=4.53 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ y $\text{Zn}=34.28 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$), 2021 ± 0.09 ($\text{As}=4.82 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ y $\text{Cd}=0.08 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) en LT01, 2020 ± 0.23 ($\text{As}=0.74 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ y $\text{Zn}=35.71 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$), 2021 ± 0.08 ($\text{As}=0.85 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ y $\text{Cd}=0.08 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) en LT02 y 2020 ± 0.15 ($\text{Zn}=7.79 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ y $\text{Cd}=0.03 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) en LT03, coincidiendo con incrementos en las TAM ($0.55\text{-}0.61 \text{ g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ en LT01, $0.69\text{-}0.54 \text{ g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ en LT02 y $0.018 \text{ g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ en LT03 respectivamente) y TAS ($1.40\text{-}1.26 \text{ cm año}^{-1}$ en LT01, $1.76\text{-}1.93 \text{ cm año}^{-1}$ en LT02 y 0.68 cm año^{-1} en LT03). Otras de edades en las que coinciden los incrementos de TAM y TAS, con los incrementos de los flujos de Cd, As y Zn en LT01 y LT02 son 1978 ± 8.36 , 1994 ± 3.89 , 2002 ± 2.43 , 2005 ± 2.03 , 2011 ± 1.20 y 2015 ± 0.63 en LT01, y en 1997 ± 6.52 , 2001 ± 5.06 , 2009 ± 2.72 y 2018 ± 0.71 en LT02 (Anexo 16-17). De las fechas mencionadas, algunas concuerdan con eventos meteorológicos que han ocurrido en la región y que influyen de forma directa en el aporte de sedimentos y las tasas de sedimentación, como los huracanes Roxana en 1995, Isidore en 2002 y

Dean en 2007, (SEMARNAT, 2022; Madrid *et al.*, 2018). Del mismo modo, las variaciones de los valores de TAM en los núcleos LT01 y LT02 podrían estar relacionadas con el aporte de sedimentos de los ríos Chumpán y Palizada, ya que LT01 y LT02 fueron recolectados del lado occidental de LT, cerca de la desembocadura de estos ríos. Por otro lado, en LT01 se encontró que el incremento de TAM y los flujos de Zn y As en 1978 ± 8.36 , podrían estar relacionado con el derrame de más de 400 millones de litros de petróleo provocado por el accidente de la perforación del Pozo Ixtoc en la Sonda de Campeche en 1979 (UAC, 2007), ya que algunos EPT como el Cd, Ni, Zn, Mn, V, Cu, Cr, Pb, As y Hg, están presentes en la extracción del petróleo como resultado de la composición mineral de las rocas donde se formó el petróleo o bien de la composición química de los lodos de perforación (Ware, 1993; Muhammad *et al.*, 2020).

En cuanto al comportamiento de los flujos de As, Cd y Zn en LT03, estos fueron poco variables con el tiempo, en comparación con los núcleos LT01 y LT02. Los flujos de los EPT en LT03 fueron casi constantes de 1893 ± 54.20 a 1940 ± 17.23 , ya que a partir de ahí, sus valores incrementaron hasta 1972 ± 8.06 , lo que podría estar relacionado con el aumento poblacional de la región y con ello el incremento de las actividades antropogénicas como la pesca, la acuicultura, la agricultura, la urbanización y la extracción de petróleo, actividades que se desarrollaron a partir de 1970 y que se convirtieron en el eje que impulsó del desarrollo socioeconómico de Campeche (Bach *et al.*, 2005; UAC, 2007). Los flujos de los EPT (As, Cd y Zn), disminuyeron entre 1984 y el 2000, y a partir de 2011 ± 1.25 volvieron a incrementarse (As= $0.26 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$, Cd= $0.03 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ y Zn= $7.18 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$), lo cual coincide con los eventos de huracanes y tormentas tropicales de los años 2010 (Alex, Richard y Karl) y 2012 (Ernesto; SEMARNAT, 2022). Del mismo modo, se identificaron incrementos en los flujos de As ($3.07 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$), Cd ($0.07 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Zn ($25.28 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) en 2011 ± 1.20 para LT01 y de Zn ($29.66 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) en 2009 ± 2.72 para LT02, fechas que coinciden con los mismos eventos meteorológicos.

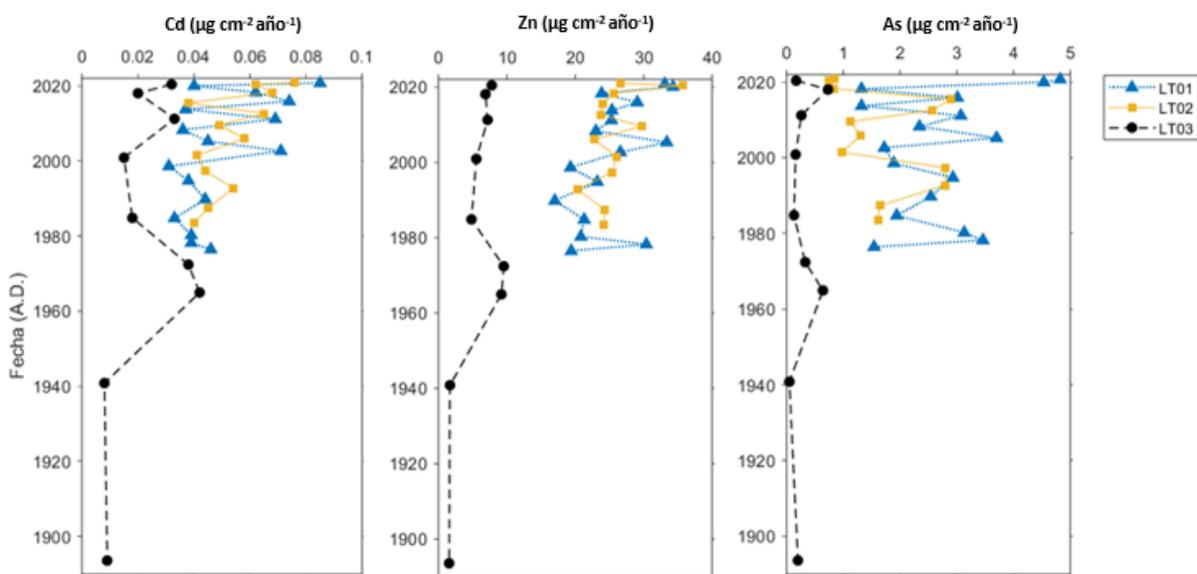


Figura 18. Flujos históricos de los EPT respecto al tiempo (Fecha A.D.) en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche, México.

7. Conclusiones

1. La distribución del tamaño de grano en los núcleos de sedimento estuvo relacionada con la ubicación de los sitios de extracción. Los núcleos LT01 y LT02, que fueron recolectados en la parte occidental de laguna cerca de la desembocadura de los ríos Chumpán y Palizada, tuvieron una predominancia del contenido de limos (54.2-72.1% en LT01 y de 64.0-71.7% en LT02). Así mismo, LT03, tuvo una predominancia en la fracción de limos (47.8-59.7%). Sin embargo, en comparación con LT01 y LT02, LT03 presento mayores valores de arenas (5.4-16.0%) y arcillas (26.9-43.7%), probablemente como resultado de su ubicación, ya que LT03 se extrajo de la parte oriental de laguna (cercana a la entrada de Puerto real y la desembocadura del río Candelaria).
2. Los sedimentos de grano fino (limos) en LT01 tuvieron correlaciones positivas ($p < 0.05$) con la MO, lo que indica la afinidad de la MO por este tipo de sedimento. En cuanto al núcleo LT02, no se encontraron correlaciones significativas, mientras que LT03 presentó correlaciones positivas significativas de MO y carbonatos, con las arenas, así como negativas entre la MO y las arcillas, lo que se relaciona con la composición textural del sedimento (arenas carbonatadas) del lado oriental de LT, sitio donde fue extraído LT03. Del análisis de correlación entre la MO, los carbonatos y los EPT (As, Cd y Zn), se observaron correlaciones negativas entre la MO y los EPT, de modo que se sugiere que la MO, no es un factor que esté influyendo directamente en el aumento de la concentración de los EPT en LT.
3. Por otro lado, los resultados de las correlaciones entre elementos mayores y los EPT, fueron significativas solo en LT03, y para los elementos As y Zn, con el SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 y de MnO. Lo anterior indicaría que, As y el Zn, en el núcleo LT03, provienen de sedimentos de origen terrígeno del de río Candelaria.
4. El fechado con ^{210}Pb en los núcleos de sedimento LT01, LT02 y LT03 permitió realizar la reconstrucción histórica de las concentraciones y flujos de As, Cd y Zn, así como estimar las TAM y TAS. Se observó que los incrementos en las TAM y TAS coinciden con los aumentos en los flujos de los EPT.
5. Los cambios en los flujos de As, Cd y Zn en LT podrían estar relacionados con las actividades antropogénicas de la región, así como el aporte de sedimentos del mar y los afluentes Chumpán, Palizada y Candelaria, y la influencia de eventos meteorológicos como ciclones y huracanes que afectan las TAM y TAS.

8. Referencias

- Abril, J. (2019). *Radiometric dating of recent sediments: On the performance of 210Pb-based CRS chronologies under varying rates of supply*. Quaternary Geochronology, 51, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2018.12.003>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2005). Public Health Statement for Zinc. DEPARTMENT of HEALTH AND HUMAN SERVICES. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/PHS/PHS.aspx?phsid=300&toxid=54>
- Alharbi, T., Al-Kahtany, K., Nour, H. E., Giacobbe, S. y El-Sorogy, A. S. (2022). *Contamination and health risk assessment of arsenic and chromium in coastal sediments of Al-Khobar area, Arabian Gulf, Saudi Arabia*. Marine Pollution Bulletin, 185, 114255. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114255>
- Appleby, P.G. and Oldfield, F. (1978). "The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment." Catena, 5: 1-8.
- Aquino-López, M. A., Ruiz-Fernández, A. C., Blaauw, M., y Sanchez-Cabeza, J. A. (2020). *Comparing classical and Bayesian 210Pb dating models in human-impacted aquatic environments*. Quaternary Geochronology, 60, 101106. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101106>
- Atamaleki, A., Sadani, M., Raoofi, A., Miri, A., Bajestani, S. G., Fakhri, Y., Heidarinejad, Z. y Mousavi Khaneghah, A. (2020). *The concentration of potentially toxic elements (PTEs) in eggs: A global systematic review, meta-analysis, and probabilistic health risk assessment*. Trends in Food Science & Technology, 95, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.003>
- Ávila, H., Quintero, E., Angulo, N., Cárdenas, C., Araujo, M., Morales, N. y Prieto, M. (2014). *Determinación de metales pesados en sedimentos superficiales costeros del Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela*. Multiciencias, 14(1), 16-21.
- Ávila González, D.A. (2017). *Fitoextracción de suelos contaminados por elementos potencialmente tóxicos en la región de Atlixco, Puebla*. [Tesis de maestría]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Repositorio Institucional de Acceso Abierto.
- Bach, L., Calderon, R., Cepeda, M.F., Oczkowski, A., Olsen, S.B., Robadue, D. (2005). *MANAGING FRESHWATER INFLOWS TO ESTUARIES: Resumen del Perfil de Primer Nivel del Sitio, Laguna de Términos y su Cuenca, México*. Narragansett, RI: Coastal Resources Center, University of Rhode Island pp 30.
- Banerji, U. S., Goswami, V., y Joshi, K. B. (2022). *Quaternary dating and instrumental development: An overview*. Journal Of Asian Earth Sciences: X, 7, 100091. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100091>
- Barbier, E. B. (2012). *A spatial model of coastal ecosystem services*. Ecological Economics, 78, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.03.015>

