



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en
CIENCIAS DEL AGUA

“Estudio de la bioacumulación de metales en *Thalassia testudinum*
y en copépodos de la laguna Chacmochuch, Quintana Roo,
México”

Tesis que presenta

ADRIANA HERNÁNDEZ PÉREZ

En opción al título de
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México

2024

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de: Materiales y Métodos, Resultados y Discusión de este documento, proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que, a razón de lo anterior, y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y se regirán, en todo caso, por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: _____



Nombre: Adriana Hernández Pérez

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C. POSGRADO
EN CIENCIAS DEL AGUA*



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Adriana Hernández Pérez titulado **“Estudio de la bioacumulación de metales en *Thalassia testudinum* y en copépodos de la laguna Chacmochuch, Quintana Roo, México”**, fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de investigación de Sostenibilidad en Sistemas Acuáticos, en el laboratorio de Ecología Costera y Ecotoxicología del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. Jesús Alvarado Flores y la codirección del Dr. Antonio Almazán Becerril, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente



Dr. José Luis Hernández Stefanoni
Director de Docencia

Cancún, Quintana Roo, México, a 23 de octubre de 2024.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada (CVU: 1159055) que me permitió llevar a cabo la tesis y mi estancia de investigación.

A los laboratorios de Ecología Costera y de Ecotoxicología de la Unidad de Ciencias del Agua por brindarme el lugar, el equipo y materiales necesarios para llevar a cabo la metodología de la tesis. Al laboratorio Estatal de Salud Pública del Instituto de Servicios de Salud del Estado de Aguascalientes por recibirme en sus instalaciones durante mi estancia de investigación, por enseñarme a usar su equipo de absorción atómica y por la generación de datos de la tesis.

Al Dr. Jesús Alvarado Flores por aceptarme nuevamente en su equipo de trabajo con un tema de tesis que me gusta bastante. Por su tiempo, su paciencia y, por compartir sus conocimientos y pasión por la ecotoxicología ambiental.

Al Dr. Antonio Almazán Becerril, por toda su guía, su tiempo y disposición para resolver mis dudas. Por su compromiso como maestro al enseñarme siempre a presentar trabajos de calidad y por procurar mi aprendizaje. Gracias por enseñarme a creer en mis talentos y habilidades.

Al Dr. José Adán Caballero Vázquez por sus aportaciones a la tesis y su disposición para resolver mis dudas.

A la Dra. Nancy Mercado Salas por su tiempo dedicado a enseñarme más sobre el mundo de los copépodos y por sus valiosas aportaciones durante el desarrollo de la tesis de investigación.

Al Dr. Isidoro Rubio Franchini por recibirme en el laboratorio Estatal de Salud Pública, por tomarse el tiempo de enseñarme y apoyarme a usar el equipo de absorción atómica y por compartir sus conocimientos.

A los técnicos de la Unidad de Ciencias del Agua, al M. en C. Benjamín Delgado Pech y al M. en C. Jorge Carlos Peniche Pérez, por su apoyo y su actitud positiva durante el trabajo de campo. Por sus consejos, enseñanzas y por siempre proporcionarme el material y equipo necesario para desarrollar la tesis.

A mis compañeras Argentina Rábago, Wendy Ortiz, Marbeya González y Maricruz Arcique y a mi compañero Héctor García, por hacer memorable esta etapa de mi vida. Gracias por las charlas y las risas compartidas durante los almuerzos.

A mi hermana y mejor amiga, Jimena Peraza Alvarado, por todas las aventuras que vivimos durante las salidas de campo, por las charlas profundas que compartimos en el laboratorio. Gracias por ser parte de otra etapa importante en mi vida, por creer en mí y darme fuerza cuando la necesito. Al M. en C. Juan Arana Ravell, a la M. en C. Jocelyn Frías y a la M. en C. Eunices Hernández, por sus consejos, las experiencias vividas en el laboratorio y por su amistad. A la Lic. Fanny Margarita de Gante Ayora por siempre endulzar mis días no solo con los caramelos que me regalaba, sino que también por todo su cariño, consejos, buena energía y sonrisas.

A los estudiantes de las prácticas profesionales y alumnas(os) de Talento CICY, porque me recordaron con su alegría, emoción y pasión con los experimentos y proyectos realizados durante su estancia en la Unidad de Ciencias del Agua, la “chispa” que me mueve a hacer ciencia y por permitirme compartir mis conocimientos y experiencias durante mi formación académica.

A Elsy y Javier, por recibirme con el corazón y los brazos abiertos en su hogar, por su apoyo y cariño.

A mis padres, Rubí y Adrián por su apoyo incondicional. Por siempre motivarme a alcanzar mis sueños por muy grandes que parezcan. Gracias por siempre ser mi refugio, darme fuerzas y por creer en mí.

A Murphy, Blanca y Sam, por ser mi soporte emocional en los días nublados y cuando hay sol. Por siempre recibirme con ese brillo en sus ojos, nariz húmeda y meneo de colita cuando llego a casa. Por enseñarme que en la vida también hay tiempo para un paseo por las tardes. Gracias por acompañarme en las noches desvelo.

DEDICATORIA

*A ti, por siempre atreverte a soñar en grande y por jamás
rendirte ante la adversidad.*

*A mi abuelo Federico, por guiarme desde el cielo y acompañarme en
cada paso que doy en la vida.*

INDICE

ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	2
1.1. Lagunas costeras	2
1.1.1. Laguna Chacmochuch	2
1.2. Contaminación por metales en las lagunas costeras de la península de Yucatán.....	4
1.2.1. Agua.....	4
1.2.2. Sedimentos.....	5
1.3. Metales tóxicos y sus efectos en la biota acuática	6
1.4. Bioacumulación de metales.....	7
1.4.1. Factores de bioacumulación (FBA).....	8
1.4.2. <i>T. testudinum</i> como especie centinela de metales de la zona costera.....	9
1.4.3. Copépodos como especie centinela de metales de la zona costera.....	12
JUSTIFICACIÓN.....	15
HIPÓTESIS	15
OBJETIVOS.....	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos	16
CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	17
2.1. Proceso de lavado del material	17
2.2. Diseño de muestreo	17
2.3. Colecta de muestra	18
2.3.1. Parámetros fisicoquímicos.....	19
2.3.2. Proceso para tomar la muestra de agua	19
2.3.3. Proceso para tomar la muestra de los sedimentos	19
2.3.4. Proceso para tomar la muestra de <i>T. testudinum</i>	19
2.3.5. Proceso para tomar la muestra de copépodos.....	19
2.4. Método para preservar y digerir las muestras de agua	20

2.5.	Método para secar y digerir las muestras de los sedimentos.....	20
2.6.	Método para limpiar, secar y digerir las muestras de <i>T. testudinum</i>	20
2.7.	Método para separar, limpiar y digerir las muestras de los copépodos.....	21
2.8.	Análisis de metales.....	22
2.9.	Cálculo de los factores de bioacumulación (FBA) en <i>T. testudinum</i> y en los copépodos ..	23
2.10.	Análisis de datos.....	25
CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		26
3.1.	Agua.....	26
3.1.1.	Parámetros fisicoquímicos.....	26
3.1.2.	Cuantificación de las concentraciones de metales en el agua	26
3.2.	Sedimentos	28
3.2.1.	Características generales.....	28
3.2.2.	Cuantificación de las concentraciones de metales en el sedimento.....	28
3.3.	Cuantificación de las concentraciones de metales en <i>T. testudinum</i>	31
3.4.	Cuantificación de las concentraciones de metales en copépodos	33
3.5.	Factores de bioacumulación (FBA) en <i>T. testudinum</i>	36
3.6.	Factores de bioacumulación (FBA) en copépodos.....	38
3.7.	DISCUSIÓN.....	40
3.7.1.	Metales en agua	40
3.7.1.1.	Concentraciones de metales en el agua de acuerdo a la normatividad	42
3.7.2.	Metales en sedimentos.....	43
3.7.2.1.	Concentraciones de metales en el sedimento de acuerdo a la normatividad	45
3.7.3.	Concentración de metales en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	46
3.7.4.	El factor de bioacumulación (FBA) de metales en <i>T. testudinum</i>	49
3.7.5.	Concentración de metales en copépodos	49
3.7.6.	Factor de bioacumulación (FBA) en copépodos	51
CONCLUSIONES		54
REFERENCIAS		55
ANEXOS.....		62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Metales pesados en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i> ($\mu\text{g/g}$) (modificado de Whelan III <i>et al.</i> , 2011).....	10
Tabla 1.2. Especies de copépodos en dos sistemas lagunares y estuarino-costeros de la península de Yucatán.....	13
Tabla 2.3. Coordenadas geográficas de los sitios de estudio en la laguna Chacmochuch.	17
Tabla 2.5. Límites de detección del equipo de Absorción Atómica para los métodos de flama (FAA) y grafito (GFAA).....	23
Tabla 2.6. Fórmulas para determinación del peso seco de los copépodos (Dumont <i>et al.</i> , 1975).25	
Tabla 3.7. Valores promedio \pm D.E del pH, salinidad y temperatura del agua por zonas de Chacmochuch.....	26
Tabla 3.8. Descripción de los sedimentos de la laguna Chacmochuch por zona.	28
Tabla 3.9. Concentraciones ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en peso seco de metales por organismo.....	34
Tabla 3.5.10. Comparación de la concentración de los metales en el agua de la laguna Chacmochuch y los valores establecidos de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y CE-CCA-001/89. Los valores son reportados en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	43
Tabla 3.5.11. Concentraciones de metales en laguna Chacmochuch, los valores de referencia de la Norma Mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) y la Guía Canadiense (ISQG). Los valores son reportados en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de peso seco.....	45
Tabla A1. Valores promedio \pm D.E de las concentraciones de metales en agua por zonas de la laguna Chacmochuch.	62
Tabla A2. Valores promedio \pm D.E de las concentraciones de metales en sedimentos por zonas de la laguna Chacmochuch (n=7).....	62
Tabla A3. Valores promedio \pm D.E. de las concentraciones de metales en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i> por zona de la laguna Chacmochuch (n=7).	63
Tabla A4.1. Factores de bioacumulación de cadmio en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	63
Tabla A4.2. Factores de bioacumulación de arsénico en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	64
Tabla A4.3. Factores de bioacumulación de cobre en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	65
Tabla A4.4. Factores de bioacumulación de cromo en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	65
Tabla A4.5. Factores de bioacumulación de zinc en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	66
Tabla A4.6. Factores de bioacumulación de plomo en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	67
Tabla A4.7. Factores de bioacumulación de hierro en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	68
Tabla A5.1. Factores de bioacumulación de cobre en copépodos.....	68
Tabla A5.2. Factores de bioacumulación de hierro en copépodos.	69
Tabla A5.3. Factores de bioacumulación de zinc en copépodos.....	70

Tabla A5.4. Factores de bioacumulación de plomo en copépodos.	70
Tabla A5.5. Factores de bioacumulación de arsénico en copépodos.	71
Tabla A5.6. Factores de bioacumulación de cadmio en copépodos.	72
Tabla A5.7. Factores de bioacumulación de cromo en copépodos.	73
Tabla A6.1. Datos estadísticos de las concentraciones de metales en el agua.	73
Tabla A6.2. Datos estadísticos de las concentraciones de metales en los sedimentos.	74
Tabla A6.3. Datos estadísticos de las concentraciones de metales en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	74
Tabla A6.4. Datos estadísticos de las concentraciones de metales en copépodos.	74
Tabla A6.5. Datos estadísticos de los factores de bioacumulación de las hojas y raíces de <i>T. testudinum</i>	75
Tabla A6.7. Datos estadísticos de los factores de bioacumulación en copépodos.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la laguna Chacmochuch.	3
Figura 1.2. Modelo conceptual de la relación del FBA y la concentración en el medio de exposición: A) por medio del valor 1 y B) por la dispersión de puntos (modificado de Whelan III <i>et al.</i> , 2011 y Yañez, 2020).	9
Figura 1.3. Semejanza entre <i>T. testudinum</i> y una planta terrestre: a) hojas; b) raíces y rizomas; c) flores (modificado de Van Tussenbroek <i>et al.</i> , 2010).	9
Figura 1.4. Proceso de bioacumulación, detoxificación y biomagnificación de metales mediado por pastos marinos.	12
Figura 1.5. Rutas de exposición de metales en copépodos y el reciclaje de elementos.	15
Figura 2.6. Ubicación de los sitios de muestreo en la laguna Chacmochuch.	18
Figura 2.7. A) Hojas y B) Raíces de <i>T. testudinum</i> lavadas y separadas. Fotografías de Adriana Hernández-Pérez (2023).	21
Figura 2.8. A) Muestra de copépodos sin separar, tomadas del fondo de los botes de 100 ml utilizados en campo; B) Copépodo separado en poza. Fotografía tomada por Adriana Hernández-Pérez (2023).	22
Figura 2.9. Copépodos colectados en la laguna Chacmochuch: a) Orden Calanoida (P10), b) Orden Cyclopoida (P13) y c) Orden Harpacticoida (P9). Fotografías tomadas por Jesús Alvarado-Flores (2023)	24
Figura 3.10. Concentraciones ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de As, Cd, Cu, Fe, Pb y Zn presentes en el agua de la laguna Chacmochuch por zona. El asterisco (*) representa la diferencia estadística de $p < 0.05$	27
Figura 3.11. Sedimentos de la laguna Chacmochuch: A) zona 1 y B) zona 2.	28