- Barnes, R.S.K. (2001). Lagoons. En *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 1427-1438). Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012227430X00091X#!>
- Basset, A., Elliott, M., West, R. y Wilson, J. (2013). *Estuarine and lagoon biodiversity and their natural goods and services*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 132, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.05.018>
- Bastami, K. D., Bagheri, H., Kheirabadi, V., Zaferani, G. G., Teymori, M. B., Hamzehpoor, A., Soltani, F., Haghparast, S., Harami, S. R. M., Ghorghani, N. F. y Ganji, S. (2014). *Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea*. *Marine Pollution Bulletin*, 81(1), 262-267. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.029>
- Berglund, B. E., Ralska-Jasiewiczowa, M., y International Geological Correlation Programme. Project 158B. (1986). *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. Wiley. 423 - 451
- Bernal, J. P., Beramendi Orosco, L. E., Lugo Ibarra, K. C., y Daesslé, L. W. (2010). *Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 305-323. <https://doi.org/10.18268/bsgm2010v62n3a1>
- Bi, X., Feng, X., Yang, Y., Li, X., Sin, G. P., Qiu, G., Qian, X., Li, F., He, T. y Li, P. (2007). *Heavy metals in an impacted wetland system: A typical case from southwestern China*. *Science of The Total Environment*, 387(1-3), 257-268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.059>
- Birch, G. F. (2010). *Indicators of Anthropogenic Change and Biological Risk in Coastal Aquatic Environments*. Elsevier eBooks, 235-270. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374711-2.00411-3>
- Blankson, E. R., y Klerks, P. L. (2017). *The effect of sediment characteristics on bioturbation-mediated transfer of lead, in freshwater laboratory microcosms with Lumbriculus variegatus*. *Ecotoxicology*. <https://doi.org/10.1007/s10646-016-1757-0>
- Bojórquez-Sánchez, S., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Ruiz-Fernández, A. C., Sánchez-González, A., Sanchez-Cabeza, J., Bojórquez-Leyva, H., y Pérez-Bernal, L. H. (2017). *Trace element fluxes during the last 100 years in sediment near a nuclear power plant*. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 198, 343-353. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.05.005>
- Bonczyk, M. (2013). A Determination of the Concentration Level of Lead 210Pb Isotope in Solid Samples for the Assessment of Radiation Risk Occuring in Coal Mines. *Journal of Sustainable Mining*, 12(2), 1-7. <https://doi.org/10.7424/jsm130201>
- Botello, A. (1977). *Variación de los parámetros hidrológicos en las épocas de sequía y lluvias (mayo y noviembre de 1974) en la Laguna de Términos, Campeche, México*. <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/centro/1978-1/articulo40.html>
- Buchman, M. F., (2008). *Screening Quick Reference Tables*, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of Response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 34 pages

- Carabias Lillo, J., Quadri de la Torre, G., Javier de la Maza, E. (1997). *Programa de Manejo de la Zona de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos*. Instituto Nacional de Ecología, PP 164.
- Carvalho, F. P., Villeneuve, J. P., Cattini, C., Rendón, J., y Mota de Oliveira, J. (2009). *Pesticide and PCB residues in the aquatic ecosystems of Laguna de Términos, a protected area of the coast of Campeche, Mexico*. *Chemosphere*, 74(7), 988–995. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.09.092>
- Castañeda-Chávez, M. D. R., Lango-Reynoso, F. y Navarrete-Rodríguez, G. (2017). *Heavy Metals in Sediment from Alvarado Lagoon System in Veracruz, México*. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(3), 1209-1214. <https://doi.org/10.22161/ijeab/2.3.26>
- Celis-Hernández, O., Ontiveros-Cuadras, J. F., Ward, R. D., Girón-García, M. P., Pérez-Ceballos, R. Y., Canales-Delgadillo, J. C., Acevedo-Granados, I. V., Santiago-Pérez, S., Armstrong-Altrin, J. S. y Merino-Ibarra, M. (2022). *Biogeochemical behaviour of cadmium in sediments and potential biological impact on mangroves under anthropogenic influence: A baseline survey from a protected nature reserve*. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114260>
- Centers for Disease Control and Prevention, (2017). Cadmium Factsheet: https://www.cdc.gov/biomonitoring/Cadmium_FactSheet.html#:~:text=Breathing%20high%20levels%20of%20cadmium,considered%20a%20cancer%2Dcausing%20agent.
- Chen, M., Ding, S., Li, C., Tang, Y., Fan, X., Xu, H., Tsang, D. C. y Zhang, C. (2021). *High cadmium pollution from sediments in a eutrophic lake caused by dissolved organic matter complexation and reduction of manganese oxide*. *Water Research*, 190, 116711. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116711>
- Cheng, Q., Zhou, W., Zhang, J., Shi, L., Xie, Y. y Li, X. (2019). *Spatial variations of arsenic and heavy metal pollutants before and after the water-sediment regulation in the wetland sediments of the Yellow River Estuary, China*. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.032>
- CONANP. (2021). Ficha SIMEC: Laguna de Términos. Comisión Natural de Áreas Protegidas. <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=118>
- CONANP. (2022). Áreas Naturales Protegidas. Recuperado el 07 de marzo de 2023, de <https://www.gob.mx/conanp/documentos/areas-naturales-protegidas-278226>
- Contreras, A., Esparza, R., Douillet, P., y Zavala-hidalgo, J. (2014). *Tidal dynamics of the Terminos Lagoon, Mexico: observations and 3D numerical modelling*. 1349–1371. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0752-3>
- Courtney Mustaphi, C. J., Brahney, J., Aquino-López, M. A., Goring, S., Orton, K., Noronha, A., Czaplewski, J., Asena, Q., Paton, S. y Panga Brushworth, J. (2019). *Guidelines for reporting and archiving 210Pb sediment chronologies to improve fidelity and extend*

data lifecycle. Quaternary Geochronology, 52, 77-87.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2019.04.003>

- Cuevas-Madrid, H., Rosales-Hoz, L., Márquez-García, A. Z., y Carranza Edwards, A. (2018). Environmental assessment of a mangrove protected area in the southeast Gulf of Mexico through sediment core analysis. *Environmental Earth Sciences*, 77(3).
<https://doi.org/10.1007/s12665-017-7160-1>
- David, LT y Kjerfve, B. (1998). *Mareas y corrientes en una laguna costera de dos bocas: Laguna de Términos, México*. Investigación de la plataforma continental, 18 (10), 1057–1079.
[https://doi.org/10.1016/s0278-4343\(98\)00033-8](https://doi.org/10.1016/s0278-4343(98)00033-8)
- Derry McPhail, Edward Summerhayes, Susan Welch y Joël Brugger. (2003). THE GEOCHEMISTRY AND MOBILITY OF ZINC IN THE REGOLITH. *Advances in Regolith*.
- Díaz-Asencio, M., Sanchez-Cabeza, J., Ruiz-Fernández, A. C., Corcho-Alvarado, J., y Pérez-Bernal, L. H. (2020). Calibration and use of well-type germanium detectors for low-level gamma-ray spectrometry of sediments using a semi-empirical method. *Journal of Environmental Radioactivity*, 225, 106385. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106385>
- Durán, R. y M. Méndez. (2010). El estado. Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. México 496 pp.
- Essien, J. P., Antai, S. P., y Olajire, A. A. (2009). *Distribution, Seasonal Variations and Ecotoxicological Significance of Heavy Metals in Sediments of Cross River Estuary Mangrove Swamp*. *Water Air and Soil Pollution*, 197(1-4), 91-105.
<https://doi.org/10.1007/s11270-008-9793-x>
- Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). (2003). Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos.
- Fichez, R., Archundia, D., Grenz, C., Douillet, P., Gutiérrez Mendieta, F., Origel Moreno, M., Denis, L., Contreras Ruiz Esparza, A., y Zavala-Hidalgo, J. (2017). *Global climate change and local watershed management as potential drivers of salinity variation in a tropical coastal lagoon (Laguna de Terminos, Mexico)*. *Aquatic Sciences*, 79(2), 219–230.
<https://doi.org/10.1007/s00027-016-0492-1>
- Gao, L., Li, R., Liang, Z., Hou, L. y Chen, J. (2021). *Seasonal variations of cadmium (Cd) speciation and mobility in sediments from the Xizhi River basin, South China, based on passive sampling techniques and a thermodynamic chemical equilibrium model*. *Water Research*, 207, 117751. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117751>
- Garcés-Ordóñez, O., Saldarriaga-Vélez, J. F., Espinosa-Díaz, L. F., Canals, M., Sánchez-Vidal, A., y Thiel, M. (2022). *A systematic review on microplastic pollution in water, sediments, and organisms from 50 coastal lagoons across the globe*. *Environmental Pollution*, 315, 120366. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120366>
- García-Ríos, V., Alpuche-Gual, L., Herrera-Silveira, J., Montero-Muñoz, J., Morales-Ojeda, S., Pech, D., Cepeda-González, M. F., Zapata-Pérez, O., y Gold-Bouchot, G. (2014). *Towards*

- a coastal condition assessment and monitoring of the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem (GoM LME): Terminos Lagoon pilot site.* Environmental Development, 7(1), 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.04.007>
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Grenz, C., Fichez, R., Silva, C. Á., Benítez, L. C., Conan, P., Esparza, A. C. R., Denis, L., Ruiz, S. D., Douillet, P., Martinez, M. E. G., Ghiglione, J. F., Mendieta, F. J. G., Origel-Moreno, M., Garcia, A. Z. M., Caravaca, A. M., Pujo-Pay, M., Alvarado, R. T., y Zavala-Hidalgo, J. (2017). *Benthic ecology of tropical coastal lagoons: Environmental changes over the last decades in the Términos Lagoon, Mexico.* *Comptes Rendus - Geoscience*, 349(6–7), 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.09.016>
- Gutiérrez-Galindo, E. A., Muñoz-Barbosa, A., Walter Daesslé, L., Vinicio Macías-Zamora, J. y Antonio Segovia-Zavala, J. (2007). *Sources and factors influencing the spatial distribution of heavy metals in a coastal lagoon adjacent to the San Quintín volcanic field, Baja California, Mexico.* *Marine Pollution Bulletin*, 54(12), 1985-1989. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.09.019>
- Gómez Lahoz, C. (2003). *Biodisponibilidad. Concepto y Cuantificación. Aplicación a Emplazamientos Contaminados con Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos. Trabajo realizado durante el XL curso internacional de Edafología y Biología Vegetal.* Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla.
- González-Mendoza, D., Grimaldo-Juárez, O., y Cervantes-Díaz, L. (2008). *Los elementos potencialmente tóxicos en las plantas de manglar: una revisión de los mecanismos de tolerancia involucrados.* *Interciencia*, 33(11), 817-820.
- Haghnazar, H., Hudson-Edwards, K. A., Kumar, V., Pourakbar, M., Mahdavianpour, M. y Aghayani, E. (2021). *Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability.* *Chemosphere*, 285, 131446. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131446>
- Harvey, D. (2000). *Modern Analytical Chemistry.* McGraw-Hill Science Engineering
- Hedges, J. I., y Keil, R. G. (1995). *Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis.* *Marine Chemistry*, 49(2-3), 81-115. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(95\)00008-f](https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00008-f)
- Hernández-Crespo, C. y Martín, M. (2015). *Determination of background levels and pollution assessment for seven metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn) in sediments of a Mediterranean coastal lagoon.* *CATENA*, 133, 206-214. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.013>
- Ho, H. T., Swennen, R., Cappuyens, V., Vassilieva, E., y Van Tran, T. (2012). *Necessity of normalization to aluminum to assess the contamination by heavy metals and arsenic in*

- sediments near Haiphong Harbor, Vietnam*. Journal of Asian Earth Sciences, 56, 229-239. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.05.015>
- Hoshyari, E., Hassanzadeh, N., Keshavarzi, B., Jaafarzadeh, N. y Rezaei, M. (2023). *Spatial distribution, source apportionment, and ecological risk assessment of elements (PTEs, REEs, and ENs) in the surface soil of shiraz city (Iran) under different land-use types*. Chemosphere, 311, 137045. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137045>
- INEGI. (2016). Estudio de información integrada de la Cuenca Laguna de Términos y otras, pp 84.
- Jaramillo, E., y Castañeda, C. (2018). *Fuentes y niveles de elementos peligrosos toxicos en sedimentos de lagunas costeras de Colombia*. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 9(1), 25-38.
- Jensen, J. R., Kjerfve, B., Ramsey, E. W., Magill, K. E., Medeiros, C., y Sneed, J. E. (1989). Remote sensing and numerical modeling of suspended sediment in Laguna de terminos, Campeche, Mexico. Remote Sensing of Environment, 28, 33-44. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90103-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90103-X)
- Kennish, M. J. y Paerl, H. W. (2010). Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change. Taylor y Francis, pp. 539.
- Keesari, T., Chidambaram, S., Pethaperumal, S., Kamaraj, P., Sharma, D. A. y Sinha, U. K. (2022). Arsenic distribution in sediments of multi-tier sedimentary formation of coastal Pondicherry, India – Implications on groundwater quality. Marine Pollution Bulletin, 174, 113193. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113193>
- Kubier, A., Wilkin, R. T. y Pichler, T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. Applied Geochemistry, 108, 104388. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388>
- Lara-Domínguez, L.L., Contreras-Espinosa, F., Castañeda-López, O., Barba-Macías, E. y Pérez-Hernández, M. A. (2011). Lagunas costeras y estuarios. La Biodiversidad en Veracruz un estudio de estado (pp.297-313).
- LANRESC. (n.d). Laguna de Términos, Campeche México, de <https://lanresc.mx/observatorios/laguna-de-terminos/>
- León-Rojas, H. y Sánchez-Peña, L. (2020). Riesgos en la dinámica de urbanización de las costas de México. ALAP, IX Congreso de la Asociación Latinoamericana de Población.
- Li, R., Tang, C., Li, X., Jiang, T., Shi, Y., y Cao, Y. (2019). Reconstructing the historical pollution levels and ecological risks over the past sixty years in sediments of the Beijiang River, South China. Science of The Total Environment, 649, 448-460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.283>
- Li, Y., Zhou, H., Gao, B. y Xu, D. (2021). Improved enrichment factor model for correcting and predicting the evaluation of heavy metals in sediments. Science of The Total Environment, 755, 142437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142437>

- Liu, X., Zeng, B. y Lin, G. (2022). Arsenic (As) contamination in sediments from coastal areas of China. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113350. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113350>
- Luo, Y., Ding, J., Shen, Y., Tan, W., Suib, S. L., y Liu, F. (2018). Symbiosis mechanism of iron and manganese oxides in oxic aqueous systems. *Chemical Geology*, 488, 162-170. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.04.030>
- Magallanes-Ordóñez, V. R., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Rodríguez-Figueroa, G. M., Sánchez-González, A., Aguíñiga-García, S., Arreguín-Sánchez, F., Zetina-Rejón, M., Tripp-Valdez, A. y Romo-Ríos, J. A. (2015). Characterization of lithogenic and biogenic zones and natural enrichment of nickel in sediments of the Terminos Lagoon, Campeche, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156, 116-123. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.11.007>
- Marasinghe Wadige, C. P., Taylor, A. M., Maher, W. A. y Krikowa, F. (2014). *Bioavailability and toxicity of zinc from contaminated freshwater sediments: Linking exposure-dose-response relationships of the freshwater bivalve Hyridella australis to zinc-spiked sediments*. *Aquatic Toxicology*, 156, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.08.012>
- McLennan, S.M. y Murray, R.W. (1998). Geochemistry of sediments. In: *Geochemistry. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Dordrecht. https://doi.org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/1-4020-4496-8_143
- Mendoza-Carranza, M., Sepúlveda-Lozada, A., Dias-Ferreira, C., y Geissen, V. (2016). *Distribution and bioconcentration of heavy metals in a tropical aquatic food web: A case study of a tropical estuarine lagoon in SE Mexico*. *Environmental Pollution*, 210, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.014>
- Miller, J. N., y Miller, J. C. (2010). *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry* (6a ed.). Prentice Hall.
- Mobilian, C. y Craft, C.B. (2022). *Wetland Soils: Physical and Chemical Properties and Biogeochemical Processes*. In *Encyclopedia of Inland Waters* (Second Edition, pp 157-168). Elsevier; <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-819166-8.00049-9>
- Mna, H. B., Alsubih, M., Helali, M. A., Oueslati, W., Added, A., y Aleya, L. (2022). *Early diagenetic behavior of trace metals along with estimation of their diffusive fluxes: Ecological risk assessment in pore water and sediment of Bizerte Lagoon, Tunisia*. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114139. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114139>
- Muhammad, S.A., Abubakar, S.I., Babashani, H., Asagbra, A.E. y Alhassan, A.J. (2020). *Assessment of heavy metals concentration in crude oil contaminated water samples of three communities of Ikpokpo, Atanba, and Okpele-ama of Gbaramatu Kingdom, along the Escravos river in Warri southwest local government area of delta state, Nigeria*. *International Journal of Environment and Pollution Research*. ECRTD-UK, 8(3), 41-59.

- M. Sadiq. Heavy metals. in Toxic metal chemistry in marine environments. Marcel Dekker, Inc., New York. (1992). pp. 390.
- Nazneen, S., Singh, S., y Raju, N. J. (2019). *Heavy metal fractionation in core sediments and potential biological risk assessment from Chilika lagoon, Odisha state, India*. Quaternary International, 507, 370-388. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.05.011>
- National Research Council. (1977). *Arsenic: Medical and Biologic Effects of Environmental Pollutants*. Washington (DC): National Academies Press (US); <https://doi.org/10.17226/9003>
- Navarrete-Rodríguez, G., Castañeda-Chávez, M. D. R. y Lango-Reynoso, F. (2020). Geoaccumulation of Heavy Metals in Sediment of the Fluvial–Lagoon–Deltaic System of the Palizada River, Campeche, México. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 969. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030969>
- Neff, J. M. (1997). Ecotoxicology of arsenic in the marine environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16(5), 917-927. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160511>
- Neff, J. M. (2002a). Cadmium in the Ocean. *Bioaccumulation in Marine Organisms*, 89-102. <https://doi.org/10.1016/b978-008043716-3/50006-3>
- Neff, J. M. (2002b). Zinc in the Ocean. *Bioaccumulation in Marine Organisms*, 175-189. <https://doi.org/10.1016/b978-008043716-3/50011-7>
- Nettleton, D. (2014). *Commercial Data Mining: Processing, Analysis and Modeling for Predictive Analytics Projects (Illustrated)*. Morgan Kaufmann Publishers, 79-104.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy* (2 nd). Wiley-Blackwell.
- NOAA. (1999). Sediment Quality Guidelines developed for the National Status and Trends Program. PDF: https://rais.ornl.gov/documents/ECO_BENCH_NOAA.pdf
- NOAA. (2019). SQuiRT Cards. [Response.restoration.noaa.gov. https://response.restoration.noaa.gov/environmental-restoration/environmental-assessment-tools/squirt-cards.html](https://response.restoration.noaa.gov/environmental-restoration/environmental-assessment-tools/squirt-cards.html)
- Noreña-Barroso, E., Gold-Bouchot, G., Zapata-Perez, O., y Sericano, J. L. (1999). *Polynuclear aromatic hydrocarbons in American oysters Crassostrea virginica from the Terminos Lagoon, Campeche, Mexico*. *Marine Pollution Bulletin*, 38(8), 637–645. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(98\)00165-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(98)00165-9)
- Ongley, E.D. (1997). *Capítulo 2 - Contaminación provocada por los sedimentos*. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. [Estudio FAO Riego y Drenaje - 55].
- Ontiveros-Cuadras, J. F. (2015). *Estudio retrospectivo de las tendencias históricas de los flujos de elementos potencialmente tóxicos (Aas, Cr, Cu, Hg, Pb, Rb, Zn y V), contaminantes orgánicos persistentes (PCBs, PBEDs y PAHs) y de carbono orgánico, en dos lagos ubicados en el Altiplano Mexicano, caracterizados por niveles de antropización*

contrastantes [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Biblioteca digital UNAM.

- Ontiveros-Cuadras, J. F., Ruiz-Fernández, A. C., Pérez-Bernal, L. H., Serrato de la Peña, J. L. y Sanchez-Cabeza, J. A. (2019). *Recent trace metal enrichment and sediment quality assessment in an anthropized coastal lagoon (SE Gulf of California) from 210Pb-dated sediment cores*. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110653. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110653>
- Ontiveros-Cuadras, J. F., Ruiz-Fernández, A. C., Pérez-Bernal, L. H., Raygoza-Viera, J. R. y Sanchez-Cabeza, J. A. (2021). *Historical reconstruction of trace element concentrations and fluxes in a tropical coastal lagoon (Mexican Pacific) derived from 210Pb radiochronology*. *Continental Shelf Research*, 213, 104315. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104315>
- Ontiveros-Cuadras, J. F., Ruiz-Fernández, A. C., Pérez-Bernal, L. H., Santiago-Pérez, S., González y González, S., Ávila, E., Cardoso-Mohedano, J. G. y Sanchez-Cabeza, J. A. (2022). *Accumulation and fluxes of potentially toxic elements in a large coastal lagoon (southern Gulf of Mexico) from 210Pb sediment chronologies*. *Marine Pollution Bulletin*, 181, 113839. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113839>
- Özşeker, K., Erüz, C. y Terzi, Y. (2022). *Evaluation of toxic metals in different grain size fractions of sediments of the southeastern Black Sea*. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113959. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113959>
- Palleiro, L., Patinha, C., Rodríguez-Blanco, M. L., y Taboada-Castro, M. M. (2016). *Metal fractionation in topsoils and bed sediments in the Mero River rural basin: Bioavailability and relationship with soil and sediment properties*. *Catena*, 144, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.019>
- Pan, F., Wang, B., Zhang, Y., Zhang, X., Cai, Y., Liu, H., Guo, Z. y Wang, X. (2022). *Bioavailability, (im)mobilization kinetics, and spatiotemporal patterns of arsenic and cadmium in surficial sediments of a river–estuary–coast system*. *Journal of Hydrology*, 612, 128140. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128140>
- Pérez-Ruzafa, A., Pérez-Ruzafa, I., Newton, A., y Marcos, C. (2019). *Coastal Lagoons: Environmental Variability, Ecosystem Complexity, and Goods and Services Uniformity*. Elsevier eBooks, 253-276. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814003-1.00015-0>
- Pérez-Ruzafa, A., Pérez-Marcos, M., y Marcos, C. (2020). *Coastal lagoons in focus: Their environmental and socioeconomic importance*. *Journal for Nature Conservation*, 57, 125886. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125886>
- Pérez Rojas, A. y Márquez García, A. Z. (2017). Sedimentología. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana, pp 57.
- Pitacco, V., Mistri, M., Ferrari, C. R. y Munari, C. (2018). *Heavy metals, OCPs, PAHs, and PCDD/Fs contamination in surface sediments of a coastal lagoon (Valli di Comacchio, NW Adriatic,*

- Italy*): Long term trend (2002–2013) and effect on benthic community. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 1221-1229. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.057>
- Pittauerová, D., Hettwig, B. y Fischer, H. (2011). *Pb-210 sediment chronology: Focused on supported lead*. *Radioprotection*, 46(6), S277-S282. <https://doi.org/10.1051/radiopro/20116666s>
- Pradit, S., Pattarathomrong, M. S. y Panutrakul, S. (2013). *Arsenic Cadmium and Lead Concentrations in Sediment and Biota from Songkhla Lake: A Review*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 91, 573-580. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.456>
- Robbins, J.A. (2006). "Geomorphology and sedimentology of estuaries." *Developments in Sedimentology*, 56: 259-292.
- Ruhl, J. (1997). *Physical and chemical properties of water and sediments, Grand Portage and Wausaugoning Bays, Lake Superior, Grand Portage Indian Reservation, northeastern Minnesota*, 1993-96. Open-File Report. <https://doi.org/10.3133/ofr97199>
- Ruiz-Fernández, A. C., Frignani, M., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., Arvizu, M. D., Raygoza-Viera, J. R. y Páez-Osuna, F. (2009). Trace Metals (Cd, Cu, Hg, and Pb) *Accumulation Recorded in the Intertidal Mudflat Sediments of Three Coastal Lagoons in the Gulf of California, Mexico*. *Estuaries and Coasts*, 32(3), 551-564. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9150-3>
- Ruiz-Fernández, A. C., Sanchez-Cabeza, J., Pérez-Bernal, L. y Gracia, A. (2019). *Spatial and temporal distribution of heavy metal concentrations and enrichment in the southern Gulf of Mexico*. *Science of The Total Environment*, 651, 3174-3186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.109>
- Ruiz-Fernández, A. C., Alonso-Hernández, C., Espinosa, L. F., Delanoy, R., Solares Cortez, N., Lucienna, E., Castillo, A. C., Simpson, S., Pérez-Bernal, L. H., Caballero, Y., Peña-Castro, A., López-Monroy, F., Quejido-Cabezas, A. J., Garay-Tinoco, J. A., Díaz-Asencio, M., Gómez-Batista, M., Parra Lozano, J. P., y Sanchez-Cabeza, J. A. (2020). *210Pb-derived sediment accumulation rates across the Wider Caribbean Region*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 223–224, 106366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106366>
- Sanchez-Cabeza, J., Kwong, L. L. W., y Betti, M. G. (2010). Method to Determine 226Ra in Small Sediment Samples by Ultralow Background Liquid Scintillation. *Analytical Chemistry*, 82(16), 6847-6853. <https://doi.org/10.1021/ac1008332>
- Sánchez-Cabeza, J.A, Díaz-Asencio, M. y Ruiz-Fernández, A.C. (2012). *Radiocronología de Sedimentos Costeros Utilizando 210Pb: Modelos, Validación y Aplicaciones*. Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena.
- Sharifinia, M., Keshavarzifard, M., Hosseinkhezri, P., Khanjani, M., Yap, C. K., Smith, W. O., Daliri, M., y Haghshenas, A. (2022). *The impact assessment of desalination plant discharges on heavy metal pollution in the coastal sediments of the Persian Gulf*. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113599. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113599>