Figura 3.12. Concentraciones de As, Cd, Cu, Cr, Fe, Pb y Zn ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, peso seco) en sedimentos de la laguna Chacmochuch por zona. El asterisco (*) representa la diferencia estadística de $\rho < 0.05$	31
Figura 3.13. Concentraciones de As, Cd, Cu, Cr, Fe, Pb y Zn ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, peso seco) en hojas y raíces de <i>T. testudinum</i> de la laguna Chacmochuch por zona. El asterisco (*) representa la diferencia estadística de $\rho < 0.05$	32
Figura 3.14. Concentraciones ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, peso seco) de Cd, Cr, Cu, Fe y Zn en copépodos de la laguna Chacmochuch (n=7) por zona.....	35
Figura 3.15. Relación de los FBA para hojas (a1, b1, c1, d1, e1) y raíces (a2, b2, c2, d2) de <i>T. testudinum</i> respecto a las concentraciones de Cr, Fe, Pb, Zn y Cu de los puntos de la zona 1 y zona 2 de la laguna Chacmochuch.....	37
Figura 3.16. Relación de los factores de bioacumulación (FBA) en copépodos respecto a las concentraciones de A) cadmio, B) cobre, C) hierro y D) zinc de los puntos de la zona 1 y zona 2 de la laguna Chacmochuch.....	39
Figura 3.5.17. Representación de la corriente de Yucatán cuya circulación fluye frente a la entrada de la laguna Chacmochuch (imagen modificada de Reséndiz-Colorado, 2019).....	41
Figura 3.5.18. Mezcla de copépodos utilizada para el estudio de la bioacumulación de metales en la laguna Chacmochuch.	52

RESUMEN

Las lagunas costeras de la península de Yucatán (PY) son vulnerables a la contaminación de metales tóxicos que se bioacumulan y biomagnifican por medio de las actividades turísticas, pesqueras y las descargas de aguas residuales. El objetivo de este trabajo es determinar la concentración de metales tóxicos (As, Cd, Pb y Cr) y esenciales (Zn, Fe, Cu) en los sedimentos y agua, así como su bioacumulación en copépodos y *T. testudinum* en dos zonas dentro de la laguna Chacmochuch con un probable impacto diferencial de la fuente de contaminación. Para determinar las concentraciones de los metales, se utilizó la técnica de absorción atómica. Los factores de bioacumulación (FBA) se obtuvieron relacionando la concentración del metal en las hojas y raíces de *T. testudinum* respecto al sedimento y la concentración del metal en los copépodos respecto a las concentraciones en el agua. Se aplicó el estadístico U de Mann Whitney para determinar diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) de concentraciones y de los FBA entre las zonas. Los resultados obtenidos muestran que las concentraciones de As, Cd, Cu, Cr, Pb y Zn en el agua se encontraron por arriba de los valores indicados para la protección de vida acuática marina de los Criterios de la Calidad del Agua (CE-CCA-001/89). En los sedimentos, solo las concentraciones del As y Cr se encontraron por arriba tanto de los valores establecidos de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 como de los valores de la Guía Canadiense de Calidad del Sedimento (ISQG). En tanto que las concentraciones de Cd y Pb, se encontraron por arriba de los valores establecidos únicamente por la Guía Canadiense. En *T. testudinum* se observó una mayor concentración de As, Cd, Cr y Fe en las raíces respecto a las hojas. En los copépodos, las concentraciones reportadas de Cd y Pb fueron pequeñas y las concentraciones de As se encontraron por debajo del límite de detección. Los FBA del Cu, Cr, Fe y Pb en *T. testudinum* estuvieron por debajo de 1.0 tanto para las hojas como para las raíces. En los copépodos, los FBA del Cd, Cu, Fe y Zn se encontraron por debajo 1.0. Lo anterior implica que las concentraciones de los metales bioacumuladas en los tejidos del pasto marino y en los copépodos son pequeñas respecto a las concentraciones obtenidas en el sedimento y agua, respectivamente. No obstante, las concentraciones por encima de la normativa de algunos metales como el As, Cd, Cr y Pb representan un peligro para los organismos acuáticos en la laguna Chacmochuch.

ABSTRACT

The coastal lagoons of the Yucatan peninsula (PY) are vulnerable to contamination by toxic metals which bioaccumulate and biomagnify through tourism, fishing activities and wastewater discharges. The aim of this work is to determine the concentration of toxic metals (As, Cd, Pb and Cr) and essential metals (Zn, Fe, Cu) in sediments and water, as well as their bioaccumulation in copepods and *T. testudinum* in two areas within the Chacmochuch lagoon with a probable differential impact of the source of contamination. To determine the concentrations of the metals, the atomic absorption technique was used. The bioaccumulation factors (BAF) were obtained by relating the concentration of the metal in the leaves and roots of *T. testudinum* with respect to the sediment and the concentration of the metal in the copepods with respect to the concentrations in the water. The Mann-Whitney U statistic was applied to determine significant statistical differences ($p < 0.05$) in concentrations and BAF between zones. The results obtained show that the concentrations of As, Cd, Cu, Cr, Pb and Zn in the water were found above the values indicated for the protection of marine aquatic life in the Water Quality Criteria (CE-CCA-001/89). In the sediments, only the concentrations of As and Cr were found above both the values established by NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 and the values of the Canadian Sediment Quality Guide (ISQG). Meanwhile, the concentrations of Cd and Pb were found above the values established only by the Canadian Guide. In *T. testudinum*, a higher concentration of As, Cd, Cr and Fe will be detected in the roots compared to the leaves. In copepods, reported concentrations of Cd and Pb were low and concentrations of As were below the detection limit. The BAF of Cu, Cr, Fe and Pb in *T. testudinum* were below 1.0 for both leaves and roots. In copepods, BAF of Cd, Cu, Fe and Zn were below 1.0. This suggests that the concentrations of bioaccumulated metals in seagrass tissues and in copepods are low compared to the concentrations obtained in sediment and water, respectively. However, concentrations above the regulations of some metals such as As, Cd, Cr and Pb represent a hazard to aquatic organisms in the Chacmochuch lagoon.

INTRODUCCIÓN

En la península de Yucatán (PY) las lagunas costeras brindan protección, alimentos y resguardo para la biota tanto terrestre como acuática y fungen como zonas de transición entre el continente y el mar (Vázquez y Martínez, 2022). Sin embargo, son vulnerables a las actividades turísticas, pesqueras, las escorrentías y descargas de aguas residuales que contribuyen a su deterioro por medio de la carga de contaminantes como el exceso de nutrientes, organismos patógenos y metales tóxicos para la biota acuática (Hernández-Terrones *et al.*, 2015). Los metales tóxicos son persistentes y representan un problema ambiental que genera gran preocupación ya que se bioacumulan y se biomagnifican (Ponce-Velez y Botello, 1992). La bioacumulación de metales ocurre cuando la biota acuática se expone a las concentraciones de estos elementos a través de la columna de agua o en los sedimentos (Bonilla-Heredia, 2009). En el estudio de la bioacumulación, diversas especies de peces (Villareal-Treviño *et al.*, 1986), mejillones (López *et al.*, 2006; Lau *et al.*, 1998), pasto marino como *Thalassia testudinum* (Whelan III *et al.*, 2005; Whelan III *et al.*, 2011; Valdespino-Saenz, 2005) y copépodos (Hensley-Demidof, 2022) se han utilizado como centinelas de metales en lagunas costeras.

En el estado de Quintana Roo se localiza la laguna costera de Chacmochuch. Al suroeste de la laguna se encuentra el antiguo relleno sanitario norte de la ciudad de Cancún que recibía residuos urbanos y comerciales, cuya capacidad máxima se alcanzó en 2006 (Flores-Audelo, 2010). Actualmente el relleno sanitario genera lixiviados y en conjunto con las actividades antropogénicas, figuran como potenciales fuentes de contaminación de metales tóxicos que llegan a la laguna por medio de la infiltración al agua subterránea y causan estragos en la biota acuática (Cejudo *et al.*, 2021). Por lo anterior, el presente trabajo se enfoca en estudiar la contaminación de metales tóxicos (As, Cd, Cr, Pb) y esenciales (Cu, Fe, Zn) en el agua y sedimento de dos zonas dentro de la laguna: la primera se localiza al noroeste, con características prístinas y la segunda zona se encuentra en la zona suroeste, cerca del antiguo relleno sanitario de la ciudad de Cancún y del continuo desarrollo urbano. Además, se determinará la bioacumulación de estos metales en *T. testudinum* y copépodos. La información generada dará a conocer si la laguna Chacmochuch está contaminada por metales tóxicos, lo que permitirá a los grupos comunitarios, al gobierno, la academia y agencias de protección ambiental mitigar las fuentes de contaminación y crear estrategias de conservación para la laguna debido a su importancia ecológica y económica.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1.Lagunas costeras

Las lagunas costeras son cuerpos de agua que generalmente se encuentran separados del mar por barreras formadas con bancos de arena o arrecifes de coral. Son ecosistemas que naturalmente están sometidos a algún tipo de estrés; experimentando frecuentes alteraciones y fluctuaciones ambientales. Debido a que interactúan con el ambiente marino, el dulceacuícola y el terrestre, son consideradas zonas de transición (Sandoval-Rojo *et al.*, 1988; Herrera-Silveira, 2006; Shulte, 2013; Beltrame *et al.*, 2009).

En la zona costera mexicana, existen aproximadamente 130 ecosistemas lagunares costeros. Cada uno con peculiaridades únicas de acuerdo con su ubicación como su hidrodinámica, su tiempo de residencia, sus entradas y salidas de agua, entre otros (Reséndiz-Colorado, 2019). Debido al mosaico de hábitats que ofrecen, incluyendo bosques de manglar y praderas de pastos marinos, las lagunas costeras son consideradas altamente diversas. Además, estos ecosistemas son importantes ya que representan zonas de protección, descanso, reproducción, desarrollo y alimentación para un gran número de especies (DOF, 1999). Entre ellas, diversas especies de aves, peces, cocodrilos, moluscos, cangrejos, rayas de diversos tamaños, camarones comerciales, entre muchos otros.

En la península de Yucatán, las lagunas costeras tienen en general poca profundidad (<10 m) por lo que se consideran someras. La salinidad es muy variable y se encuentran influenciadas por la corriente de Yucatán que conecta al Mar Caribe y al Golfo de México; además de contener nutrientes que propician la eutrofización de la zona costera (Reséndiz-Colorado, 2019).

1.1.1. Laguna Chacmochuch

La laguna de Chacmochuch es una laguna costera que se localiza en dos municipios Quintanarroenses, el de Benito Juárez e Isla Mujeres (Figura 1.1) Es un Área Natural Protegida (ANP) estatal que pertenece a dos categorías de protección: 1) Zona Sujeta a Conservación Ecológica y 2) está dentro de la Reserva de la Biosfera del Caribe mexicano. Identificada como ecosistema sin perturbaciones y que cuenta con flora y fauna que figuran como parte de la identidad de la región (también conocida como *zona núcleo*), por ende, es una zona de mayor protección (DOF, 1999; DOF, 2016).

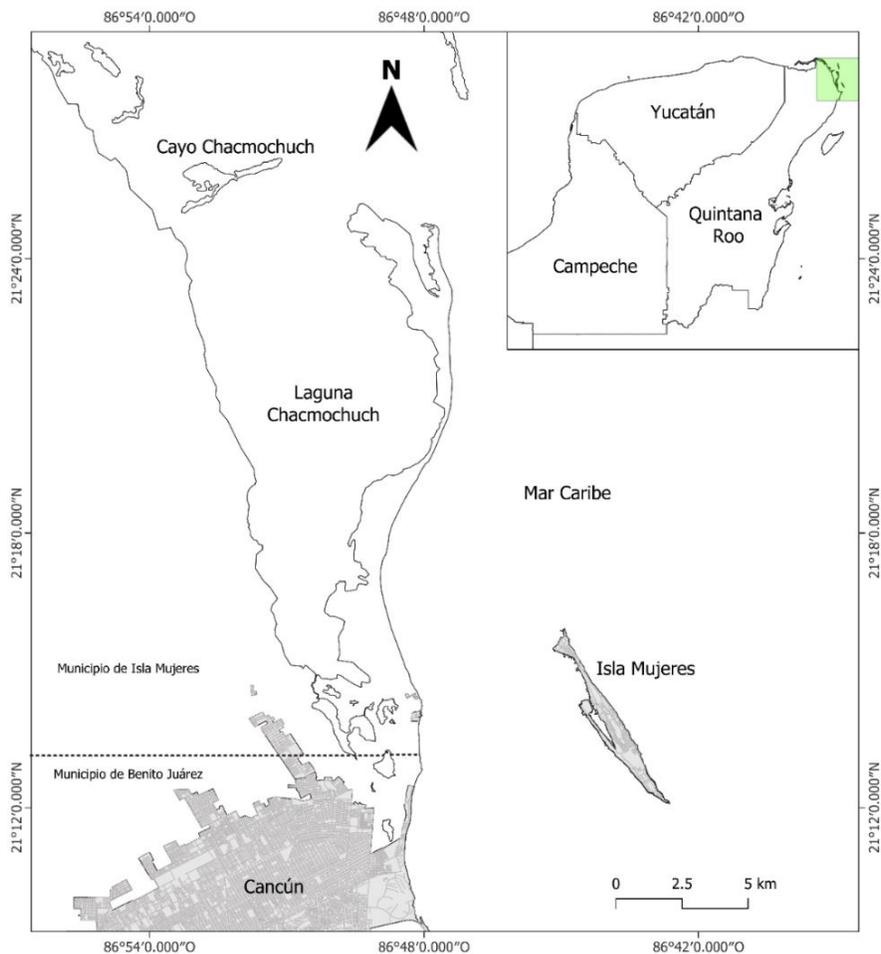


Figura 1.1 Ubicación de la laguna Chacmochuch.

Así como las lagunas costeras de la PY, Chacmochuch es muy somera en los márgenes cercanos a los bosques de manglar, llegando a tener una profundidad de no más de 0.5 m, mientras que en el centro, su profundidad máxima es de 3 m (Aguilar-Martínez, 2015). La edafología característica de la zona continental (lado izquierdo) de la laguna es de tipo Solonchak, mientras que la zona de Isla Blanca cercana al Mar Caribe es de tipo Arenal (INEGI, 2013).

En los estudios realizados dentro de la laguna se han registrado aproximadamente 50 especies de peces entre la que se encuentra la barracuda (*Spyraena barracuda*) y de acuerdo a la distribución de la ictiofauna, se zonificó a la laguna en: 1) zona norte o estenohalina, 2) zona central o eurihalina y 3) zona sur o agua dulce (Caballero-Vázquez *et al.*, 2005). Por otro lado, Aguilar-Martínez (2015) caracterizó la variabilidad hidrológica de la laguna determinando cuatro principales zonas de acuerdo a las salinidades: 1) cercano a la boca de la laguna es la más salina debido a la intrusión

de agua de mar; 2) es menos salina debido a los flujos y aportes de agua subterránea que provienen del continente; 3) es muy somera, con alta salinidad y temperatura y 4) ubicada en extremo sur de la laguna es el punto menos salino debido a las entradas de agua dulce.

Reséndiz-Colorado (2019), implementó un modelo hidrodinámico de la laguna para describir el impacto que tienen los eventos meteorológicos en la circulación y tiempo de residencia del sistema lagunar. Concluyendo que 18 días es el tiempo máximo de residencia de la laguna. La circulación es compleja ya que se desarrolla en dos capas, una superficial y una de fondo, presentando variaciones estacionales, además de la influencia que ejercen la dirección y la velocidad del viento.

En cuanto al estado de salud de la laguna Chacmochuch, Pérez-Gómez *et al.* (2020), reportaron una carga de nutrientes en los sedimentos durante la temporada de secas en Isla Blanca, siendo la laguna Chacmochuch y Cabo Catoche, las posibles causas de este enriquecimiento al exportar y mezclar sus aguas con las del Mar Caribe. Por otro lado, Bonilla-Heredia (2009) estudió las concentraciones de plomo (4.44 $\mu\text{g/g}$) en las hojas del biomarcador *T. testudinum*, indicando que las posibles fuentes de este metal hacia la laguna provienen del antiguo relleno sanitario localizados al suroeste de la laguna.

1.2. Contaminación por metales en las lagunas costeras de la península de Yucatán

1.2.1. Agua

En la zona costera de la PY se localizan aproximadamente 10 ecosistemas acuáticos, entre los que se encuentran los estuarios, las lagunas y las bahías (Aguilar-Martínez, 2015). Estos sistemas acuáticos, cuentan con una gran capacidad amortiguadora gracias a los aportes y mezclas de agua tanto dulce como marina (Cejudo *et al.*, 2021). Sin embargo, la topografía kárstica altamente permeable de la región, el crecimiento poblacional que conlleva la urbanización, así como las actividades turísticas y pesqueras, contribuyen al aporte de contaminantes y carga de nutrientes a la costa (Whelan III *et al.*, 2011; Aguilar-Martínez, 2015). Este suceso se ha observado en las lagunas de Celestún, Chelem, Dzilam del Bravo, Holbox, Chacmochuch y Nichupté donde se ha registrado contaminación y eutrofización (Herrera-Silveira, 2006). Por otro lado, en la laguna Chelem, se reportaron concentraciones de metales como el Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sn y Zn, cuyas principales fuentes son las aguas residuales generadas en las actividades productivas avícolas y porcinas, las cuales se depositan en agujeros excavados, promoviendo la filtración a

través del suelo kárstico característico de la zona (Arcega-Cabrera *et al.*, 2014). En la laguna Yalahau, se han reportado concentraciones de elementos como el Fe, Cd y Cr que provienen de las constantes descargas de aguas residuales contaminadas y de lixiviados de los rellenos sanitarios (Avelar *et al.*, 2013). En la laguna Nichupté catalogada como un sistema vulnerable a las actividades antropogénicas y al crecimiento poblacional, se reportaron concentraciones de Pb, Cd y Fe en el agua (Cejudo *et al.*, 2021) y en la laguna Manatí se reportaron concentraciones de Al, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn cercanos a la zona catalogada como canal de drenaje que recibe las descargas que provienen de la colonia Lombardo Toledano de la ciudad de Cancún representando una zona de potencial riesgo ambiental (Hensley-Demidof, 2022).

1.2.2. Sedimentos

Los sedimentos figuran como una matriz de gran importancia y complejidad, ya que representan una mezcla de distintos elementos bacterianos, minerales, contenidos de carbonatos de calcio, arcillas, arenas, limos, materia orgánica (MO), entre otros (Illescas-Ángeles, 2010; Rubio-Arias *et al.*, 2018). Su formación se da por medio de la generación de partículas a través de la erosión de la roca y antropogénicamente con los residuos de construcción que son transportados con el viento y depositados en los sistemas acuáticos, donde sedimentan por efecto de gravedad y se acumulan en el fondo (Rubio-Arias *et al.*, 2018).

Los sedimentos y su relación con la MO, así como con el contenido de limo, arcillas y arena es estrecha. Cuando los sedimentos son finos, mayor cantidad de MO será almacenada. El que un sedimento sea fino depende de los altos contenidos de limo y arcilla y, por el contrario, cuando existe un mayor contenido de arena la textura suele ser gruesa. Los metales pesados como el Fe, Mn, Cr, Zn y el Pb son afines a los sedimentos finos (Villalba, 1995). En un estudio realizado en la bahía de Chetumal en el Estado de Quintana Roo, se determinó una correlación positiva entre la MO y las concentraciones de cobre, cadmio, plomo y mercurio presentes en los sedimentos; dicha correlación se debe al contenido tanto del ácido húmico como fúlvico, que favorecen la absorción de metales en el fondo de la bahía (Illescas-Ángeles, 2010).

Asimismo, los sedimentos son de interés científico por su dinamismo y figuran como los reservorios más grandes de metales tóxicos (Rubio-Arias *et al.*, 2018). En la laguna Términos en Campeche, se reportaron concentraciones de Cu, Ni, Co, Cr, Pb, Cd y Zn en los sedimentos. Las

principales fuentes que contribuyeron al aumento de las concentraciones de Cr y Pb a la laguna fueron las actividades de las industrias que se encuentran cercanas a la laguna, así como las antropogénicas (Ponce-Velez y Botello, 1992). Por otro lado, en la Bahía de Chetumal se estudiaron las concentraciones de Hg, Pb, Cd y Zn en los sedimentos durante dos temporadas climáticas: lluvias y secas. Siendo la primera la temporada en la que mayores concentraciones de estos metales se cuantificaron debido a los escurrimientos pluviales y la mezcla de las partículas suspendidas que se encuentran en la columna de agua que se depositan en la bahía (López *et al.*, 2006).

1.3. Metales tóxicos y sus efectos en la biota acuática

Los metales pesados o también conocidos como “elementos traza”, son elementos químicos cuyas densidades son superiores a $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y sus concentraciones en el medio ambiente son muy pequeñas y se miden en partes por millón (ppm) (Bonilla-Heredia, 2009). Algunos de los metales como el As, Cd, Pb, Hg y Cr no son esenciales y debido a su alta toxicidad aun cuando se encuentran en concentraciones bajas, representan un riesgo para la biota. Estos elementos –con excepción del As– son considerados entre los 10 metales más tóxicos de acuerdo a la USEPA (Bonilla-Heredia, 2009; Calva y Torres, 2003; Rubio-Arias *et al.*, 2018).

El arsénico es un elemento natural que está presente en los minerales y en concentraciones trazas en la columna de agua (Valdespino-Saenz, 2005). Su forma más común en la que se encuentra este elemento es el arsenato [As (V)], cuya afinidad a los oxihidróxidos de hierro [FeO (OH)] y a los óxidos de manganeso [MnO₂] está dada por un ambiente aeróbico que promueve su movilidad en los sedimentos (Covarrubias y Cabriales, 2017). En los sedimentos, este metal se acumula por medio de la aplicación de fertilizantes, plaguicidas, residuos producidos por las industrias y por medio de las partículas generadas en la quema de combustibles fósiles (Valdespino-Saenz, 2005). En la biota acuática, este metal es tóxico para los invertebrados y peces en una concentración de 5 mg/L (Calva y Torres, 2003). Este elemento es parecido químicamente al fosfato, por lo que tiende a sustituirlo en las células de los productores primarios impidiendo la producción del ATP y la intoxicación celular (Valdespino-Saenz, 2005).

El cadmio se asocia principalmente a actividades de quema de combustibles como la gasolina, aceites, lubricantes muy característicos de las lanchas de pesca, además de los desechos

municipales, los lodos y las baterías (Calva y Torres, 2003). En la biota acuática, este elemento al ser similar químicamente al zinc, suele reemplazarlo en los procesos donde el Zn es requerido, se acumula en los tejidos y afecta las funciones respiratorias y nerviosas (Valdespino-Saenz, 2005; Calva y Torres, 2003). Además, logra inhibir la respiración celular, la fotosíntesis y la fijación de CO₂ en las plantas (Calva y Torres, 2003).

El plomo se encuentra principalmente en su forma química denominada galena (PbS), cuya solubilidad es baja. El ión Pb²⁺ es muy común en los sistemas acuáticos y tiene una alta afinidad por los sedimentos (Valdespino-Saenz, 2005). Este metal se asocia al uso de plaguicidas, pinturas, lodos de las plantas de tratamiento, así como también al desecho industrial (Calva y Torres, 2003). Debido a su similitud química con el ión Ca²⁺, las constantes y altas exposiciones a este metal ocasiona el reemplazo Pb²⁺ → Ca²⁺ provocando alteraciones en el metabolismo de la biota acuática y en las células que producen ATP (Valdespino-Saenz, 2005). Los invertebrados y el plancton se ven afectados por la presencia de este metal que retrasa su maduración sexual, reduciendo la tasa de crecimiento en sus poblaciones, además de generarles problemas neurológicos. En las plantas, afecta el proceso de fotosíntesis (Calva y Torres, 2003).

El cromo se encuentra en la naturaleza como Cr (III) y Cr (VI), siendo estas las formas químicas más estables en los sistemas acuáticos (Valdespino-Saenz, 2005). El Cr (VI) al ser soluble, facilita su penetración a las células de los organismos lo que lo convierte en altamente tóxico y una de las prioridades de estudio en los sistemas acuáticos. Por ejemplo, en los peces y cangrejos ocasiona problemas respiratorios, daño en sus tejidos, afectan sus crecimientos poblacionales y la sobrevivencia de las especies (Calva y Torres, 2003).

1.4. Bioacumulación de metales

La bioacumulación es un proceso que se lleva a cabo cuando la absorción de un contaminante en los organismos vivos es mayor con respecto a su tasa de excreción o expulsión. Este proceso indica el grado de exposición de la biota a algún contaminante, cuya introducción a las células es exactamente como lo harían los elementos esenciales (Nnaji *et al.*, 2023). Las rutas de exposición que propician la bioacumulación de contaminantes en los organismos son la alimentación y el hábitat (ya sea la columna de agua o sedimentos), aunque también dependerá de la talla y la edad del organismo (Páez-Osuna, 2005; Kennedy y Newell, 1996; Nnaji *et al.*, 2023). La

bioacumulación puede ocurrir por medio de la adsorción de elementos tóxicos en la capa superior o externa del microorganismo o por medio del metabolismo celular, donde los contaminantes son transportados directamente a la célula (Nnaji *et al.*, 2023).

1.4.1. Factores de bioacumulación (FBA)

Para determinar la relación existente entre las concentraciones de metales presentes en el medio acuático y los absorbidos por los microorganismos, se utilizan los factores de bioacumulación (FBA). Su fórmula difiere para los organismos que se movilizan a través de la columna de agua y los organismos sésiles, que dependen del sustrato para la absorción de nutrientes.

Para los organismos acuáticos (móviles), se utiliza la fórmula propuesta por Walker *et al.* (2012):

$$FBA = \frac{\text{Concentración del metal en el organismo } \left(\frac{mg}{L}\right)}{\text{Concentración del metal en el medio acuático } \left(\frac{mg}{L}\right)}$$

Mientras que para las plantas marinas (sésiles), de acuerdo con Covarrubias y Cabriales (2017), los FBA se pueden determinar de la siguiente manera:

$$FBA = \frac{\text{Concentración de metal en el tejido } \left(\frac{mg}{kg}\right)}{\text{Concentración del metal en el sedimento } \left(\frac{mg}{kg}\right)}$$

En ambos casos, los FBA son adimensionales y se pueden analizar desde dos perspectivas principales. La primera es por medio del valor 1 (Whelan III *et al.*, 2011), que indica mayor acumulación del metal en el tejido del microorganismo con respecto al medio acuático o sedimentario. La segunda, es por medio del análisis gráfico en el comportamiento de dicha relación. Donde por un lado se observa que, al disminuir la concentración de exposición en el entorno, los FBA aumentarán; e inversamente proporcional a esto, cuando las concentraciones del entorno aumentan, los FBA disminuirán (Figura 1.2). Esto es debido a que las concentraciones de exposición del hábitat son tan bajas que no exceden el límite en el que los organismos asimilan los metales, siendo constante su depuración por medio de las excretas. Sin embargo, existen casos en los que el comportamiento de las gráficas se torna constante, indicando toxicidad por bioacumulación (Yañez, 2020).