- Sanchez, A., Zetina-Rejón, M., Tripp-Valdez, A., Arreguín, F., y Romo-Ríos, J. (2015). *Characterization of lithogenic and biogenic zones and natural enrichment of nickel in sediments of the Terminos Lagoon, Campeche, México*. 156, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.11.007>
- SEMARNAT. (2022). *Dirección General de Estadística e Información Ambiental*, consultado en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE04_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- Shaji, E., Santosh, M., Sarath, K., Prakash, P., Deepchand, V. y Divya, B. (2021). *Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula*. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101079. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.015>
- Shetaia, S. A., Abu Khatita, A. M., Abdelhafez, N. A., Shaker, I. M. y El Kafrawy, S. B. (2022). *Human-induced sediment degradation of Burullus lagoon, Nile Delta, Egypt: Heavy metals pollution status and potential ecological risk*. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113566. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113566>
- Simantiris, N., y Avlonitis, M. (2023). *Effects of future climate conditions on the zooplankton of a Mediterranean coastal lagoon*. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 282, 108231. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108231>
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., y Crouch, S. R. (2015). *Fundamentos de química analítica (9a. ed.)*. México D.F.: Cengage Learning
- Snyder, C. (2016). *Coastal Lagoons: Geology, Characteristics and Diversity*. Nova Science Publisher's, Incorporated, pp. 114.
- Tonh a, M. S., Garnier, J., Ara ujo, D. F., Cunha, B. C., Machado, W., Dantas, E., Ara ujo, R., Kutter, V. T., Bonnet, M. P. y Seyler, P. (2020). *Behavior of metallurgical zinc contamination in coastal environments: A survey of Zn from electroplating wastes and partitioning in sediments*. *Science of The Total Environment*, 743, 140610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140610>
- UAC. (2007). *Manual de gestión para la nominación del área de protección de flora y fauna Laguna de Términos patrimonio natural de la humanidad*. Universidad Autónoma de Campeche, 270.
- Vargas-González, H. H., Arreola-Lizárraga, J. A., García-Hern andez, J., Mendoza-Salgado, R. A., Zenteno Sav n, T., y M endez-Rodríguez, L. C. (2017). *Calidad de sedimentos asociada a actividades antrópicas en lagunas costeras semiáridas subtropicales de la costa central este del Golfo de California*. *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*, 33(esp02), 7-22. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.esp02.01>
- Vázquez, G. y Martínez, M., (2022). *Lagunas costeras, mucho más que agua*. INECOL (Instituto Nacional de Ecología). Recuperado el 5 de marzo de 2023, de <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1659-lagunas-costeras-mucho-mas-que-agua>

- Vázquez, G., Sharma, V. K., Magallanes, V. R. y Marmolejo, A. J. (1999). *Heavy Metals in a Coastal Lagoon of the Gulf of Mexico*. *Marine Pollution Bulletin*, 38(6), 479-485. [https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(98\)00173-8](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(98)00173-8)
- Vázquez Botello, A., (1978). *Variación de los parámetros hidrológicos en las épocas de sequía y lluvias en la Laguna de Términos, Campeche, México*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM 5(1): 159-177
- Wang, C., Qian, Y., Duan, Q., Huang, M., Berg, L. K., Shin, H. H., Feng, Z. C., Yang, B., Quan, J., Hong, S., y Yan, J. (2020). *Assessing the sensitivity of land-atmosphere coupling strength to boundary and surface layer parameters in the WRF model over Amazon*. *Atmospheric Research*, 234, 104738. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104738>
- Wang, J., Jiang, Y., Sun, J., She, J., Yin, M., Fang, F., Xiao, T., Song, G. y Liu, J. (2020). *Geochemical transfer of cadmium in river sediments near a lead-zinc smelter*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 196, 110529. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110529>
- Ware, K. D. (1993). *Heavy Metals and the Petroleum Industry*. Academic Service.
- Wise, J. C., Wise, J. A., Wise, C. F., Wise, S. S., Gianios, C., Xie, H., Walter, R. B., Boswell, M., Zhu, C., Zheng, T., y Perkins, C. (2018). *A three-year study of metal levels in skin biopsies of whales in the Gulf of Mexico after the Deepwater Horizon oil crisis*. *Comparative Biochemistry and Physiology C-toxicology & Pharmacology*, 205, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.12.003>
- Wit, R. (2011). *Biodiversity of Coastal Lagoon Ecosystems and Their Vulnerability to Global Change*. *Ecosystems Biodiversity*. <https://doi.org/10.5772/24995>
- World Health Organization: WHO. (2022, 7 diciembre). Arsenic. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic#:~:text=Long%2Dterm%20exposure%20to%20arsenic,increased%20deaths%20in%20young%20adults>.
- Xian, H., Dong, X., Wang, Y., Li, Y., Xing, J. y Jeppesen, E. (2022). *Geochemical baseline establishment and pollution assessment of heavy metals in the largest coastal lagoon (Pinqing Lagoon) in China mainland*. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 113459. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113459>
- Xie, M., Alsina, M. A., Yuen, J., Packman, A. I. y Gaillard, J. F. (2019). *Effects of resuspension on the mobility and chemical speciation of zinc in contaminated sediments*. *Journal of Hazardous Materials*, 364, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.043>
- Yin, K., Wang, Q., Lv, M. y Chen, L. (2019a). *Microorganism remediation strategies towards heavy metals*. *Chemical Engineering Journal*, 360, 1553-1563. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.226>
- Zhang, H. y Reynolds, M. (2019). *Cadmium exposure in living organisms: A short review*. *Science of The Total Environment*, 678, 761-767. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.395>

- Zhang, X., Barceló, D., Clougherty, R. J., Gao, B., Harms, H., Tefsen, B., Vithanage, M., Wang, H., Wang, Z., y Wells, M. (2022). *Potentially Toxic Element”–Something that Means Everything Means Nothing*. *Environmental Science & Technology*, 56(17), 11922-11925. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03056>
- Zhang, M., Sun, X., Hu, Y., Chen, G., y Xu, J. (2022). *The influence of anthropogenic activities on heavy metal pollution of estuary sediment from the coastal East China Sea in the past nearly 50 years*. *Marine Pollution Bulletin*, 181, 113872. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113872>

9. Anexo

Anexo 1. Valores del tamaño de grano (%) en el núcleo de sedimento LT01 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | | <i>Arenas</i> | | <i>Limos</i> | | <i>Arcillas</i> | |
|----------------|--------------------|--|---------------|------|--------------|------|-----------------|------|
| | <i>(cm)</i> | | <i>u</i> | | <i>u</i> | | <i>u</i> | |
| 0-1 | 0.5 | | 1.74 | 0.03 | 68.38 | 1.25 | 29.88 | 0.82 |
| 1-2 | 1.5 | | 2.06 | 0.03 | 67.48 | 1.23 | 30.46 | 0.84 |
| 3-4 | 3.5 | | 2.10 | 0.03 | 72.07 | 1.31 | 25.84 | 0.71 |
| 5-6 | 5.5 | | 8.82 | 0.13 | 68.11 | 1.24 | 23.07 | 0.63 |
| 7-8 | 7.5 | | 5.28 | 0.08 | 68.27 | 1.24 | 26.45 | 0.73 |
| 9-10 | 9.5 | | 5.90 | 0.09 | 68.13 | 1.24 | 25.97 | 0.71 |
| 11-12 | 11.5 | | 6.85 | 0.10 | 66.80 | 1.22 | 26.35 | 0.72 |
| 13-14 | 13.5 | | 8.94 | 0.13 | 65.81 | 1.20 | 25.24 | 0.69 |
| 15-16 | 15.5 | | 11.28 | 0.16 | 63.38 | 1.16 | 25.34 | 0.70 |
| 17-18 | 17.5 | | 4.19 | 0.06 | 68.27 | 1.24 | 27.54 | 0.76 |
| 19-20 | 19.5 | | 11.38 | 0.16 | 62.07 | 1.13 | 26.55 | 0.73 |
| 21-22 | 21.5 | | 4.49 | 0.06 | 65.42 | 1.19 | 30.09 | 0.83 |
| 23-24 | 23.5 | | 4.64 | 0.07 | 67.83 | 1.24 | 27.53 | 0.76 |
| 25-26 | 25.5 | | 21.70 | 0.31 | 54.15 | 0.99 | 24.15 | 0.66 |
| 27-28 | 27.5 | | 10.98 | 0.16 | 61.24 | 1.12 | 27.78 | 0.76 |

Anexo 2. Valores del tamaño de grano (%) en el núcleo de sedimento LT02 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | | <i>Arenas</i> | | <i>Limos</i> | | <i>Arcillas</i> | |
|----------------|--------------------|--|---------------|------|--------------|------|-----------------|------|
| | <i>(cm)</i> | | <i>u</i> | | <i>u</i> | | <i>u</i> | |
| 0-1 | 0.5 | | 1.19 | 0.02 | 71.39 | 1.30 | 27.42 | 0.75 |
| 1-2 | 1.5 | | 1.59 | 0.02 | 71.68 | 1.31 | 26.73 | 0.73 |
| 3-4 | 3.5 | | 3.56 | 0.05 | 69.09 | 1.26 | 27.35 | 0.75 |
| 5-6 | 5.5 | | 7.54 | 0.11 | 66.43 | 1.21 | 26.03 | 0.72 |
| 7-8 | 7.5 | | 2.49 | 0.04 | 69.71 | 1.27 | 27.81 | 0.76 |
| 9-10 | 9.5 | | 2.91 | 0.04 | 68.89 | 1.26 | 28.21 | 0.77 |
| 11-12 | 11.5 | | 4.79 | 0.07 | 67.94 | 1.24 | 27.26 | 0.75 |
| 13-14 | 13.5 | | 4.05 | 0.06 | 68.75 | 1.25 | 27.20 | 0.75 |
| 15-16 | 15.5 | | 4.42 | 0.06 | 67.56 | 1.23 | 28.02 | 0.77 |
| 17-18 | 17.5 | | 5.40 | 0.08 | 68.56 | 1.25 | 26.04 | 0.72 |
| 19-20 | 19.5 | | 8.32 | 0.12 | 64.01 | 1.17 | 27.68 | 0.76 |
| 21-22 | 21.5 | | 4.26 | 0.06 | 66.94 | 1.22 | 28.80 | 0.79 |
| 22-23 | 22.5 | | 5.50 | 0.08 | 68.09 | 1.24 | 26.41 | 0.73 |

Anexo 3. Valores del tamaño de grano (%) en el núcleo de sedimento LT03 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | <i>Arenas</i> | <i>u</i> | <i>Limos</i> | <i>u</i> | <i>Arcillas</i> | <i>u</i> |
|----------------|--------------------|---------------|----------|--------------|----------|-----------------|----------|
| 0-1 | 0.5 | 8.32 | 0.12 | 54.91 | 1.00 | 36.77 | 1.01 |
| 1-2 | 1.5 | 16.03 | 0.23 | 48.41 | 0.88 | 35.57 | 0.98 |
| 3-4 | 3.5 | 12.84 | 0.19 | 51.59 | 0.94 | 35.57 | 0.98 |
| 5-6 | 5.5 | 14.90 | 0.21 | 47.84 | 0.87 | 37.26 | 1.02 |
| 7-8 | 7.5 | 13.40 | 0.19 | 59.68 | 1.09 | 26.92 | 0.74 |
| 9-10 | 9.5 | 9.52 | 0.14 | 48.80 | 0.89 | 41.68 | 1.15 |
| 11-12 | 11.5 | 12.84 | 0.19 | 51.31 | 0.94 | 35.85 | 0.98 |
| 13-14 | 13.5 | 8.36 | 0.12 | 50.73 | 0.92 | 40.91 | 1.12 |
| 15-16 | 15.5 | 9.38 | 0.14 | 49.50 | 0.90 | 41.13 | 1.13 |
| 17-18 | 17.5 | 11.53 | 0.17 | 50.26 | 0.92 | 38.21 | 1.05 |
| 19-20 | 19.5 | 5.39 | 0.08 | 50.92 | 0.93 | 43.69 | 1.20 |
| 21-22 | 21.5 | 13.67 | 0.20 | 48.14 | 0.88 | 38.19 | 1.05 |
| 23-24 | 23.5 | 6.37 | 0.09 | 51.15 | 0.93 | 42.48 | 1.17 |
| 25-26 | 25.5 | 6.02 | 0.09 | 57.58 | 1.05 | 36.40 | 1.00 |
| 27-28 | 27.5 | 7.70 | 0.11 | 51.34 | 0.94 | 40.96 | 1.13 |
| 28-29 | 28.5 | 6.74 | 0.10 | 56.33 | 1.03 | 36.94 | 1.01 |