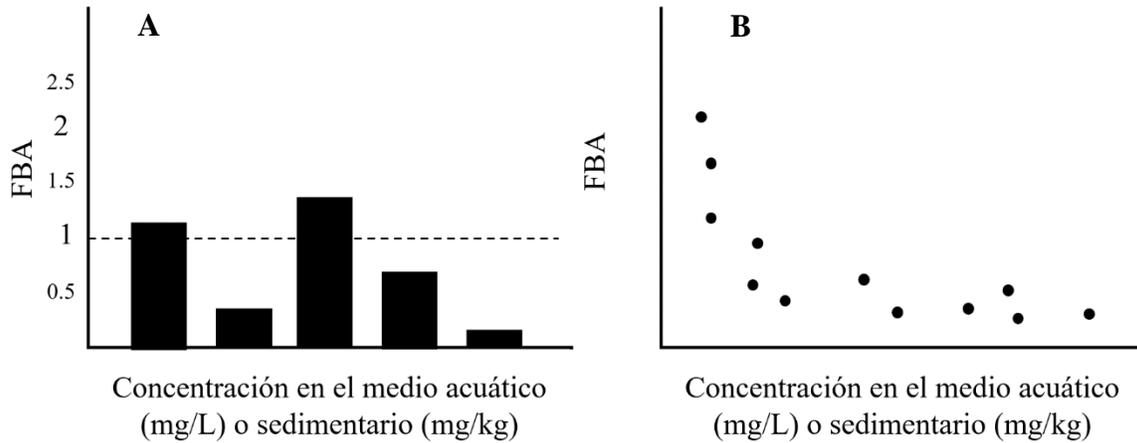


Figura 1.2. Modelo conceptual de la relación del FBA y la concentración en el medio de exposición: A) por medio del valor 1 y B) por la dispersión de puntos (modificado de Whelan III *et al.*, 2011 y Yañez, 2020).

1.4.2. *T. testudinum* como especie centinela de metales de la zona costera

En las zonas costeras de suelos carbonatados, arenosos y lodosos es común encontrar a no más de 50 metros de profundidad a las praderas de pastos marinos (Van Tussenbroek *et al.*, 2010). Ya sea que se encuentren poblaciones de dos o más especies juntas (mixtas) o solo de una (monoespecífica) (Herzka *et al.*, 2020). Estos pastos, son considerados plantas marinas (angiospermas o fanerógamas) debido a que su fisionomía se asemeja a una planta terrestre (Figura 1.3) (Van Tussenbroek *et al.*, 2010).

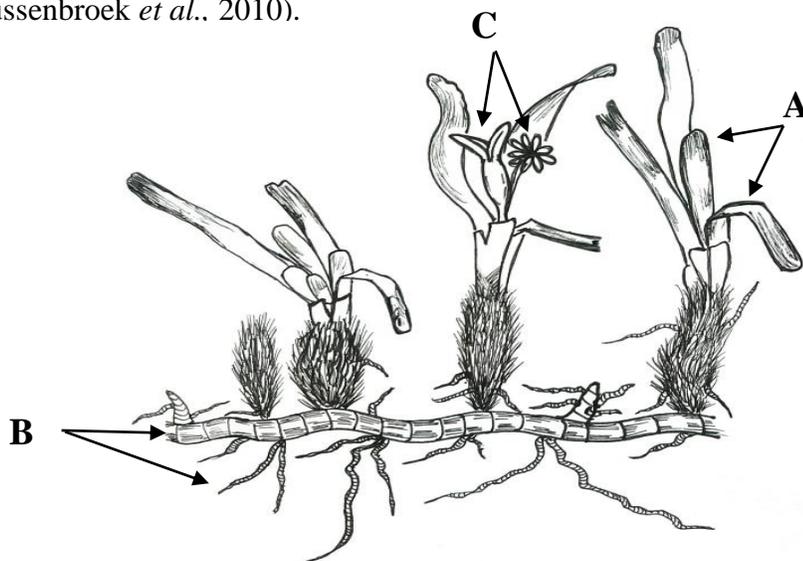


Figura 1.3. Semejanza entre *T. testudinum* y una planta terrestre: a) hojas; b) raíces y rizomas; c) flores (modificado de Van Tussenbroek *et al.*, 2010).

Las praderas de pastos marinos son hábitats para moluscos, langostas, camarones, poliquetos y copépodos que viven asociados a sus sedimentos. Además, fungen como refugio para la protección contra depredadores de especies juveniles de peces; tal es el caso de la laguna Yalahau en el que se han registrado gran cantidad de peces como *Nicholsina usta*, *Anarchopterus criniger*, *Haemulon plumieri*, entre otras especies habitando en las praderas de pastos marinos (Ordóñez- López y García-Hernández, 2005). Asimismo, las praderas estabilizan los sedimentos y brindan protección a la costa del oleaje y las corrientes (Van Tussenbroek *et al.*, 2010).

El crecimiento y distribución de las praderas (Espinoza-Avalos, 1995), están dadas bajo condiciones específicas de salinidad, temperatura, la profundidad y la turbidez del agua (Solís *et al.*, 2008; Bonilla-Heredia, 2009). Por ejemplo, se ha demostrado que las altas temperaturas logran quemar las hojas y rizomas de las praderas de *T. testudinum*, lo que se traduce a una baja captación de nutrientes afectando su crecimiento y reproducción (Herzka *et al.*, 2020).

Dichas praderas de pastos han sufrido estragos en su distribución en las costas debido a que suelen ser removidas por medio del dragado para la construcción de muelles o zonas de embarque para las lanchas y barcos, ya sean turísticos o pesqueros (Herrera-Silveira *et al.*, 2019). Además, estos sistemas han sido afectados por la carga de nutrientes provenientes del continente, por medio del depósito directo de las aguas residuales a los sistemas costeros debido a la falta de drenaje o por su tratamiento deficiente. También son afectados por los lixiviados de los rellenos sanitarios o sitios clandestinos utilizados para depositar residuos sólidos urbanos y que son transportados por medio de la escorrentía hacia los cuerpos de agua adyacentes (Cejudo *et al.*, 2021). En la composición de dichos lixiviados se encuentran presentes elementos traza que son tóxicos para la biota acuática. Es por esto que, diversas investigaciones se han enfocado a estudiar la acumulación de elementos traza en las praderas de pastos marinos, principalmente la especie *T. testudinum* (Tabla 1.1), considerada la más común en las lagunas costeras, los estuarios, los arrecifes y las zonas costeras del Mar Caribe y el Golfo de México (Solís *et al.*, 2008; Herzka *et al.*, 2020).

Tabla 1.1. Metales pesados en hojas y raíces de *T. testudinum* (µg/g) (modificado de Whelan III *et al.*, 2011).

Locación	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Cd	Referencia
Hojas									
Puerto Morelos	-	47.50	-	-	-	0.27	-	-	Ruíz-Noria, 2005

Puerto Morelos	7-20	195-380	11-25	13-22	-	ND	-	-	Solís <i>et al.</i> , 2008
Holbox	25-30	89-500	4-7	31-34	-	4.5	-	-	Solís <i>et al.</i> , 2008
Holbox	-	-	-	-	16.30	-	-	-	Bonilla-Heredia, 2009
Holbox	-	-	5.5	32.9	8.20	2.3	1.62	-	Valdespino-Saenz, 2005
Isla Contoy	-	-	-	-	3.61	-	-	-	Bonilla-Heredia, 2009
Isla Mujeres	-	-	-	-	3.08	-	-	-	Bonilla-Heredia, 2009
Punta Cancún	-	-	-	-	2.79	-	-	-	Bonilla-Heredia, 2009
Punta Nizuc	-	-	-	-	3.06	-	-	-	Bonilla-Heredia, 2009
Laguna Chacmochuch	-	-	-	-	4.44	-	-	-	Bonilla-Heredia, 2009
Laguna Nichupté	-	-	-	-	3.34	-	-	-	Bonilla-Heredia, 2009
Laguna Nichupté	30.6	22.7	2.10	15.3	27.5	0.5	-	-	Whelan III <i>et al.</i> , 2011
Laguna Bojórquez	-	-	-	-	4.17	-	-	-	Bonilla-Heredia, 2009
Laguna Yalahau	-	-	8.66	28.46	7.03	4.40	2.87	-	Valdespino-Saenz, 2005
Laguna Yalahau	-	116	-	-	-	0.42	-	2.02	Martínez-Vázquez, 2007
Laguna Madre	256	287	12.1	24.1	0.81	-	1.04	-	Whelan III <i>et al.</i> , 2005
<hr/>									
Raíces									
Laguna Nichupté	<5.0	20.3	1.4	6.20	14.6	0.7	-	-	Whelan III <i>et al.</i> , 2011
Laguna Yalahau	-	-	8.2	16.7	6.01	4.2	2.5	-	Valdespino-Saenz, 2005
Laguna Yalahau	-	136	-	-	-	0.72	-	0.63	Martínez-Vázquez, 2007
Laguna Madre	45	418	7.96	25.4	0.75	-	1.47	-	Whelan III <i>et al.</i> , 2005
Holbox	-	-	4.7	12.8	2.49	2.5	3.15	-	Valdespino-Saenz, 2005

ND: No Detectado.

La acumulación de metales en *T. testudinum* se estudia por medio de sus hojas y raíces. Las hojas tienen un periodo de crecimiento de 3 a 4 meses, con un reemplazo de aproximadamente 15 hojas al año, haciendo posible determinar el tiempo de exposición y de absorción de estos elementos (Solís *et al.*, 2008; Martínez-Vázquez, 2007). Este mecanismo de recambio de las hojas contribuye a la detoxificación de metales acumulados por el pasto, pero contribuye a su transferencia e intoxicación a otros seres vivos a través de la cadena trófica y a su acumulación en los sedimentos, al caerse y formar parte de la materia orgánica (Figura 1.4).

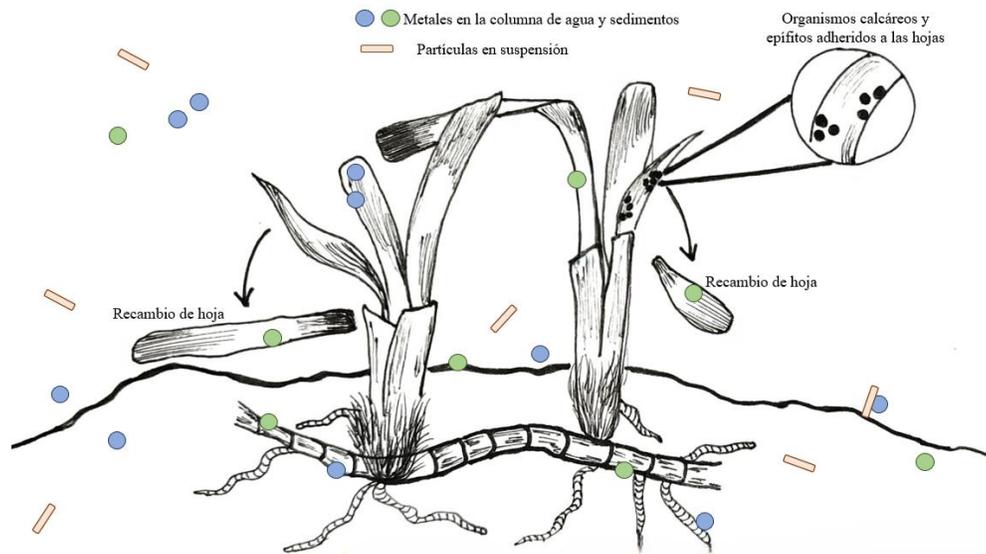


Figura 1.4. Proceso de bioacumulación, detoxificación y biomagnificación de metales mediado por pastos marinos.

1.4.3. Copépodos como especie centinela de metales de la zona costera

Los copépodos son crustáceos con más de 15,000 especies descritas actualmente. Habitan en ambientes acuáticos continentales y marinos (sobre todo en las zonas costeras) donde los órdenes Calanoida, Cyclopoida y Harpacticoida representan los principales y más diversos grupos. Estos organismos se encuentran en los sedimentos (bentónicos), la columna de agua (planctónicos) y asociados a otros organismos (simbiontes, comensales y parásitos). Por lo que sus hábitos alimenticios son variados llegando a ser detritívoros, herbívoros, omnívoros y carnívoros (Gutiérrez *et al.*, 2008; Morales-Serna y Gómez, 2012; Miracle, 2015; Fernández de Puelles, 2015; Caramujo, 2015).

Los copépodos están equipados con estructuras sensoriales (e.g. ojo naupliar y anténulas armadas con sétulas y sensilas) y locomotoras que les permiten llevar a cabo funciones como la reproducción, búsqueda de alimento y supervivencia, ya que detectan cuando se presenta una perturbación en el medio acuático para escapar de un posible depredador (Gutiérrez *et al.*, 2008). Su ciclo de vida es corto, iniciando con las primeras seis etapas designadas como NI-NVI que corresponden a los nauplios y seis etapas posteriores identificadas como CoI-CoVI designadas a los copepoditos, siendo el CVI el estado donde el animal alcanza su madurez y es capaz de

reproducirse (Morales-Serna y Gómez, 2012). Su reproducción es de tipo sexual. El macho, que suele ser de un tamaño más pequeño y delgado que la hembra, adhiere el espermatóforo en el poro genital de la hembra para finalmente fecundar los óvulos maduros y formar un saco que se adhiere a sus cuerpos (Gutiérrez *et al.*, 2008).

La distribución de los copépodos en los sistemas estuarinos y lagunares costeros dependerá de los gradientes de salinidad que varían como resultado de la influencia marina y la escorrentía que proviene del continente, además de las diferencias de temperatura que se hacen presentes en las temporadas climáticas. Esto ha sido registrado en *Acartia tonsa*, *Acartia lilljeborgii*, *Metis holothuriae*, *Tortanus angularis*, *Ditrichocorycaeus amazonicus* y *Calanopia americana* en la laguna Chelem y en la Bahía de Chetumal, que son cuerpos de agua con características marinas-hiperhalinas y estuarinas, respectivamente (Tabla 1.2) (Escamilla *et al.*, 2001; Escamilla *et al.*, 2011; Ruíz-Pineda *et al.*, 2016).

Tabla 1.2. Especies de copépodos en dos sistemas lagunares y estuarino-costeros de la península de Yucatán.

Orden	Especie	Locación	Características de distribución	Referencia
Calanoide	<i>Acartia tonsa</i>	Laguna Chelém	Se localizaron en la zona más interna y con menor salinidad de la laguna	Escamilla <i>et al.</i> , 2001
Calanoide	<i>Acartia lilljeborgii</i>	Laguna Chelém	Se encontraron en la zona nerítica Domina en la zona interna de los sistemas costeros, en ambientes hipersalinos y agua oligohalinas y es muy tolerante a niveles bajos de oxígeno	Escamilla <i>et al.</i> , 2001
Calanoide	<i>Acartia tonsa</i>	Bahía de Chetumal	Abundante en zonas más salinas y con mayor temperatura	Ruíz-Pineda <i>et al.</i> , 2016
Calanoide	<i>Acartia lilljeborgii</i>	Bahía de Chetumal	Mayor abundancia en zonas con menor temperatura (zonas más frías)	Ruíz-Pineda <i>et al.</i> , 2016
Cyclopoide	<i>Ditrichocorycaeus amazonicus</i>	Bahía de Chetumal	Abundante en zonas más salinas y con mayor temperatura	Ruíz-Pineda <i>et al.</i> , 2016
Calanoide	<i>Calanopia americana</i>	Bahía de Chetumal	Tienen mayor abundancia en los sitios cuyas salinidades y temperaturas son altas	Ruíz-Pineda <i>et al.</i> , 2016
Calanoide	<i>Paracalanus quasimodo</i>	Bahía de Chetumal	Tienen mayor abundancia en los sitios cuyas salinidades y temperaturas son altas	Ruíz-Pineda <i>et al.</i> , 2016

Por otro lado, debido a su importancia en la estructura trófica, sus ciclos de vida cortos, sus altas tasas poblacionales y su rápido crecimiento en los cultivos, estos microorganismos son útiles para llevar a cabo pruebas toxicológicas para conocer el impacto de la acumulación de ciertos metales en sus organismos (Zidour *et al.*, 2019). Por ejemplo, el copépodo cyclopoide *Paracyclopina nana* es sensible a la radiación UV, gamma, fluoreno y metales pesados como el cobre (Dahms *et al.*, 2016). El copépodo calanoide *Eurytemora affinis* es sensible a exposiciones prolongadas de cadmio y se determinó que las hembras son más sensibles a este metal en comparación con los machos, demostrando que la toxicidad es diferente entre sexos (Zidour *et al.*, 2019). En contraste, en el estudio realizado por Kadiene *et al.*, (2017), se demostró que los machos de la especie *Pseudodiaptomus annandalei* son más sensibles al cadmio en comparación con las hembras en su etapa adulta.

La acumulación de elementos traza en los copépodos se presenta a través del medio acuático y por la dieta. En ambos casos, la toxicidad dependerá de la dosis que reciba y la etapa de vida del organismo (Kadiene *et al.*, 2019b). Por ejemplo, en estudios realizados en copépodos calanoides *Acartia tonsa*, demostraron que la exposición a mercurio (Hg) y cadmio (Cd) por medio del alimento disminuye la elaboración de los huevos y su eclosión en al menos un 50%. En cuanto a la fase disuelta, únicamente el mercurio afecta la producción de huevos para esta especie (Hook y Fisher, 2001). El estudio realizado por Kadiene *et al.*, (2019b), demostró que el copépodo *P. annandalei* en su etapa naupliar bioacumula menos Cd a través de la dieta en comparación con el medio acuático. Por el contrario, la acumulación de este elemento fue mayor por medio del alimento conforme el desarrollo de las etapas siguientes se fue dando hasta alcanzar la adultez del copépodo. Por lo tanto, la acumulación del Cd va a depender de la ruta a la que se expongan los organismos y su toxicidad dependerá de la etapa de vida y el sexo de los copépodos. Aunado a esto, los copépodos influyen en el reciclaje biológico de los metales que no se asimilan por medio del alimento o el medio acuático, al expulsarlos junto con la materia fecal, estos se depositan en los sedimentos propiciando su acumulación en esta matriz (Figura 1.5) (Hook y Fisher, 2001).

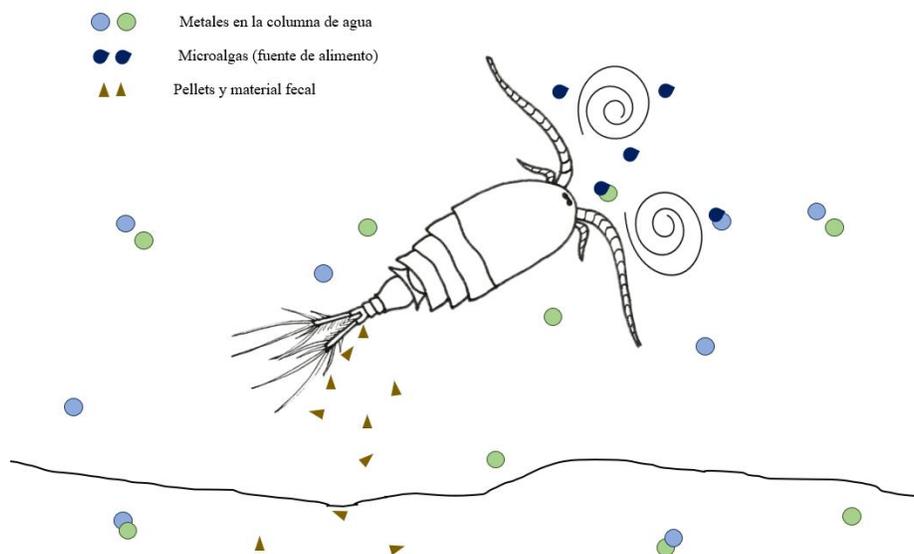


Figura 1.5. Rutas de exposición de metales en copépodos y el reciclaje de elementos.

JUSTIFICACIÓN

La laguna costera de Chacmochuch es un Área Natural Protegida estatal característica de la región del Caribe mexicano, de importancia ecológica al ser el hábitat de diversas especies y la cual brinda los servicios ambientales a las comunidades adyacentes. Sin embargo, el crecimiento poblacional, la contaminación por lixiviados del antiguo relleno sanitario, el turismo y las actividades pesqueras, han incrementado los cambios y la introducción de contaminantes como los metales pesados, lo que la convierte en un ecosistema altamente vulnerable. Debido a que estos metales son persistentes y tóxicos, es importante estudiar su bioacumulación en organismos sésiles como *T. testudinum* y en organismos móviles como los copépodos. Con base en esto se podrá tener una perspectiva a macro y micro escala de la movilidad e interacción con la biota acuática y las afectaciones a la red trófica, para posteriormente proponer y tomar medidas de mitigación y protección en pro de la salud y conservación del sistema lagunar.

HIPÓTESIS

Existe mayor concentración de metales en los sedimentos y agua en la zona suroeste respecto a la zona noroeste y estos se bioacumulan en los copépodos y en las raíces y hojas del pasto marino *T. testudinum*.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la concentración de metales no esenciales (As, Cd, Pb y Cr) y esenciales (Zn, Fe, Cu) en los sedimentos y agua, así como su bioacumulación en *T. testudinum* y en copépodos en dos zonas dentro de la laguna Chacmochuch.

Objetivos Específicos

- Cuantificar la concentración de metales presentes en agua y sedimento en dos zonas dentro de la laguna Chacmochuch.
- Cuantificar la concentración de metales presentes en el pasto marino *T. testudinum* y en los copépodos en dos zonas dentro de la laguna Chacmochuch.
- Calcular los factores de bioacumulación para *T. testudinum* y los copépodos en dos zonas de la laguna Chacmochuch.
- Analizar la relación de las concentraciones de metales en el medio acuático y en los sedimentos con respecto de la concentración de bioacumulación en *T. testudinum* y los copépodos.

CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Proceso de lavado del material

El volumen de los botes de polietileno de alta densidad utilizados en campo para tomar y resguardar las muestras fue de 1 litro. Previo a la salida de campo, se lavaron con detergente libre de fosfatos y se enjuagaron con agua Milli-Q. Una vez secos, se llenaron con ácido nítrico (HNO_3) al 65%, se cerraron y se dejaron reposar durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se vaciaron, se enjuagaron con agua Milli-Q, se secaron y se etiquetaron (Yañez, 2020).

2.2. Diseño de muestreo

El diseño de muestreo se basó principalmente en dos zonas localizadas paralelas al litoral en la zona noroeste y suroeste de la laguna (Figura 2.6). Cada zona contiene siete sitios de interés, con una distancia próxima de 700 m entre cada sitio, cuya geolocalización se presenta en la Tabla 2.3. Los sitios de muestreo se determinaron a priori por contener las cuatro matrices de interés: agua, sedimento, *T. testudinum* y copépodos.

Tabla 2.3. Coordenadas geográficas de los sitios de estudio en la laguna Chacmochuch.

Sitios de la zona 1	Coordenadas geográficas	
P1	21°23'27.05" N	86°53'7.33" O
P2	21°23'5.48" N	86°53'6.83" O
P3	21°22'44.01" N	86°53'1.50" O
P4	21°22'22.73" N	86°52'54.61" O
P5	21°22'1.16" N	86°52'47.99" O
P6	21°21'39.37" N	86°52'46.27" O
P7	21°21'19.10" N	86°52'36.67" O
Sitios de la zona 2		
P8	21°16'29.44" N	86°51'15.46" O
P9	21°16'11.26" N	86°51'16.38" O
P10	21°15'49.01" N	86°51'14.74" O
P11	21°15'30.01" N	86°51'6.57" O
P12	21°15'8.96" N	86°50'58.72" O
P13	21°15'5.36" N	86°50'39.57" O
P14	21°14'55.85" N	86°50'21.01" O

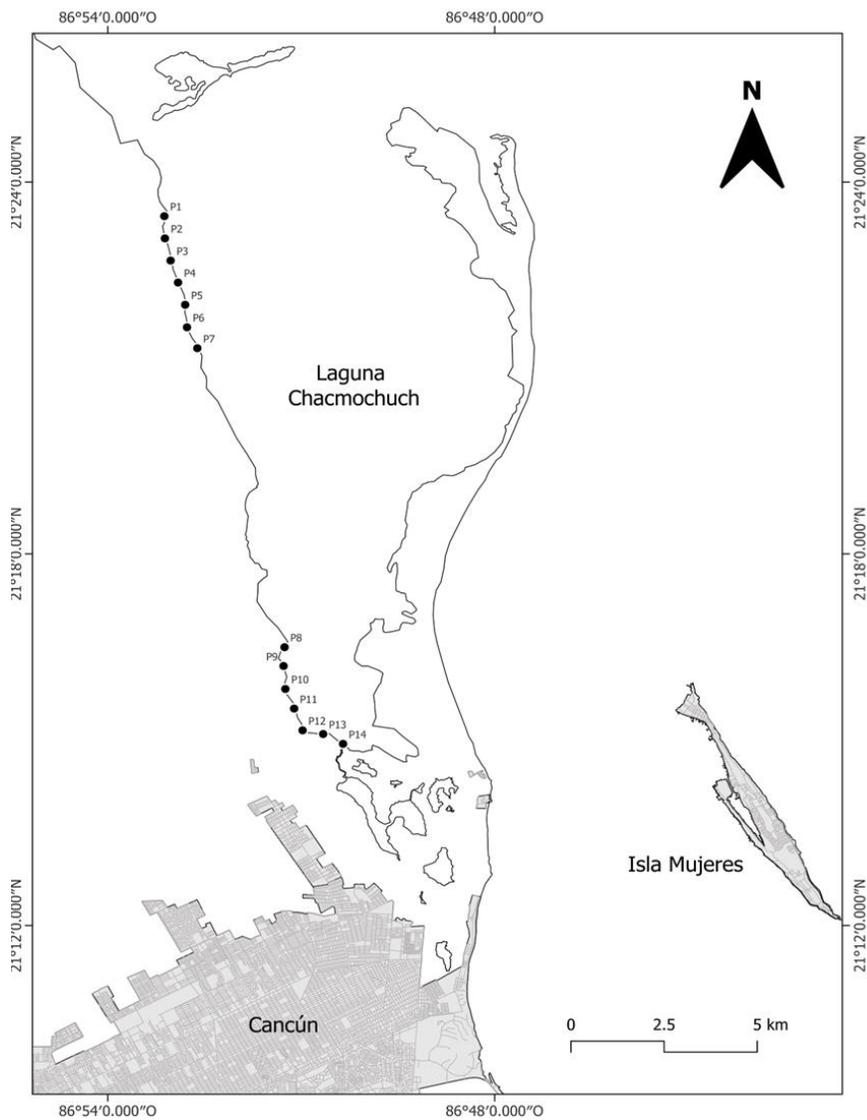


Figura 2.6. Ubicación de los sitios de muestreo en la laguna Chacmochuch.

La selección de las zonas se realizó debido a sus características contrastantes. Por un lado, la zona suroeste se encuentra cercana a la urbanización de la ciudad de Cancún, por lo que los vertidos y las infiltraciones de lixiviados que provienen de los rellenos sanitarios o las descargas de agua residuales la convierten en una zona susceptible al impacto antropogénico y figuran como posibles fuentes de elementos metálicos hacia la laguna. Por otro lado, la zona noroeste se encuentra cerca de la boca de la laguna, presentando salinidades más altas debido a la influencia del Mar Caribe y con menor efecto de la contaminación antropogénica.