Anexo 4. Concentraciones de materia orgánica (MO; %) y carbonatos (%) en el núcleo de sedimento LT01 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | <i>MO</i> | <i>u</i> | <i>Carbonatos</i> | <i>u</i> |
|----------------|--------------------|-----------|----------|-------------------|----------|
| 0-1 | 0.5 | 16.14 | 0.13 | 10.87 | 0.10 |
| 1-2 | 1.5 | 17.30 | 0.13 | 9.12 | 0.09 |
| 3-4 | 3.5 | 14.99 | 0.12 | 10.78 | 0.10 |
| 5-6 | 5.5 | 14.94 | 0.12 | 10.84 | 0.10 |
| 7-8 | 7.5 | 14.93 | 0.12 | 11.40 | 0.11 |
| 9-10 | 9.5 | 14.73 | 0.11 | 11.45 | 0.11 |
| 11-12 | 11.5 | 14.56 | 0.11 | 11.18 | 0.11 |
| 13-14 | 13.5 | 14.47 | 0.11 | 11.47 | 0.11 |
| 15-16 | 15.5 | 13.99 | 0.11 | 12.42 | 0.12 |
| 17-18 | 17.5 | 14.73 | 0.11 | 10.93 | 0.10 |
| 19-20 | 19.5 | 13.95 | 0.11 | 11.86 | 0.11 |
| 21-22 | 21.5 | 13.76 | 0.11 | 11.85 | 0.11 |
| 23-24 | 23.5 | 13.86 | 0.11 | 11.16 | 0.11 |
| 25-26 | 25.5 | 12.83 | 0.10 | 12.85 | 0.12 |
| 26-27 | 26.5 | 12.10 | 0.09 | 13.51 | 0.13 |
| 27-28 | 27.5 | 11.23 | 0.09 | 14.25 | 0.14 |

Anexo 5. Concentraciones de materia orgánica (MO; %) y carbonatos (%) en el núcleo de sedimento LT02 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | <i>MO</i> | <i>u</i> | <i>Carbonatos</i> | <i>u</i> |
|----------------|--------------------|-----------|----------|-------------------|----------|
| 0-1 | 0.5 | 15.65 | 0.14 | 12.62 | 0.12 |
| 1-2 | 1.5 | 13.69 | 0.12 | 14.43 | 0.14 |
| 3-4 | 3.5 | 15.58 | 0.14 | 13.38 | 0.13 |
| 5-6 | 5.5 | 14.31 | 0.13 | 14.47 | 0.14 |
| 7-8 | 7.5 | 14.87 | 0.13 | 13.33 | 0.12 |
| 9-10 | 9.5 | 14.50 | 0.13 | 13.18 | 0.12 |
| 11-12 | 11.5 | 12.12 | 0.11 | 15.28 | 0.14 |
| 13-14 | 13.5 | 13.58 | 0.12 | 13.92 | 0.13 |
| 15-16 | 15.5 | 14.89 | 0.13 | 11.81 | 0.11 |
| 17-18 | 17.5 | 12.89 | 0.11 | 13.27 | 0.12 |
| 19-20 | 19.5 | 12.77 | 0.11 | 14.13 | 0.13 |
| 21-22 | 21.5 | 11.40 | 0.10 | 15.52 | 0.15 |
| 22-23 | 22.5 | 13.15 | 0.12 | 14.38 | 0.13 |

Anexo 6. Concentraciones de materia orgánica (MO; %) y carbonatos (%) en el núcleo de sedimento LT03 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | <i>MO</i> | <i>u</i> | <i>Carbonatos</i> | <i>u</i> |
|----------------|--------------------|-----------|----------|-------------------|----------|
| 0-1 | 0.5 | 16.68 | 0.28 | 12.53 | 0.17 |
| 1-2 | 1.5 | 16.49 | 0.27 | 11.23 | 0.15 |
| 3-4 | 3.5 | 17.54 | 0.29 | 10.18 | 0.14 |
| 5-6 | 5.5 | 16.74 | 0.28 | 10.55 | 0.15 |
| 7-8 | 7.5 | 17.13 | 0.28 | 9.06 | 0.12 |
| 9-10 | 9.5 | 15.58 | 0.26 | 9.96 | 0.14 |
| 11-12 | 11.5 | 15.20 | 0.25 | 9.91 | 0.14 |
| 13-14 | 13.5 | 15.32 | 0.25 | 9.08 | 0.13 |
| 15-16 | 15.5 | 15.42 | 0.26 | 8.01 | 0.11 |
| 17-18 | 17.5 | 15.17 | 0.25 | 6.80 | 0.09 |
| 19-20 | 19.5 | 13.34 | 0.22 | 7.61 | 0.10 |
| 21-22 | 21.5 | 14.17 | 0.23 | 8.54 | 0.12 |
| 23-24 | 23.5 | 13.08 | 0.22 | 7.43 | 0.10 |
| 25-26 | 25.5 | 15.20 | 0.25 | 5.49 | 0.08 |
| 27-28 | 27.5 | 14.45 | 0.24 | 4.14 | 0.06 |
| 28-29 | 28.5 | 14.01 | 0.23 | 5.30 | 0.07 |

Anexo 7. Actividades de ^{210}Pb , ^{226}Ra , valores de TAM y TAS del núcleo de sedimento LT01 de la Laguna de Términos, Campeche.

| Sección | Profundidad | ^{210}Pb (Bq kg^{-1}) | | ^{226}Ra (Bq kg^{-1}) | | Año | u | TAM | | TAS | |
|---------|-------------|---|-----|---|-----|--------|-----|--|------|--------------------------|------|
| | (cm) | | u | | u | | | ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) | u | (cm año^{-1}) | u |
| 0-1 | 0.5 | 63.6 | 7.9 | 21.2 | 1.9 | 2020.7 | 0.1 | 0.61 | 0.13 | 1.26 | 0.27 |
| 1-2 | 1.5 | 65.2 | 7.6 | 19.2 | 1.8 | 2020.0 | 0.2 | 0.55 | 0.11 | 1.40 | 0.28 |
| 2-3 | 2.5 | | | | | 2019.2 | 0.3 | 0.51 | 0.10 | 1.27 | 0.24 |
| 3-4 | 3.5 | 72.3 | 7.4 | 20.9 | 1.9 | 2018.2 | 0.4 | 0.47 | 0.08 | 0.85 | 0.16 |
| 4-5 | 4.5 | | | | | 2017.1 | 0.5 | 0.50 | 0.09 | 0.89 | 0.16 |
| 5-6 | 5.5 | 59.9 | 5.1 | 18.7 | 1.4 | 2015.9 | 0.6 | 0.54 | 0.09 | 0.77 | 0.13 |
| 6-7 | 6.5 | | | | | 2014.8 | 0.8 | 0.50 | 0.09 | 1.12 | 0.21 |
| 7-8 | 7.5 | 63.3 | 7.1 | 18.5 | 1.8 | 2013.7 | 0.9 | 0.46 | 0.09 | 0.83 | 0.17 |
| 8-9 | 8.5 | | | | | 2012.4 | 1.0 | 0.48 | 0.10 | 0.71 | 0.15 |
| 9-10 | 9.5 | 56.0 | 6.5 | 17.3 | 1.6 | 2011.1 | 1.2 | 0.50 | 0.11 | 0.87 | 0.19 |
| 10-11 | 10.5 | | | | | 2009.9 | 1.4 | 0.45 | 0.10 | 0.72 | 0.16 |
| 11-12 | 11.5 | 61.9 | 7.1 | 19.0 | 1.7 | 2008.2 | 1.6 | 0.41 | 0.09 | 0.54 | 0.12 |
| 12-13 | 12.5 | | | | | 2006.5 | 1.8 | 0.49 | 0.12 | 0.66 | 0.16 |
| 13-14 | 13.5 | 44.6 | 6.2 | 18.2 | 1.5 | 2005.2 | 2.0 | 0.61 | 0.17 | 0.88 | 0.25 |
| 14-15 | 14.5 | | | | | 2004.1 | 2.2 | 0.58 | 0.17 | 0.87 | 0.26 |
| 15-16 | 15.5 | 44.6 | 6.8 | 18.3 | 2.1 | 2002.6 | 2.4 | 0.56 | 0.17 | 0.57 | 0.18 |
| 16-17 | 16.5 | | | | | 2000.7 | 2.8 | 0.43 | 0.12 | 0.48 | 0.13 |
| 17-18 | 17.5 | 55.5 | 6.9 | 17.9 | 1.6 | 1998.6 | 3.1 | 0.34 | 0.09 | 0.45 | 0.12 |
| 18-19 | 18.5 | | | | | 1996.7 | 3.5 | 0.38 | 0.11 | 0.63 | 0.18 |
| 19-20 | 19.5 | 46.7 | 5.7 | 20.1 | 1.7 | 1994.7 | 3.9 | 0.43 | 0.13 | 0.44 | 0.13 |
| 20-21 | 20.5 | | | | | 1992.5 | 4.4 | 0.38 | 0.11 | 0.44 | 0.13 |
| 21-22 | 21.5 | 47.4 | 4.8 | 17.4 | 1.4 | 1989.7 | 5.0 | 0.33 | 0.10 | 0.31 | 0.09 |
| 22-23 | 22.5 | | | | | 1987.1 | 5.7 | 0.35 | 0.12 | 0.47 | 0.16 |
| 23-24 | 23.5 | 41.1 | 5.7 | 18.2 | 1.7 | 1984.7 | 6.3 | 0.37 | 0.14 | 0.39 | 0.15 |
| 24-25 | 24.5 | | | | | 1982.5 | 7.0 | 0.38 | 0.16 | 0.56 | 0.24 |
| 25-26 | 25.5 | 35.7 | 6.1 | 16.9 | 1.7 | 1980.2 | 7.7 | 0.39 | 0.18 | 0.35 | 0.16 |
| 26-27 | 26.5 | 35.4 | 7.0 | 22.2 | 1.8 | 1978.2 | 8.4 | 0.52 | 0.33 | 0.83 | 0.53 |
| 27-28 | 27.5 | 37.8 | 5.6 | 18.6 | 1.7 | 1976.4 | 9.0 | 0.34 | 0.16 | 0.44 | 0.21 |

Anexo 8. Actividades de ^{210}Pb , ^{226}Ra , valores de TAM y TAS del núcleo de sedimento LT02 de la Laguna de Términos, Campeche.

| Sección | Profundidad (cm) | ^{210}Pb (Bq kg^{-1}) | | ^{226}Ra (Bq kg^{-1}) | | Año | u | TAM ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) | | TAS (cm año^{-1}) | |
|---------|---------------------|---|-----|---|------|--------|------|---|------|---------------------------------|------|
| | | | u | | u | | | | u | | u |
| 0-1 | 0.5 | 63.1 | 5.9 | 22.6 | 8.6 | 2020.9 | 0.1 | 0.54 | 0.17 | 1.93 | 0.62 |
| 1-2 | 1.5 | 52.6 | 6.4 | 21.2 | 9.8 | 2020.3 | 0.2 | 0.69 | 0.29 | 1.76 | 0.74 |
| 2-3 | 2.5 | | | | | 2019.5 | 0.4 | 0.64 | 0.24 | 0.98 | 0.38 |
| 3-4 | 3.5 | 56.0 | 5.5 | 20.7 | 8.2 | 2018.3 | 0.7 | 0.58 | 0.20 | 0.68 | 0.24 |
| 4-5 | 4.5 | | | | | 2016.8 | 1.0 | 0.52 | 0.16 | 0.70 | 0.21 |
| 5-6 | 5.5 | 57.3 | 4.0 | 18.2 | 5.5 | 2015.4 | 1.3 | 0.48 | 0.13 | 0.75 | 0.21 |
| 6-7 | 6.5 | | | | | 2014.1 | 1.6 | 0.48 | 0.15 | 0.73 | 0.23 |
| 7-8 | 7.5 | 52.0 | 4.7 | 17.5 | 7.9 | 2012.6 | 1.9 | 0.49 | 0.18 | 0.62 | 0.22 |
| 8-9 | 8.5 | | | | | 2011.0 | 2.3 | 0.53 | 0.21 | 0.62 | 0.24 |
| 9-10 | 9.5 | 47.1 | 5.5 | 20.5 | 8.3 | 2009.5 | 2.7 | 0.58 | 0.26 | 0.76 | 0.35 |
| 10-11 | 10.5 | | | | | 2007.9 | 3.1 | 0.52 | 0.22 | 0.55 | 0.24 |
| 11-12 | 11.5 | 52.3 | 5.5 | 21.5 | 8.2 | 2006.0 | 3.7 | 0.45 | 0.19 | 0.49 | 0.21 |
| 12-13 | 12.5 | | | | | 2003.8 | 4.3 | 0.46 | 0.22 | 0.45 | 0.22 |
| 13-14 | 13.5 | 46.4 | 6.5 | 20.3 | 10.2 | 2001.5 | 5.1 | 0.46 | 0.26 | 0.40 | 0.22 |
| 14-15 | 14.5 | | | | | 1999.3 | 5.8 | 0.46 | 0.26 | 0.52 | 0.30 |
| 15-16 | 15.5 | 43.6 | 5.8 | 20.3 | 8.9 | 1997.3 | 6.5 | 0.45 | 0.26 | 0.50 | 0.29 |
| 16-17 | 16.5 | | | | | 1995.0 | 7.4 | 0.42 | 0.25 | 0.38 | 0.22 |
| 17-18 | 17.5 | 46.6 | 5.8 | 23.4 | 8.8 | 1992.7 | 8.3 | 0.40 | 0.24 | 0.53 | 0.33 |
| 18-19 | 18.5 | | | | | 1990.1 | 9.4 | 0.43 | 0.28 | 0.30 | 0.20 |
| 19-20 | 19.5 | 37.1 | 5.1 | 20.5 | 8.0 | 1987.4 | 10.7 | 0.47 | 0.35 | 0.44 | 0.33 |
| 20-21 | 20.5 | | | | | 1985.4 | 11.7 | 0.46 | 0.35 | 0.59 | 0.45 |
| 21-22 | 21.5 | 32.7 | 4.6 | 17.5 | 7.2 | 1983.5 | 12.7 | 0.45 | 0.36 | 0.49 | 0.38 |

Anexo 9. Actividades de ^{210}Pb , ^{226}Ra , valores de TAM y TAS del núcleo de sedimento LT03 de la Laguna de Términos, Campeche.

| Sección | Profundidad | | ^{210}Pb (Bq kg^{-1}) | | | ^{226}Ra (Bq kg^{-1}) | | | TAM | | TAS | |
|---------|-------------|--|---|------|------|---|--------|------|--|------|--------------------------|------|
| | (cm) | | | u | | u | Año | u | ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) | u | (cm año^{-1}) | u |
| 0-1 | 0.5 | | 73.5 | 9.4 | 20.1 | 1.6 | 2020.4 | 0.1 | 0.18 | 0.04 | 0.68 | 0.14 |
| 1-2 | 1.5 | | 81.3 | 8.2 | 18.5 | 1.3 | 2018.0 | 0.4 | 0.14 | 0.02 | 0.31 | 0.05 |
| 2-3 | 2.5 | | | | | | 2014.8 | 0.8 | 0.13 | 0.02 | 0.31 | 0.06 |
| 3-4 | 3.5 | | 75.5 | 8.4 | 18.9 | 1.5 | 2011.2 | 1.3 | 0.13 | 0.02 | 0.25 | 0.05 |
| 4-5 | 4.5 | | | | | | 2006.3 | 1.9 | 0.12 | 0.03 | 0.17 | 0.04 |
| 5-6 | 5.5 | | 61.8 | 11.6 | 19.9 | 1.5 | 2000.8 | 2.7 | 0.12 | 0.04 | 0.20 | 0.06 |
| 6-7 | 6.5 | | | | | | 1993.2 | 3.8 | 0.11 | 0.03 | 0.10 | 0.03 |
| 7-8 | 7.5 | | 50.5 | 8.8 | 19.0 | 1.6 | 1984.8 | 5.5 | 0.10 | 0.04 | 0.15 | 0.05 |
| 8-9 | 8.5 | | | | | | 1977.8 | 6.9 | 0.13 | 0.06 | 0.14 | 0.07 |
| 9-10 | 9.5 | | 30.5 | 9.9 | 19.5 | 1.4 | 1972.4 | 8.1 | 0.19 | 0.18 | 0.28 | 0.26 |
| 10-11 | 10.5 | | | | | | 1968.9 | 8.9 | 0.19 | 0.18 | 0.29 | 0.27 |
| 11-12 | 11.5 | | 28.2 | 8.2 | 19.4 | 1.5 | 1964.9 | 9.7 | 0.19 | 0.18 | 0.23 | 0.22 |
| 12-13 | 12.5 | | | | | | 1959.1 | 11.2 | 0.09 | 0.07 | 0.14 | 0.10 |
| 13-14 | 13.5 | | 43.9 | 11.8 | 20.5 | 1.5 | 1940.8 | 17.2 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.02 |
| 14-15 | 14.5 | | | | | | 1913.9 | 33.4 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| 15-16 | 15.5 | | 26.4 | 7.9 | 21.7 | 1.4 | 1893.6 | 54.2 | 0.04 | 0.08 | 0.06 | 0.13 |
| 16-17 | 16.5 | | | | | | 1875.9 | 84.1 | 0.03 | 0.09 | 0.05 | 0.16 |
| 17-18 | 17.5 | | 23.4 | 8.6 | 20.8 | 1.5 | | | | | | |
| 18-19 | 18.5 | | | | | | | | | | | |
| 19-20 | 19.5 | | 19.5 | 8.0 | 21.3 | 1.5 | | | | | | |
| 20-21 | 20.5 | | | | | | | | | | | |
| 21-22 | 21.5 | | 22.7 | 10.2 | 21.7 | 1.4 | | | | | | |
| 22-23 | 22.5 | | | | | | | | | | | |
| 23-24 | 23.5 | | 12.3 | 5.7 | 21.8 | 1.5 | | | | | | |
| 24-25 | 24.5 | | | | | | | | | | | |
| 25-26 | 25.5 | | 29.8 | 8.3 | 19.9 | 1.2 | | | | | | |
| 26-27 | 26.5 | | | | | | | | | | | |
| 27-28 | 27.5 | | 25.5 | 7.0 | 25.0 | 1.6 | | | | | | |

Anexo 10. Concentraciones de elementos traza (%) y elementos potencialmente tóxicos ($\mu\text{g g}^{-1}$) del núcleo de sedimento LT01 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | <i>SiO₂</i> | <i>u</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>u</i> | <i>TiO₂</i> | <i>u</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>u</i> | <i>MnO</i> | <i>u</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> | <i>As</i> |
|----------------|--------------------|------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0-1 | 0.5 | 32.67 | 0.16 | 9.29 | 0.02 | 0.42 | 5.62E-05 | 4.18 | 0.002 | 0.08 | 7.45E-07 | 0.14 | 54.25 | 7.90 |
| 1-2 | 1.5 | 34.36 | 0.17 | 9.77 | 0.02 | 0.46 | 6.13E-05 | 4.41 | 0.002 | 0.07 | 6.58E-07 | 0.07 | 62.38 | 8.25 |
| 3-4 | 3.5 | 35.32 | 0.17 | 9.35 | 0.02 | 0.44 | 5.87E-05 | 4.05 | 0.002 | 0.06 | 5.79E-07 | 0.13 | 51.28 | 2.84 |
| 5-6 | 5.5 | 33.80 | 0.17 | 8.83 | 0.01 | 0.44 | 5.83E-05 | 3.87 | 0.002 | 0.06 | 5.44E-07 | 0.14 | 53.86 | 5.57 |
| 7-8 | 7.5 | 32.32 | 0.16 | 8.62 | 0.01 | 0.40 | 5.31E-05 | 3.78 | 0.002 | 0.06 | 5.26E-07 | 0.08 | 54.61 | 2.84 |
| 9-10 | 9.5 | 33.91 | 0.17 | 9.06 | 0.02 | 0.43 | 5.72E-05 | 4.06 | 0.002 | 0.06 | 5.87E-07 | 0.14 | 51.05 | 6.20 |
| 11-12 | 11.5 | 33.08 | 0.16 | 8.87 | 0.01 | 0.44 | 5.85E-05 | 3.94 | 0.002 | 0.06 | 5.52E-07 | 0.09 | 56.42 | 5.73 |
| 13-14 | 13.5 | 30.82 | 0.15 | 8.39 | 0.01 | 0.38 | 5.09E-05 | 3.80 | 0.002 | 0.06 | 5.26E-07 | 0.07 | 55.15 | 6.12 |
| 15-16 | 15.5 | 31.54 | 0.16 | 8.52 | 0.01 | 0.40 | 5.36E-05 | 3.81 | 0.002 | 0.07 | 6.14E-07 | 0.13 | 47.60 | 3.08 |
| 17-18 | 17.5 | 33.41 | 0.16 | 9.22 | 0.02 | 0.41 | 5.55E-05 | 4.15 | 0.002 | 0.07 | 6.31E-07 | 0.09 | 56.09 | 5.49 |
| 19-20 | 19.5 | 32.97 | 0.16 | 8.71 | 0.01 | 0.42 | 5.56E-05 | 3.94 | 0.002 | 0.08 | 7.45E-07 | 0.09 | 53.60 | 6.76 |
| 21-22 | 21.5 | 33.70 | 0.17 | 9.56 | 0.02 | 0.45 | 5.99E-05 | 4.26 | 0.002 | 0.07 | 7.01E-07 | 0.13 | 51.86 | 7.74 |
| 23-24 | 23.5 | 35.34 | 0.17 | 10.12 | 0.02 | 0.47 | 6.25E-05 | 4.53 | 0.002 | 0.07 | 6.93E-07 | 0.09 | 57.81 | 5.25 |
| 25-26 | 25.5 | 35.41 | 0.17 | 9.37 | 0.02 | 0.48 | 6.45E-05 | 4.08 | 0.002 | 0.07 | 6.49E-07 | 0.10 | 53.32 | 8.02 |
| 26-27 | 26.5 | 34.04 | 0.17 | 8.93 | 0.01 | 0.41 | 5.52E-05 | 3.86 | 0.002 | 0.06 | 5.87E-07 | 0.08 | 58.79 | 6.69 |
| 27-28 | 27.5 | 37.98 | 0.19 | 10.29 | 0.02 | 0.47 | 6.30E-05 | 4.59 | 0.002 | 0.07 | 7.01E-07 | 0.14 | 57.58 | 4.56 |

Anexo 11. Concentraciones de elementos traza (%) y elementos potencialmente tóxicos ($\mu\text{g g}^{-1}$) del núcleo de sedimento LT02 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | <i>SiO₂</i> | <i>u</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>u</i> | <i>TiO₂</i> | <i>u</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>u</i> | <i>MnO</i> | <i>u</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> | <i>As</i> |
|----------------|--------------------|------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0-1 | 0.5 | 31.80 | 0.14 | 8.53 | 0.01 | 0.40 | 6.99E-05 | 3.77 | 0.003 | 0.07 | 2.25E-06 | 0.14 | 48.91 | 1.56 |
| 1-2 | 1.5 | 32.10 | 0.14 | 8.47 | 0.01 | 0.41 | 7.27E-05 | 3.65 | 0.003 | 0.07 | 2.28E-06 | 0.09 | 51.84 | 1.07 |
| 3-4 | 3.5 | 30.41 | 0.13 | 8.14 | 0.01 | 0.38 | 6.74E-05 | 3.57 | 0.003 | 0.06 | 1.83E-06 | 0.12 | 44.57 | 1.45 |
| 5-6 | 5.5 | 30.13 | 0.13 | 7.98 | 0.01 | 0.37 | 6.48E-05 | 3.52 | 0.003 | 0.06 | 1.77E-06 | 0.08 | 50.52 | 6.10 |
| 7-8 | 7.5 | 29.91 | 0.13 | 7.95 | 0.01 | 0.32 | 5.59E-05 | 3.52 | 0.003 | 0.06 | 1.86E-06 | 0.13 | 48.15 | 5.20 |
| 9-10 | 9.5 | 28.56 | 0.13 | 7.76 | 0.01 | 0.37 | 6.55E-05 | 3.51 | 0.003 | 0.07 | 2.07E-06 | 0.08 | 51.02 | 1.93 |
| 11-12 | 11.5 | 29.90 | 0.13 | 8.02 | 0.01 | 0.40 | 7.08E-05 | 3.70 | 0.003 | 0.06 | 1.77E-06 | 0.13 | 50.61 | 2.92 |
| 13-14 | 13.5 | 29.30 | 0.13 | 7.96 | 0.01 | 0.37 | 6.55E-05 | 3.51 | 0.003 | 0.06 | 1.77E-06 | 0.09 | 56.35 | 2.13 |
| 15-16 | 15.5 | 31.52 | 0.14 | 8.56 | 0.01 | 0.40 | 7.03E-05 | 3.79 | 0.003 | 0.06 | 1.95E-06 | 0.10 | 55.87 | 6.16 |
| 17-18 | 17.5 | 31.22 | 0.14 | 8.48 | 0.01 | 0.42 | 7.47E-05 | 3.73 | 0.003 | 0.06 | 2.01E-06 | 0.14 | 51.42 | 7.06 |
| 19-20 | 19.5 | 30.87 | 0.14 | 8.22 | 0.01 | 0.39 | 6.85E-05 | 3.62 | 0.003 | 0.05 | 1.75E-06 | 0.10 | 52.35 | 3.52 |
| 21-22 | 21.5 | 35.15 | 0.16 | 9.58 | 0.01 | 0.44 | 7.75E-05 | 4.14 | 0.004 | 0.06 | 2.01E-06 | 0.09 | 53.17 | 3.56 |
| 22-23 | 22.5 | 30.33 | 0.13 | 8.19 | 0.01 | 0.37 | 6.53E-05 | 3.63 | 0.003 | 0.05 | 1.63E-06 | 0.15 | 53.88 | 3.79 |