2.3. Colecta de muestra

2.3.1. Parámetros fisicoquímicos

En las dos zonas se registraron los parámetros de pH, la salinidad (ppm) y la temperatura (°C) mediante una sonda multiparamétrica Hanna (HI98195); se realizaron 20 lecturas *in situ* de cada parámetro en un minuto de acuerdo con la metodología propuesta por Cejudo *et al.*, (2020).

2.3.2. Proceso para tomar la muestra de agua

En cada sitio, se tomó la botella de polietileno de alta densidad, se lavó y se colectó 1 L de muestra. Las botellas se colocaron en una hielera para su traslado al laboratorio donde se almacenaron en el refrigerador para su posterior procesamiento (Demidof *et al.*, 2022).

2.3.3. Proceso para tomar la muestra de los sedimentos

Los sedimentos fueron colectados mediante un núcleo pequeño, cuyo diámetro fue de 5 cm con una altura de 19.5 cm. Se introdujo a una profundidad aproximada de 15 a 20 cm y con el tapón se hizo presión en el mismo para poder extraerlo con menor esfuerzo de los sedimentos de la laguna. Las muestras se resguardaron en una bolsa Ziploc previamente etiquetada, para almacenarse en una nevera con hielo y transportarse al laboratorio donde se resguardaron en el congelador hasta su tratamiento.

2.3.4. Proceso para tomar la muestra de *T. testudinum*

Las muestras de *T. testudinum* se extrajeron con un núcleo cuyo diámetro fue de 7.5 cm con una altura de 49.5 cm, que se introdujo en la pradera a una profundidad aproximada de 20 cm para extraer tanto las hojas como las raíces. En campo, se extrajeron del núcleo, se lavaron con agua de la laguna para retirar los excesos de sedimentos y se resguardaron en una bolsa Ziploc grande previamente etiquetada.

Las bolsas con las muestras de pasto se trasladaron al laboratorio en una nevera con hielo; al llegar, se resguardaron en el congelador hasta su procesamiento.

2.3.5. Proceso para tomar la muestra de copépodos

El proceso para tomar las muestras de los copépodos se realizó mediante el arrastre de la red para zooplancton Wisconsin (cuya apertura es de 45 μm) a una distancia aproximada de 6 metros para

obtener dos muestras de 100 ml cada una, a las que se les añadió 5 ml de formaldehído al 37% para preservar las muestras en el sitio. Las muestras preservadas se almacenaron a temperatura ambiente hasta que fueron procesadas.

2.4.Método para preservar y digerir las muestras de agua

Del litro de muestra tomada en campo, únicamente se preservaron 120 ml en la campana de extracción de gases biocientífica (LT80051). Para añadir los 120 μ L de ácido a las muestras, se utilizaron dos pipetas Corning Lambda Plus, de 100/1000 μ L y de 0.5/10 μ L hasta alcanzar el pH 2.03, que fue medido con el potenciómetro Hanna (HI98129) (Demidof *et al.*, 2022).

Si el pH del agua no se mantenía en 2.03 transcurridas 24 h, se agregó más ácido a las muestras hasta alcanzar el pH deseado y se resguardaron nuevamente en refrigeración.

2.5.Método para secar y digerir las muestras de los sedimentos

Los 400 g de peso húmedo de la muestra de sedimento correspondiente a cada punto muestreado, fue colocado en charolas de papel estraza para su secado a la temperie, esperando que los excesos de agua con las que llegaron las muestras se absorbieran o evaporaran. Posteriormente, las charolas se introdujeron en el horno MRC (DK 500) durante 24 h para secar los sedimentos a 60°C. Fue necesario tamizar las muestras con una malla plástica (≤ 2 mm), para homogeneizar los sedimentos. Del total de la muestra, únicamente 1 g fue necesario para la digestión, peso obtenido por medio de la balanza analítica OHAUS Adventurer (AP2140) y se resguardó en criotubos de 5 ml hasta su digestión (Demidof *et al.*, 2022).

Para llevar a cabo la digestión, se tomó como guía el método 3050 B de la U.S.EPA (1996). Cada muestra se colocó en un tubo Falcon de 45 ml, se añadió 5 ml de ácido nítrico y 1 ml de peróxido de hidrógeno (con un porcentaje de pureza del 65% y del 32%, respectivamente). El efecto efervescente fue notorio y los tubos se calentaron debido a la reacción, por lo que se dejaron reposar durante 24 h previo a llevarlos al baño maría durante 2 horas a 95 °C en la campana de extracción de gases biocientífica (LT80051). Posteriormente, las muestras se filtraron con los filtros de jeringa Millipore Hydrophilic PVDF Millex-HV de 0.45 μ m y fueron aforadas con agua desionizada hasta alcanzar un volumen de 25 ml.

2.6.Método para limpiar, secar y digerir las muestras de *T. testudinum*

Cada muestra se lavó con agua purificada hasta eliminar los excesos de arena y otros componentes que contenían las muestras (conchas, algas, etc.) y se dividieron en dos grupos: 1) hojas y 2) raíces (Figura 2.7). Además del lavado, las hojas se limpiaron por medio de raspado con un portaobjetos para eliminar toda la materia orgánica, epífitas y calcáreas que contenían. Las hojas y raíces que se encontraban marchitas o secas, no se incluyeron en las muestras.



Figura 2.7. A) Hojas y B) Raíces de *T. testudinum* lavadas y separadas. Fotografías de Adriana Hernández-Pérez (2023).

Cada una de las muestras (hojas y raíces) se colocaron por separado en charolas de papel estraza y se introdujeron al horno de secado MRC (modelo DK 500) durante 24 horas a una temperatura de 60°C. Posteriormente, las hojas y raíces se hicieron polvo con ayuda de un mortero de mármol, se pesaron 0.5 g con la balanza analítica OHAUS Adventurer (AP2140) y se resguardaron en criotubos de 5 mL hasta su digestión (Whelan III *et al.*, 2005 y Valdespino-Saenz, 2005).

Para llevar a cabo la digestión, se tomó como guía el método 3050 B de la U.S.EPA (1996). Cada muestra se colocó en un tubo Falcon de 45 ml, se añadió 5 ml de ácido nítrico y 1 ml de peróxido de hidrógeno (con un porcentaje de pureza del 65% y del 32%, respectivamente), el efecto efervescente fue notorio y los tubos se calentaron debido a la reacción, por lo que se dejaron reposar durante 24 h previo a llevarlos al baño maría durante 2 horas a 95 °C en la campana de extracción de gases biocientífica (LT80051). Posteriormente, las muestras se filtraron con los filtros de jeringa Millipore Hydrophilic PVDF Millex-HV de 0.45 µm y fueron aforadas con agua desionizada hasta alcanzar un volumen de 10 ml.

2.7.Método para separar, limpiar y digerir las muestras de los copépodos

De las muestras de 100 ml, con ayuda de una pipeta Pasteur de 3 ml se tomó muestra del fondo y se colocó en una caja Petri pequeña de plástico para su observación en el microscopio óptico compuesto NIKON Eclipse (E2000).

Las muestras se limpiaron (Figura 2.8) con la finalidad de obtener únicamente a los copépodos separados por puntos en pozas de 2 ml.

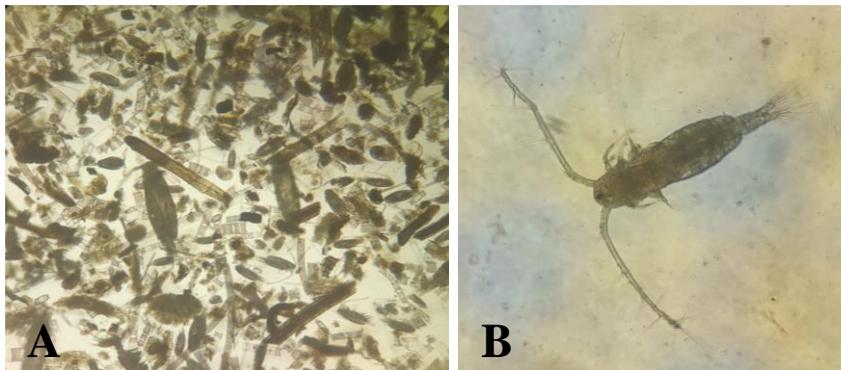


Figura 2.8. A) Muestra de copépodos sin separar, tomadas del fondo de los botes de 100 ml utilizados en campo; B) Copépodo separado en poza. Fotografía tomada por Adriana Hernández-Pérez (2023).

Los copépodos se depositaron en tubos de 1.5 ml tipo Eppendorf con tapa para “lavarlos” por triplicado con agua desionizada y, con la centrífuga refrigerada Hermle Labortechnik (Z216MK), a 12,000 rpm, a una temperatura de 20°C durante 10 minutos, se generó una pastilla pequeña al fondo del tubo que contenía únicamente a los organismos y se desechó el sobrenadante.

En cuanto a la digestión, se realizó en la campana de extracción de gases biocientífica (LT80051), donde tanto ácido nítrico (5ml) como agua desionizada (5ml) se agregaron en una solución 1:1 a los tubos, los cuales, se calentaron un par de horas a 95°C (Demidof *et al.*, 2022). Para finalizar, las muestras se aforaron con agua desionizada a un volumen de 2 ml.

El número de organismos designado para el estudio de la bioacumulación de metales dependió mucho de la cantidad hallada en cada punto de muestreo y no se estableció una cantidad como base (Tabla 3.9) con la finalidad de ampliar las probabilidades para cuantificar metales en los copépodos.

2.8. Análisis de metales

Para determinar las concentraciones de los metales en cada una de las matrices, las muestras se analizaron por medio de la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) por medio de dos métodos: de flama y de grafito. Los límites de detección para cada método se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.4. Límites de detección del equipo de Absorción Atómica para los métodos de flama (FAA) y grafito (GFAA).

Metales	Límite de detección del método		Referencia
	Flama (mg·L ⁻¹)	Grafito (µg·L ⁻¹)	
Cu	1	-	Rubio-Franchini <i>et al.</i> , 2016
Fe	5	-	Rubio-Franchini <i>et al.</i> , 2016
Pb	-	0.05	Rubio-Franchini <i>et al.</i> , 2016
Zn	1	-	Rubio-Franchini <i>et al.</i> , 2016
Cr	-	0.372	Garza-León <i>et al.</i> , 2023
As	-	0.05	López-Gutiérrez <i>et al.</i> , 2018
Cd	-	0.002	Rubio-Franchini <i>et al.</i> , 2016

Las concentraciones del As, Cd, Cr y Pb en las raíces y hojas de *T. testudinum* se analizaron por medio del método de horno de grafito (GFAA), así como las concentraciones del As, Cd, Cu, Cr y Pb en copépodos. Las matrices restantes se analizaron por medio del método de flama (FAA).

2.9.Cálculo de los factores de bioacumulación (FBA) en *T. testudinum* y en los copépodos

De acuerdo con el Método 3050 B de la U.S.EPA (1996), las muestras de sedimento y de *T.testudinum* se deberán trabajar en seco para evitar una variación en las concentraciones de los elementos metálicos a analizar, por lo que se deben diluir a un volumen conocido y procesar por medio de diferentes métodos analíticos entre los que se encuentra la Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA). Los resultados arrojados por este método (mg·L⁻¹) se deben transformar a peso seco de la muestra (mg·kg⁻¹) como se presenta a continuación con la fórmula de Beste (2019).

$$\frac{mg \text{ metal}}{kg} = \frac{\left[RAEo \left(\frac{mg}{L} \right) * \frac{V.F.A (L)}{A.T (L)} * V.PD (L) \right]}{PSM (kg)}$$

Donde:

$RAEo$ = Concentración arrojada por el equipo de análisis (mg/L)

$V.F.A$ = Volumen final al que se aforó la muestra (L)

$A.T$ = Alícuota con la que se va a trabajar (L)

$V.PD$ = Volumen posterior a la digestión (L)

PSM = El peso de la muestra posterior al secado (kg)

Los resultados del peso seco ($mg \cdot kg^{-1}$) obtenidos por medio de la fórmula anterior, serán de utilidad para determinar los Factores de Bioacumulación (FBA) en las plantas, ya que de acuerdo con Covarrubias y Cabriales (2017) se determinan de la siguiente manera:

$$FBC = \frac{\text{Concentración de metal en el tejido } \left(\frac{mg}{kg}\right)}{\text{Concentración del metal en el sedimento } \left(\frac{mg}{kg}\right)}$$

En los copépodos, para poder determinar los FBA y previo a llevar a cabo su digestión, se tomaron a los organismos más representativos de las muestras de acuerdo con su número y se colocaron en un portaobjetos para su observación. En todos los puntos muestreados se identificaron las tres ordenes más destacadas de los sistemas acuáticos de acuerdo con la literatura: Harpacticoida, Calanoida y Cyclopoida (Figura 2.9).

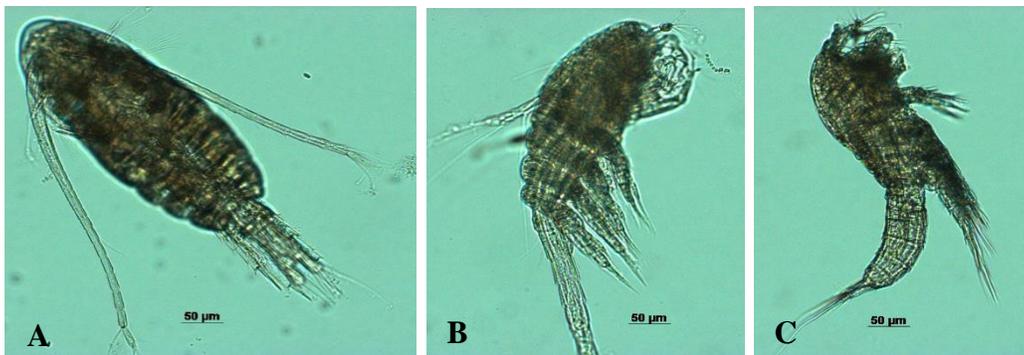


Figura 2.9. Copépodos colectados en la laguna Chacmochuch: a) Orden Calanoida (P10), b) Orden Cyclopoida (P13) y c) Orden Harpacticoida (P9). Fotografías tomadas por Jesús Alvarado-Flores (2023).

Posteriormente, se obtuvieron las medidas del largo (μm) de cada organismo por sitio de estudio usando la fórmula de peso seco propuesta por Dumont *et al.* (1975) (Tabla 2.6). Con dichos datos,

se obtuvo la concentración del metal en el peso seco de los organismos y finalmente se relacionó con las concentraciones cuantificadas en el agua ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) mediante la fórmula propuesta por Walker (2012) para los FBA.

Tabla 2.6. Fórmulas para determinación del peso seco de los copéodos (Dumont *et al.*, 1975).

Orden	Fórmula
Calanoida	$W = 7.9 \times 10^{-7} L^{2.33}$
Cyclopoida	$W = 1.1 \times 10^{-7} L^{2.59}$
Harpacticoida	$W = 12.51 L^{4.4}$

Fórmula de Walker (2012) para determinación de los Factores de Bioacumulación (FBA):

$$FBA = \frac{\text{Concentración del metal en el organismo}}{\text{Concentración del metal en el medio acuático}}$$

2.10. Análisis de datos

Para determinar diferencias entre las zonas sobre la concentración de los metales en las diferentes matrices, se realizó una prueba estadística U de Mann Whitney ($\alpha = 5\%$).

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Agua

3.1.1. Parámetros fisicoquímicos

El pH registrado de la laguna Chacmochuch fue alcalino para ambas zonas. Los valores de temperatura se incrementaron de 28.83°C de la zona 1 a 30.73°C hacia la zona 2, ya que el muestreo se realizó a tempranas horas del día, partiendo de la zona 2 y finalizando por la tarde con el punto 1 de zona 1. La salinidad en la zona 1 (noroeste) es más alta con respecto a la zona 2 (suroeste) como se observa en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Valores promedio \pm D.E del pH, salinidad y temperatura del agua por zonas de Chacmochuch

Zonas	pH	Salinidad (PSU)	Temperatura (°C)
Zona 1	8.14 \pm 0.06	38.47 \pm 4.57	30.73 \pm 0.87
Zona 2	8.09 \pm 0.14	32.68 \pm 1.13	28.83 \pm 0.28

3.1.2. Cuantificación de las concentraciones de metales en el agua

En las muestras de agua de la laguna Chacmochuch, se analizaron seis metales: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn). La concentración del cromo se encontró por debajo del límite de detección del equipo de Absorción Atómica (AA). Dicha información en conjunto con las concentraciones promedio por zona de los seis metales cuantificados se encuentran en el Anexo 1.

En cuanto a los metales presentes en la laguna, se registró el siguiente orden de acuerdo con la concentración: Fe > Pb > Zn > As > Cu > Cd, siendo el Fe el metal con mayor concentración (0.331 mg·L⁻¹) y el Cd el de menor concentración (0.016 mg·L⁻¹).

En la Figura 3.10, se reporta que el As, Cd, Cu, Fe y Zn presentan concentraciones más altas en la zona 1 respecto a la zona 2. Sin embargo, al realizar el estadístico de prueba U de Mann Whitney únicamente para el As, Cu, Fe y Zn se determinaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). Lo que indica es que en la zona 1 las concentraciones de estos metales (As, Cu, Fe y Zn) son mayores en comparación con la zona 2. La concentración promedio del Pb en ambas zonas fue de

0.10 mg·L⁻¹. El Cd aun cuando no presentó diferencias estadísticas significativas ($\rho > 0.05$) entre zonas, se puede observar que la zona 1, tiene mayor concentración de este elemento con un valor máximo de 0.03 mg·L⁻¹, comparado con la zona 2, cuyo valor máximo es de 0.02 mg·L⁻¹. Los datos estadísticos de cada metal se presentan en el Anexo 6.

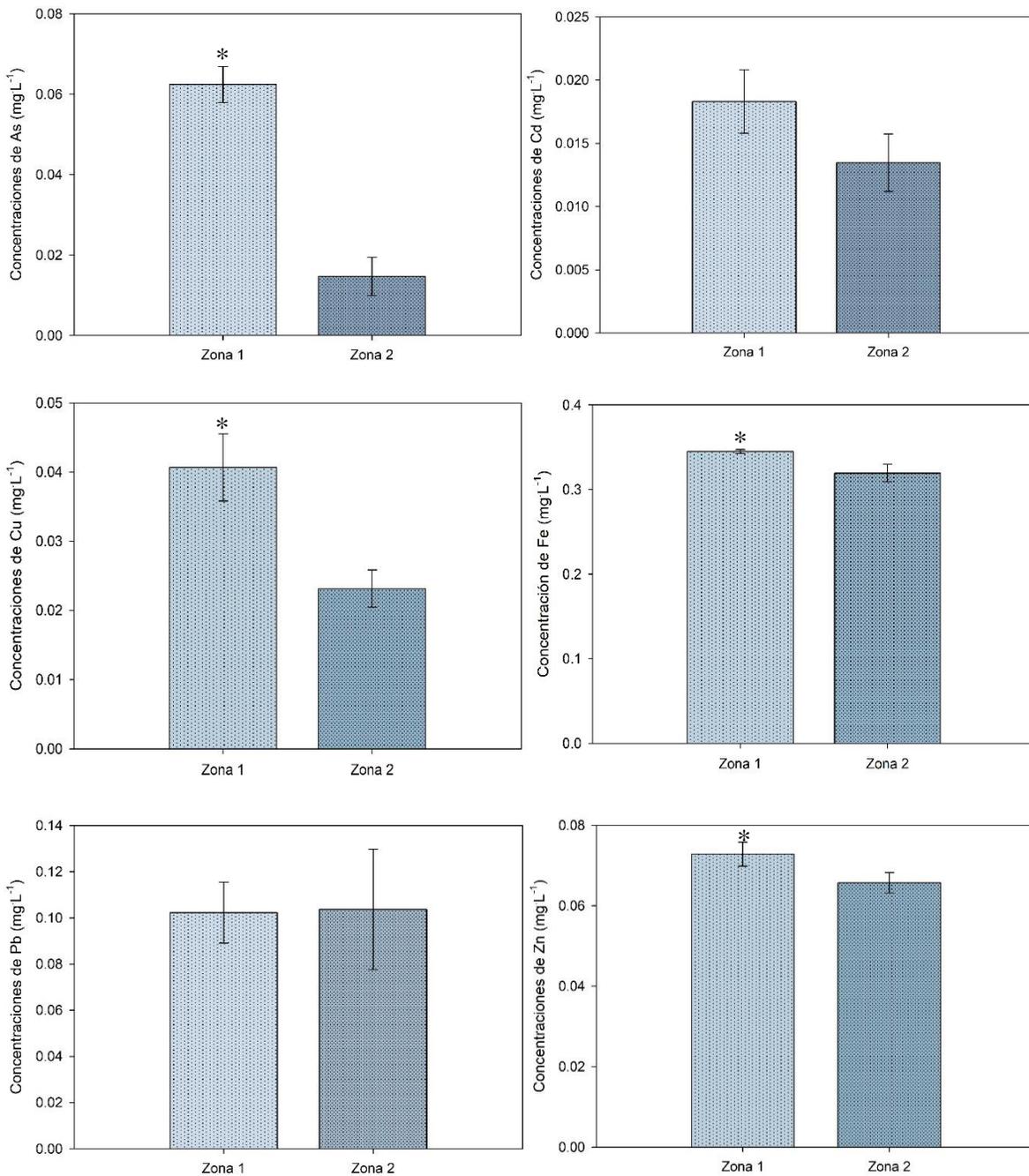


Figura 3.10. Concentraciones (mg·L⁻¹) de As, Cd, Cu, Fe, Pb y Zn presentes en el agua de la laguna Chachochuch por zona. El asterisco (*) representa la diferencia estadística de $\rho < 0.05$.

3.2.Sedimentos

3.2.1. Características generales

Los sedimentos de la laguna mostraron características generales como textura, color y olor, por lo que los registros realizados durante su procesamiento se presentan por zona en la Tabla 3.8. En la Figura 3.11, se muestran las fotografías más representativas de la zona 1 (Figura 3.11 A) y de la zona 2 (Figura 3.11B).

Tabla 3.8. Descripción de los sedimentos de la laguna Chacmochuch por zona.

Zonas	Características	INEGI (2013)
Zona 1	Se identificó un sedimento fino al tacto, arenoso, de color beige, con conchillas y libre de olores sulfurosos.	El sedimento es de tipo solonchak.
Zona 2	Se identificó un sedimento grueso, rasposo al tacto, con rocas, arena, conchillas, laja, de color oscuro y con un olor a azufre o materia orgánica en descomposición.	El sedimento es de tipo solonchak.

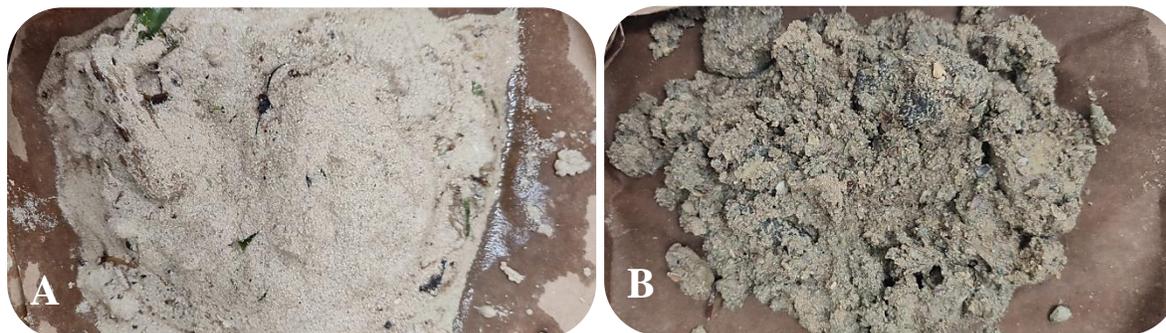


Figura 3.11. Sedimentos de la laguna Chacmochuch: A) zona 1 y B) zona 2.

3.2.2. Cuantificación de las concentraciones de metales en el sedimento

En los sedimentos de la laguna se reporta la presencia de siete metales: As, Cd, Cu, Cr, Fe, Pb y Zn. De acuerdo con los resultados obtenidos (Figura 3.12), el orden creciente de las concentraciones de los metales cuantificados en los sedimentos de la laguna Chacmochuch son: As

> Cr > Fe > Pb > Cd > Cu > Zn. El As es el metal de mayor concentración en los sedimentos (1,349.41 mg·kg⁻¹) y el Zn el de menor concentración (2.27 mg·kg⁻¹). En cuanto a las concentraciones por zonas; en la zona 1, las concentraciones de As, Cd, Cr y Fe son superiores con respecto a las registradas en la zona 2. Las concentraciones del Cu, Pb y Zn en contraste, son mayores en la zona 2 en comparación con la zona 1. Al realizar el estadístico U de Mann Whitney, se presentaron diferencia estadística solo en las concentraciones del Cd y Cr ($\rho < 0.05$), siendo en la zona 1 donde se cuantificó la mayor concentración (Anexo 6).