Anexo 12. Concentraciones de elementos traza (%) y elementos potencialmente tóxicos ($\mu\text{g g}^{-1}$) del núcleo de sedimento LT03 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Sección</i> | <i>Profundidad</i> | <i>SiO₂</i> | <i>u</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>u</i> | <i>TiO₂</i> | <i>u</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>u</i> | <i>MnO</i> | <i>u</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> | <i>As</i> |
|----------------|--------------------|------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------------------|----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0-1 | 0.5 | 35.06 | 0.12 | 8.70 | 0.01 | 0.40 | 7.21E-05 | 3.49 | 0.002 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.18 | 43.92 | 0.94 |
| 1-2 | 1.5 | 34.56 | 0.12 | 8.62 | 0.01 | 0.40 | 7.21E-05 | 3.47 | 0.002 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.14 | 48.95 | 5.23 |
| 3-4 | 3.5 | 33.36 | 0.12 | 8.73 | 0.01 | 0.36 | 6.48E-05 | 3.52 | 0.002 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.26 | 57.06 | 2.04 |
| 5-6 | 5.5 | 32.88 | 0.12 | 8.34 | 0.01 | 0.38 | 6.85E-05 | 3.38 | 0.002 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.12 | 44.98 | 1.26 |
| 7-8 | 7.5 | 33.58 | 0.12 | 8.92 | 0.01 | 0.40 | 7.21E-05 | 3.60 | 0.002 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.18 | 48.43 | 1.29 |
| 9-10 | 9.5 | 35.41 | 0.13 | 9.41 | 0.01 | 0.41 | 7.39E-05 | 3.80 | 0.002 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.20 | 49.28 | 1.68 |
| 11-12 | 11.5 | 35.18 | 0.13 | 9.37 | 0.01 | 0.42 | 7.57E-05 | 3.81 | 0.002 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.22 | 47.93 | 3.35 |
| 13-14 | 13.5 | 34.73 | 0.12 | 9.22 | 0.01 | 0.41 | 7.39E-05 | 3.68 | 0.002 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.22 | 47.76 | 1.34 |
| 15-16 | 15.5 | 37.24 | 0.13 | 9.85 | 0.01 | 0.45 | 8.11E-05 | 3.95 | 0.002 | 0.04 | 6.70E-07 | 0.24 | 40.03 | 5.06 |
| 17-18 | 17.5 | 41.11 | 0.15 | 10.98 | 0.01 | 0.49 | 8.83E-05 | 4.35 | 0.003 | 0.05 | 8.37E-07 | 0.19 | 59.51 | 9.04 |
| 19-20 | 19.5 | 40.20 | 0.14 | 10.88 | 0.01 | 0.49 | 8.83E-05 | 4.23 | 0.002 | 0.06 | 1.00E-06 | 0.21 | 60.03 | 9.11 |
| 21-22 | 21.5 | 39.23 | 0.14 | 10.56 | 0.01 | 0.49 | 8.77E-05 | 4.20 | 0.002 | 0.05 | 8.54E-07 | 0.20 | 55.46 | 5.63 |
| 23-24 | 23.5 | 41.67 | 0.15 | 11.32 | 0.01 | 0.50 | 9.01E-05 | 4.55 | 0.003 | 0.06 | 1.00E-06 | 0.20 | 59.34 | 7.46 |
| 25-26 | 25.5 | 41.51 | 0.15 | 11.30 | 0.01 | 0.52 | 9.37E-05 | 4.57 | 0.003 | 0.06 | 1.00E-06 | 0.23 | 63.69 | 9.73 |
| 27-28 | 27.5 | 46.25 | 0.16 | 11.95 | 0.01 | 0.58 | 1.04E-04 | 4.65 | 0.003 | 0.05 | 9.55E-07 | 0.23 | 58.67 | 7.94 |
| 28-29 | 28.5 | 52.29 | 0.19 | 13.38 | 0.01 | 0.64 | 1.15E-04 | 5.25 | 0.003 | 0.07 | 1.17E-06 | 0.23 | 65.96 | 10.68 |

Anexo 13. Datos del análisis de ANOVA y la prueba de Tukey, en el tamaño de grano entre los núcleos LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>Arenas</i> | | | |
|-------------------------|----------------|----------------------|-------------|
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey-p adj |
| SC | 248.33 | LT01-LT02 | 0.103 |
| F | 8.45 | LT01-LT03 | 0.112 |
| Pr(>F) | 0.00084 | LT02-LT03 | 0.0005 |
| H ₀ (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| H _n (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |
| <i>Limos</i> | | | |
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey-p adj |
| SC | 2409.28 | LT01-LT02 | 0.14 |
| F | 101.3 | LT01-LT03 | 0.00 |
| Pr(>F) | 2.00E-16 | LT02-LT03 | 0.00 |
| H ₀ (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| H _n (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |
| <i>Arcillas</i> | | | |
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey-p adj |
| SC | 1231.26 | LT01-LT02 | 0.89 |
| F | 81.49 | LT01-LT03 | 0.00 |
| Pr(>F) | 5.20E-15 | LT02-LT03 | 0.00 |
| H ₀ (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| H _n (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |

GL= grados de libertad, SC=suma de cuadrados, H₀ = Hipótesis nula, H_n = Hipótesis alternativa

Anexo 14. Datos del análisis de ANOVA y la prueba de Tukey, en la MO y carbonatos entre los núcleos LT01, LT02 y LT03 de LT.

| <i>MO</i> | | | |
|-------------------------|----------------|----------------------|-------------|
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey-p adj |
| SC | 18.54 | LT01-LT02 | 0.610 |
| F | 4.98 | LT01-LT03 | 0.083 |
| Pr(>F) | 0.012 | LT02-LT03 | 0.011 |
| H ₀ (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| H _n (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |
| <i>Carbonatos</i> | | | |
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey-p adj |
| SC | 209.98 | LT01-LT02 | 0.140 |
| F | 38.8 | LT01-LT03 | 0.000 |
| Pr(>F) | 2.00E-16 | LT02-LT03 | 0.000 |
| H ₀ (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| H _n (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |

gl= grados de libertad, SC=suma de cuadrados, H₀ = Hipótesis nula, H_n = Hipótesis alterna.

Anexo 15. Datos del análisis de ANOVA y la prueba de Tukey, en los elementos mayores entre los núcleos LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche.

| <i>SiO₂</i> | | | |
|------------------------------------|----------------|----------------------|-------------|
| GL | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey p adj |
| SC | 422.11 | LT01-LT02 | 0.0711 |
| F | 17.69 | LT01-LT03 | 0.0014 |
| Pr(>F) | 5.68E-06 | LT02-LT03 | 2.60E-06 |
| Ho (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| Hn (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |
| <i>Al₂O₃</i> | | | |
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey p adj |
| SC | 23.36 | LT01-LT02 | 0.0440 |
| F | 12.85 | LT01-LT03 | 0.0260 |
| Pr(>F) | 4.44E-05 | LT02-LT03 | 2.60E-05 |
| Ho (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| Hn (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |
| <i>TiO₂</i> | | | |
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey p adj |
| SC | 0.037 | LT01-LT02 | 0.064 |
| F | 7.1 | LT01-LT03 | 0.294 |
| Pr(>F) | 0.0022 | LT02-LT03 | 0.002 |
| Ho (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| Hn (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |
| <i>Fe₂O₃</i> | | | |
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey p adj |
| SC | 1.427 | LT01-LT02 | 0.0120 |
| F | 5.28 | LT01-LT03 | 0.9200 |
| Pr(>F) | 8.98E-03 | LT02-LT03 | 0.0290 |
| Ho (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| Hn (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |
| <i>MnO</i> | | | |
| gl | 2 | <i>Combinaciones</i> | Tukey p adj |
| SC | 0.0024 | LT01-LT02 | 0.0550 |
| F | 25.5 | LT01-LT03 | 0.0000 |
| Pr(>F) | 5.61E-08 | LT02-LT03 | 0.0003 |
| Ho (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 | se rechaza | |
| Hn (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 | se acepta | |

gl= grados de libertad, SC=suma de cuadrados, H_o = Hipótesis nula, H_n = Hipótesis alterna.

Anexo 16. Datos del análisis de ANOVA y la prueba de Tukey de los EPT, entre los núcleos LT01, LT02 y LT03 de la Laguna de Términos, Campeche.

| As | | | |
|-------------|---------------------------|---------------|-------------|
| gl | 2 | Combinaciones | Tukey p adj |
| SC | 36.99 | LT01-LT02 | 0.06 |
| F | 2.79 | LT01-LT03 | 0.72 |
| Pr(>F) | 0.073 | LT02-LT03 | 0.26 |
| Ho (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 se acepta | | |
| Hn (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 se rechaza | | |
| Cd | | | |
| gl | 2 | Combinaciones | Tukey p adj |
| SC | 0.094 | LT01-LT02 | 0.95 |
| F | 52.98 | LT01-LT03 | 0.00 |
| Pr(>F) | 3.28E-12 | LT02-LT03 | 0.00 |
| Ho (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 se rechaza | | |
| Hn (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 se acepta | | |
| Zn | | | |
| gl | 2 | Combinaciones | Tukey p adj |
| SC | 77.87 | LT01-LT02 | 0.23 |
| F | 1.27 | LT01-LT03 | 0.69 |
| Pr(>F) | 0.265 | LT02-LT03 | 0.66 |
| Ho (p>0.05) | LT01=LT02=LT03 se acepta | | |
| Hn (p<0.05) | LT01≠LT02≠LT03 se rechaza | | |

gl= grados de libertad, SC=suma de cuadrados, Ho = Hipótesis nula, Hn = Hipótesis alterna.

Anexo 17. Correlación de Pearson para el núcleo de sedimento LT01 de la Laguna de Términos, Campeche.

| | <i>Profundidad</i> | <i>Arenas</i> | <i>Limos</i> | <i>Arcillas</i> | <i>MO</i> | <i>Carbonatos</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> | <i>As</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MnO</i> |
|------------------------------------|--------------------|---------------|--------------|-----------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------|
| <i>Profundidad</i> | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Arenas</i> | 0.611* | 1 | | | | | | | | | | | | |
| <i>Limos</i> | -0.689* | -0.917* | 1 | | | | | | | | | | | |
| <i>Arcillas</i> | -0.107 | -0.600* | 0.230 | 1 | | | | | | | | | | |
| <i>MO</i> | -0.893* | -0.682* | 0.652* | 0.356 | 1 | | | | | | | | | |
| <i>Carbonatos</i> | 0.787* | 0.716* | -0.709* | -0.323 | -0.953* | 1 | | | | | | | | |
| <i>Cd</i> | -0.177 | -0.170 | 0.266 | -0.117 | -0.074 | 0.155 | 1 | | | | | | | |
| <i>Zn</i> | 0.075 | -0.225 | 0.052 | 0.444 | 0.076 | -0.171 | -0.600* | 1 | | | | | | |
| <i>As</i> | 0.075 | 0.165 | -0.421 | 0.440 | 0.142 | -0.134 | -0.149 | 0.366 | 1 | | | | | |
| <i>SiO₂</i> | 0.373 | 0.031 | -0.070 | 0.064 | -0.444 | 0.331 | 0.277 | 0.321 | 0.023 | 1 | | | | |
| <i>Al₂O₃</i> | 0.262 | -0.325 | 0.130 | 0.532* | -0.178 | 0.065 | 0.217 | 0.438 | 0.202 | 0.847* | 1 | | | |
| <i>TiO₂</i> | 0.285 | 0.136 | -0.223 | 0.116 | -0.220 | 0.094 | 0.225 | 0.282 | 0.307 | 0.849* | 0.833* | 1 | | |
| <i>Fe₂O₃</i> | 0.227 | -0.397 | 0.176 | 0.614* | -0.092 | -0.011 | 0.183 | 0.448 | 0.259 | 0.737* | 0.971* | 0.754* | 1 | |
| <i>MnO</i> | 0.269 | -0.067 | -0.208 | 0.580* | -0.107 | 0.124 | 0.219 | 0.097 | 0.459 | 0.350 | 0.577* | 0.436 | 0.655* | 1 |

*Valores de r (0.497) significativos con un nivel significancia $\alpha=0.05$

Anexo 18. Correlación de Pearson para el núcleo de sedimento LT02 de la Laguna de Términos, Campeche.

| | <i>Profundidad</i> | <i>Arenas</i> | <i>Limos</i> | <i>Arcillas</i> | <i>MO</i> | <i>Carbonatos</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> | <i>As</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MnO</i> |
|--------------------------------|--------------------|---------------|--------------|-----------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------|
| Profundidad | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Arenas | 0.578* | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Limos | -0.662* | -0.918* | 1 | | | | | | | | | | | |
| Arcillas | 0.147 | -0.291 | -0.112 | 1 | | | | | | | | | | |
| MO | -0.701* | -0.441 | 0.474 | -0.038 | 1 | | | | | | | | | |
| Carbonatos | 0.262 | 0.308 | -0.287 | -0.079 | -0.776* | 1 | | | | | | | | |
| Cd | 0.045 | -0.181 | 0.308 | -0.289 | 0.095 | -0.160 | 1 | | | | | | | |
| Zn | 0.620* | 0.262 | -0.296 | 0.056 | -0.457 | 0.065 | -0.342 | 1 | | | | | | |
| As | 0.420 | 0.526 | -0.434 | -0.270 | -0.139 | -0.178 | 0.105 | 0.224 | 1 | | | | | |
| SiO ₂ | 0.220 | -0.092 | -0.029 | 0.299 | -0.382 | 0.257 | -0.076 | 0.132 | 0.052 | 1 | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 0.328 | -0.091 | -0.055 | 0.359 | -0.416 | 0.213 | -0.070 | 0.219 | 0.081 | 0.981* | 1 | | | |
| TiO ₂ | 0.251 | 0.033 | -0.061 | 0.064 | -0.514 | 0.249 | -0.120 | 0.246 | -0.061 | 0.710* | 0.742* | 1 | | |
| Fe ₂ O ₃ | 0.389 | -0.075 | -0.096 | 0.421 | -0.491 | 0.236 | 0.021 | 0.233 | 0.104 | 0.912* | 0.956* | 0.766* | 1 | |
| MnO | -0.506 | -0.707* | 0.653* | 0.196 | 0.246 | -0.289 | -0.115 | -0.135 | -0.302 | 0.407 | 0.378 | 0.420 | 0.328 | 1 |

*Valores de r (0.553) significativos con un nivel significancia $\alpha=0.05$

Anexo 19. Correlación de Pearson para el núcleo de sedimento LT03 de la Laguna de Términos, Campeche.

| | <i>Profundidad</i> | <i>Arenas</i> | <i>Limos</i> | <i>Arcillas</i> | <i>MO</i> | <i>Carbonatos</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> | <i>As</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MnO</i> |
|--------------------------------|--------------------|---------------|--------------|-----------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------|
| Profundidad | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Arenas | -0.635* | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Limos | 0.161 | -0.341 | 1 | | | | | | | | | | | |
| Arcillas | 0.404 | -0.557* | -0.590* | 1 | | | | | | | | | | |
| MO | -0.835* | 0.634* | 0.127 | -0.657* | 1 | | | | | | | | | |
| Carbonatos | -0.933* | 0.570* | -0.258 | -0.262 | 0.642* | 1 | | | | | | | | |
| Cd | 0.466 | -0.528* | 0.259 | 0.225 | -0.267 | -0.490 | 1 | | | | | | | |
| Zn | 0.714* | -0.464 | 0.291 | 0.142 | -0.554* | -0.724* | 0.389 | 1 | | | | | | |
| As | 0.820* | -0.514* | 0.137 | 0.320 | -0.723* | -0.817* | 0.301 | 0.801* | 1 | | | | | |
| SiO ₂ | 0.868* | -0.604* | 0.253 | 0.295 | -0.709* | -0.844* | 0.362 | 0.756* | 0.854* | 1 | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 0.936* | -0.649* | 0.250 | 0.337 | -0.785* | -0.896* | 0.434 | 0.799* | 0.887* | 0.979* | 1 | | | |
| TiO ₂ | 0.914* | -0.604* | 0.258 | 0.292 | -0.748* | -0.879* | 0.347 | 0.731* | 0.868* | 0.988* | 0.983* | 1 | | |
| Fe ₂ O ₃ | 0.939* | -0.643* | 0.268 | 0.316 | -0.777* | -0.893* | 0.439 | 0.799* | 0.884* | 0.970* | 0.997* | 0.975* | 1 | |
| MnO | 0.645* | -0.576* | 0.415 | 0.128 | -0.581* | -0.588* | 0.186 | 0.837* | 0.673* | 0.780* | 0.768* | 0.753* | 0.766* | 1 |

*Valores de r (0.497) significativos con un nivel significancia $\alpha=0.05$

Anexo 20. Flujos históricos de los elementos potencialmente tóxicos (Cd, Zn y As) del núcleo de sedimento LT01, de la Laguna de Términos, Campeche.

| Sección | Profundidad (cm) | Año A.D. | <i>u</i> | TAM ($g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) | <i>u</i> | Cd ($\mu g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) | Zn ($\mu g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) | As ($\mu g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) |
|---------|------------------|----------|----------|--------------------------------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0-1 | 0.5 | 2020.7 | 0.09 | 0.61 | 0.13 | 0.08 | 33.07 | 4.82 |
| 1-2 | 1.5 | 2020.0 | 0.20 | 0.55 | 0.11 | 0.04 | 34.28 | 4.53 |
| 3-4 | 3.5 | 2018.2 | 0.38 | 0.47 | 0.08 | 0.06 | 23.85 | 1.32 |
| 5-6 | 5.5 | 2015.9 | 0.63 | 0.54 | 0.09 | 0.07 | 29.08 | 3.01 |
| 7-8 | 7.5 | 2013.7 | 0.88 | 0.46 | 0.09 | 0.04 | 25.36 | 1.32 |
| 9-10 | 9.5 | 2011.1 | 1.20 | 0.50 | 0.11 | 0.07 | 25.28 | 3.07 |
| 11-12 | 11.5 | 2008.2 | 1.59 | 0.41 | 0.09 | 0.04 | 23.01 | 2.34 |
| 13-14 | 13.5 | 2005.2 | 2.03 | 0.61 | 0.17 | 0.04 | 33.38 | 3.70 |
| 15-16 | 15.5 | 2002.6 | 2.43 | 0.56 | 0.17 | 0.07 | 26.59 | 1.72 |
| 17-18 | 17.5 | 1998.6 | 3.14 | 0.34 | 0.09 | 0.03 | 19.30 | 1.89 |
| 19-20 | 19.5 | 1994.7 | 3.89 | 0.43 | 0.13 | 0.04 | 23.23 | 2.93 |
| 21-22 | 21.5 | 1989.7 | 5.02 | 0.33 | 0.10 | 0.04 | 17.01 | 2.54 |
| 23-24 | 23.5 | 1984.7 | 6.33 | 0.37 | 0.14 | 0.03 | 21.31 | 1.94 |
| 25-26 | 25.5 | 1980.2 | 7.68 | 0.39 | 0.18 | 0.04 | 20.81 | 3.13 |
| 26-27 | 26.5 | 1978.2 | 8.36 | 0.52 | 0.33 | 0.04 | 30.38 | 3.46 |
| 27-28 | 27.5 | 1976.4 | 8.97 | 0.34 | 0.16 | 0.05 | 19.41 | 1.54 |

Anexo 21. Flujos históricos de los elementos potencialmente tóxicos (Cd, Zn y As) del núcleo de sedimento LT02, de la Laguna de Términos, Campeche.

| Sección | Profundidad (cm) | Año A.D. | <i>u</i> | TAM ($g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) | <i>u</i> | Cd ($\mu g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) | Zn ($\mu g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) | As ($\mu g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) |
|---------|------------------|----------|----------|--------------------------------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0-1 | 0.5 | 2020.9 | 0.08 | 0.54 | 0.17 | 0.08 | 26.62 | 0.85 |
| 1-2 | 1.5 | 2020.3 | 0.23 | 0.69 | 0.29 | 0.06 | 35.71 | 0.74 |
| 3-4 | 3.5 | 2018.3 | 0.71 | 0.58 | 0.20 | 0.07 | 25.67 | 0.83 |
| 5-6 | 5.5 | 2015.4 | 1.32 | 0.48 | 0.13 | 0.04 | 24.04 | 2.90 |
| 7-8 | 7.5 | 2012.6 | 1.94 | 0.49 | 0.18 | 0.06 | 23.74 | 2.56 |
| 9-10 | 9.5 | 2009.5 | 2.72 | 0.58 | 0.26 | 0.05 | 29.66 | 1.12 |
| 11-12 | 11.5 | 2006.0 | 3.68 | 0.45 | 0.19 | 0.06 | 22.76 | 1.31 |
| 13-14 | 13.5 | 2001.5 | 5.06 | 0.46 | 0.26 | 0.04 | 26.03 | 0.98 |
| 15-16 | 15.5 | 1997.3 | 6.52 | 0.45 | 0.26 | 0.04 | 25.37 | 2.80 |
| 17-18 | 17.5 | 1992.7 | 8.31 | 0.40 | 0.24 | 0.05 | 20.33 | 2.79 |
| 19-20 | 19.5 | 1987.4 | 10.72 | 0.47 | 0.35 | 0.05 | 24.35 | 1.64 |
| 21-22 | 21.5 | 1983.5 | 12.73 | 0.45 | 0.36 | 0.04 | 24.10 | 1.61 |

Anexo 22. Flujos históricos de los elementos potencialmente tóxicos (Cd, Zn y As) del núcleo de sedimento LT03, de la Laguna de Términos, Campeche.

| Sección | Profundidad (cm) | Año A.D. | u | TAM (g cm ⁻² año ⁻¹) | u | Cd (μg cm ⁻² año ⁻¹) | Zn (μg cm ⁻² año ⁻¹) | As (μg cm ⁻² año ⁻¹) |
|---------|------------------|----------|-------|--|------|--|--|--|
| 0-1 | 0.5 | 2020.4 | 0.15 | 0.18 | 0.04 | 0.03 | 7.79 | 0.17 |
| 1-2 | 1.5 | 2018.0 | 0.44 | 0.14 | 0.02 | 0.02 | 6.87 | 0.73 |
| 3-4 | 3.5 | 2011.2 | 1.25 | 0.13 | 0.02 | 0.03 | 7.18 | 0.26 |
| 5-6 | 5.5 | 2000.8 | 2.69 | 0.12 | 0.04 | 0.02 | 5.54 | 0.16 |
| 7-8 | 7.5 | 1984.8 | 5.47 | 0.10 | 0.04 | 0.02 | 4.82 | 0.13 |
| 9-10 | 9.5 | 1972.4 | 8.06 | 0.19 | 0.18 | 0.04 | 9.54 | 0.33 |
| 11-12 | 11.5 | 1964.9 | 9.70 | 0.19 | 0.18 | 0.04 | 9.20 | 0.64 |
| 13-14 | 13.5 | 1940.8 | 17.23 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 1.68 | 0.05 |
| 15-16 | 15.5 | 1893.6 | 54.20 | 0.04 | 0.08 | 0.01 | 1.56 | 0.20 |