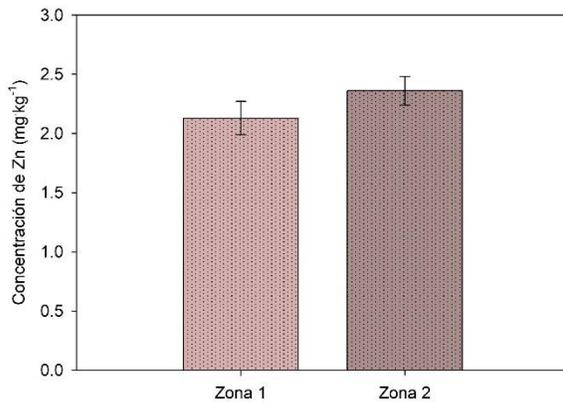
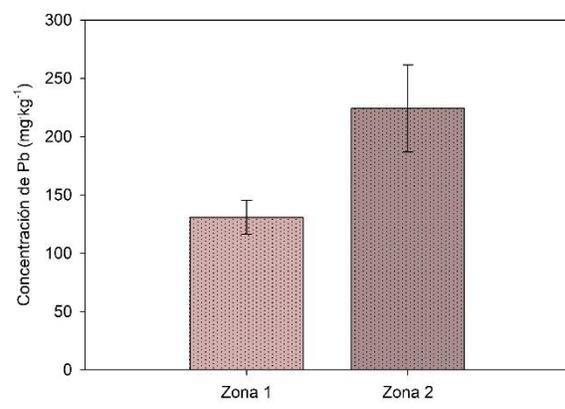
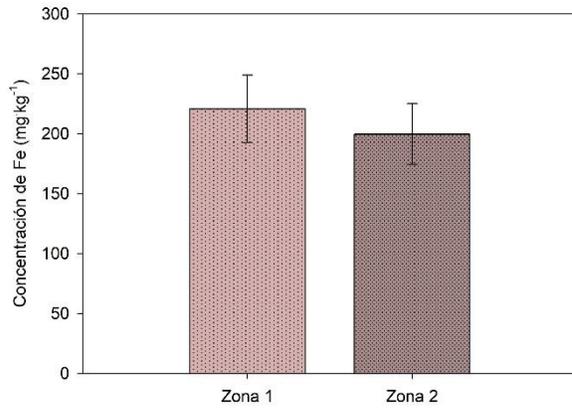
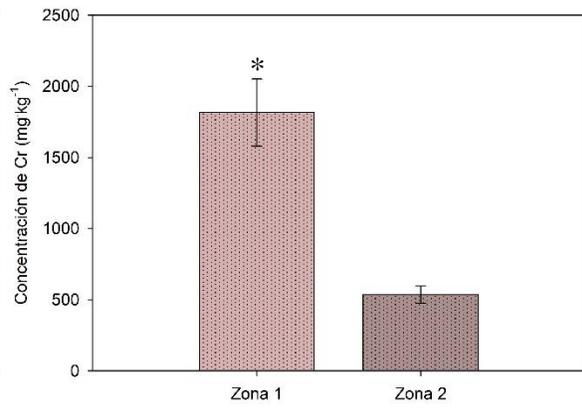
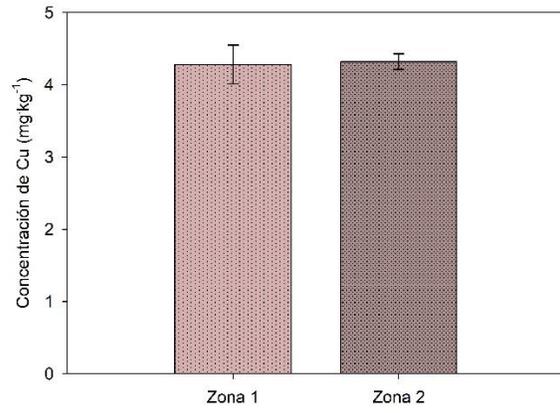
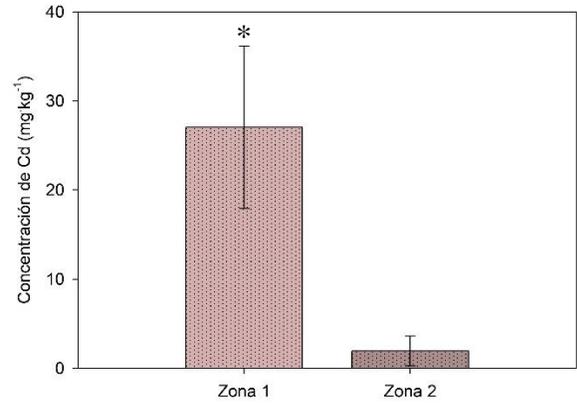
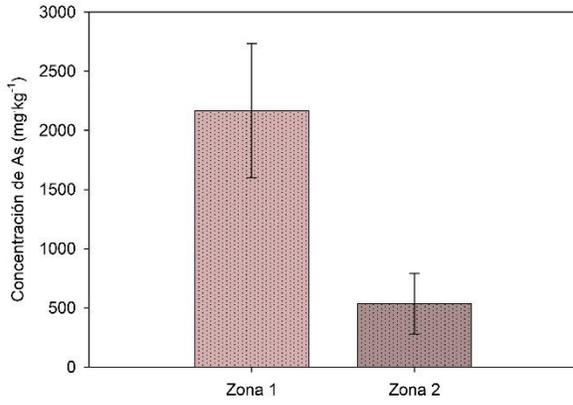


Figura 3.12. Concentraciones de As, Cd, Cu, Cr, Fe, Pb y Zn ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, peso seco) en sedimentos de la laguna Chacmochuch por zona. El asterisco (*) representa la diferencia estadística de $p < 0.05$.

En cuanto a la concentración del As en los sedimentos el valor máximo en la zona 1 fue de $4032.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y el valor máximo de la zona 2 fue de $1726 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, aunque no se registró diferencia estadística significativa. En el Pb el valor máximo que se registró en la zona 2 ($345 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) es dos veces el valor máximo de la zona 1 ($172.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Esto indica que la zona 1 está más contaminada con As y la zona 2 con Pb. Los valores promedio de las concentraciones de As, Cd, Cu, Cr, Fe, Pb y Zn en los sedimentos de la zona 1 y de la zona 2 se encuentran en el Anexo 2.

3.3. Cuantificación de las concentraciones de metales en *T. testudinum*

En la Figura 3.13 se presentan las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn) registradas en las hojas y raíces de *T. testudinum*.

El orden de mayor a menor de acuerdo al promedio de las concentraciones de los metales cuantificados es el siguiente: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd}$ en hojas y $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd}$ en las raíces. Siendo el Fe el metal con mayor concentración en hojas ($30.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y raíces ($35.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y el Cd el de menor concentración ($0.023 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en hojas y $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en raíces).

En cuanto al registro en las hojas por zonas, el Cd y Cu se cuantificaron en mayor concentración en la zona 1 con respecto a la zona 2 y las concentraciones del As, Cr y Zn son mayores en la zona 2. Sin embargo, al realizar el estadístico de prueba U de Mann Whitney únicamente el Cu y el As presentaron diferencias estadísticas ($p < 0.05$). La concentración del Zn en las hojas, aun cuando no presentó diferencia estadística ($p > 0.05$), la zona 2 presenta valores con una mayor concentración, siendo su valor máximo de $13.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respecto al valor máximo de la zona 1 ($5.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Las concentraciones del Cd, Cr, Fe y Pb en esta matriz son similares para ambas zonas.

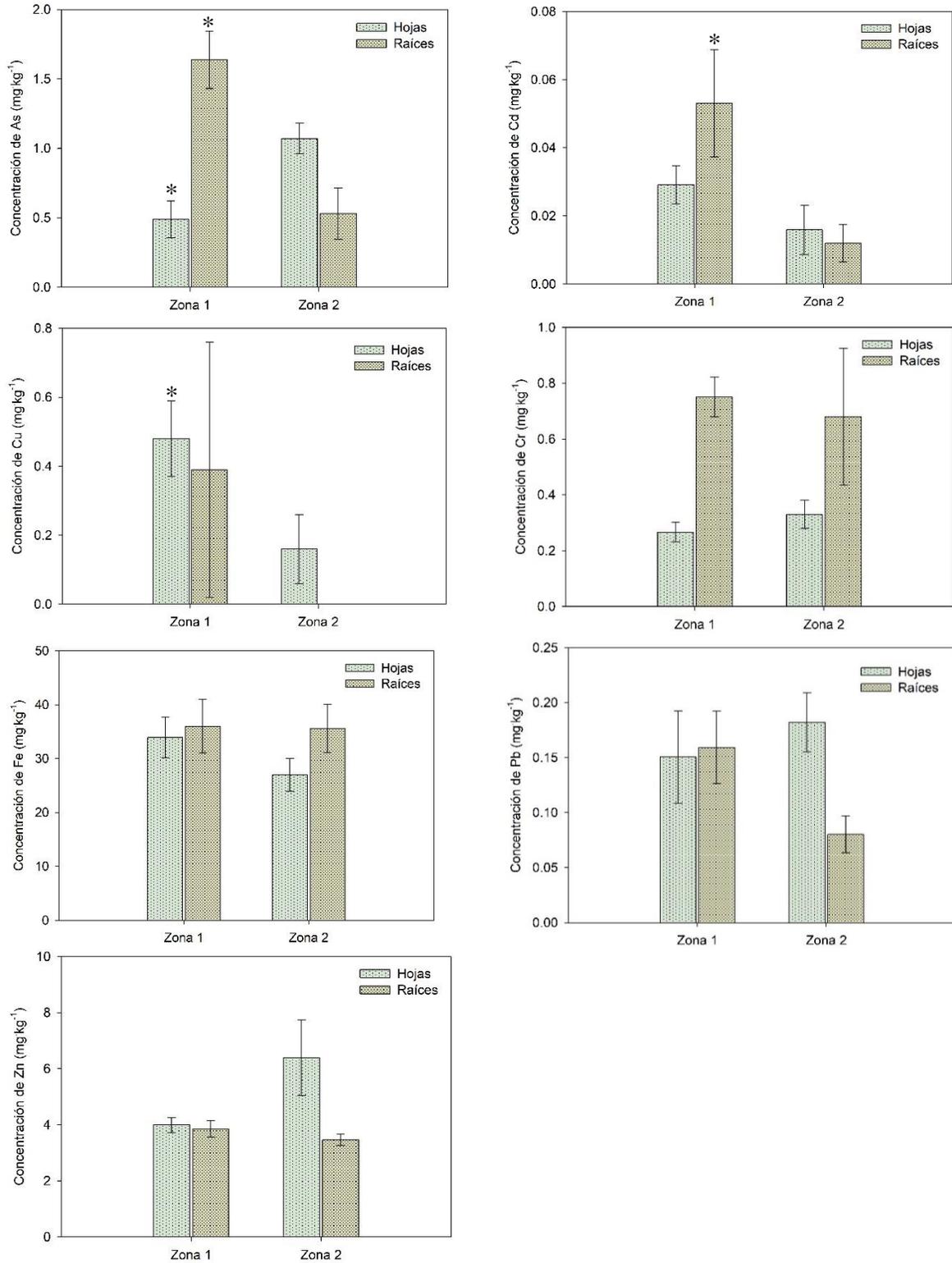


Figura 3.13. Concentraciones de As, Cd, Cu, Cr, Fe, Pb y Zn (mg·kg⁻¹, peso seco) en hojas y raíces de *T. testudinum* de la laguna Chacmochuch por zona. El asterisco (*) representa la diferencia estadística de $p < 0.05$.

En las raíces, las concentraciones del As, Cd, Cr, Pb y Zn son mayores en la zona 1. Sin embargo, al realizar el estadístico de prueba U de Mann Whitney, únicamente se obtuvo diferencia estadística en las concentraciones del As y Cd ($\rho < 0.05$), lo que indica una mayor concentración en la zona 1 respecto a la zona 2 para los dos metales. Las concentraciones del Pb y Fe no presentaron diferencia estadística ($\rho > 0.05$) entre zonas. Sin embargo, en el Pb se puede observar que en la zona 1 se ha cuantificado una mayor concentración, siendo un valor máximo de $0.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respecto al valor máximo de la zona 2 que es de $0.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Finalmente, con el Cu únicamente se determinó su concentración en la zona 1 ($0.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Los valores promedio de las concentraciones de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb y Zn en hojas y raíces de *T. testudinum* de la zona 1 y de la zona 2 se encuentran en el Anexo 3. La información de la prueba estadística aplicada en hojas y raíces se presenta en el Anexo 6.

3.4. Cuantificación de las concentraciones de metales en copépodos

En la laguna Chacmochuch se registraron los ordenes Harpacticoida, Cyclopoida y Calanoida, que son característicos de los cuerpos lagunares y se obtuvieron 83 organismos en la zona 1 y 181 organismos en la zona 2. Se cuantificaron las concentraciones del Cd, Cr, Cu, Fe y Zn ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, peso seco por organismo). Las concentraciones del As en copépodos se encontraron por debajo del límite de detección del equipo, así como las de Pb donde se cuantificaron concentraciones en tres puntos dentro de la zona 1, considerándose información insuficiente para realizar una comparación entre zonas (Tabla 3.9). Con base en lo anterior, en la Figura 3.14 se presentan las concentraciones del Cd, Cr, Cu, Fe y Zn para los copépodos de la laguna Chacmochuch.

Tabla 3.9. Concentraciones (mg·kg⁻¹) en peso seco de metales por organismo.

Zonas	Orden de clasificación	Organismos	Cu	Fe	Pb	Zn	Cr	As	Cd
Zona 1									
P1	Cyclopoida	11	2.110	36.364	nd	14.848	0.634	nd	0.032
P2	Harpacticoida	58	0.018	3.267	nd	2.132	0.162	nd	0.004
P3	Calanoida	55	0.147	2.316	nd	0.772	0.076	nd	0.002
P4	Harpacticoida	99	0.115	1.744	0.002	0.309	0.034	nd	0.002
P5	Harpacticoida	185	0.068	2.326	0.006	0.552	0.038	nd	0.001
P6	Calanoida	91	0.011	0.816	nd	0.115	0.018	nd	0.001
P7	Calanoida	83	0.361	2.786	0.011	0.734	0.078	nd	0.002
Media ± D.E			0.404 ± 0.76	7.088 ± 12.93	0.006 ± 0.00	2.780 ± 5.36	0.148 ± 0.21	-	0.006 ± 0.01
Zona 2									
P8	Calanoida y Harpacticoida	318	0.008	0.278	nd	0.068	0.010	nd	0.000
P9	Cyclopoida, Calanoida y Harpacticoida	159	0.268	3.069	nd	0.755	0.067	nd	0.002
P10	Calanoida	270	0.032	0.711	nd	0.165	0.015	nd	0.001
P11	Calanoida y Cyclopoida	178	0.118	2.753	nd	0.461	0.318	nd	0.001
P12	Calanoida y Cyclopoida	65	0.538	8.876	nd	3.905	0.265	nd	0.006
P13	Calanoida y Cyclopoida	164	0.200	3.155	nd	0.697	0.061	nd	0.002
P14	Calanoida y Cyclopoida	111	0.331	9.444	nd	1.615	0.701	nd	0.006
Media ± D.E			0.214 ± 0.18	4.041 ± 3.68	-	1.095 ± 1.34	0.205 ± 0.25	-	0.002 ± 0.002

nd: no detectado

Organismos: Número de organismos digeridos por vial para la cuantificación de metales

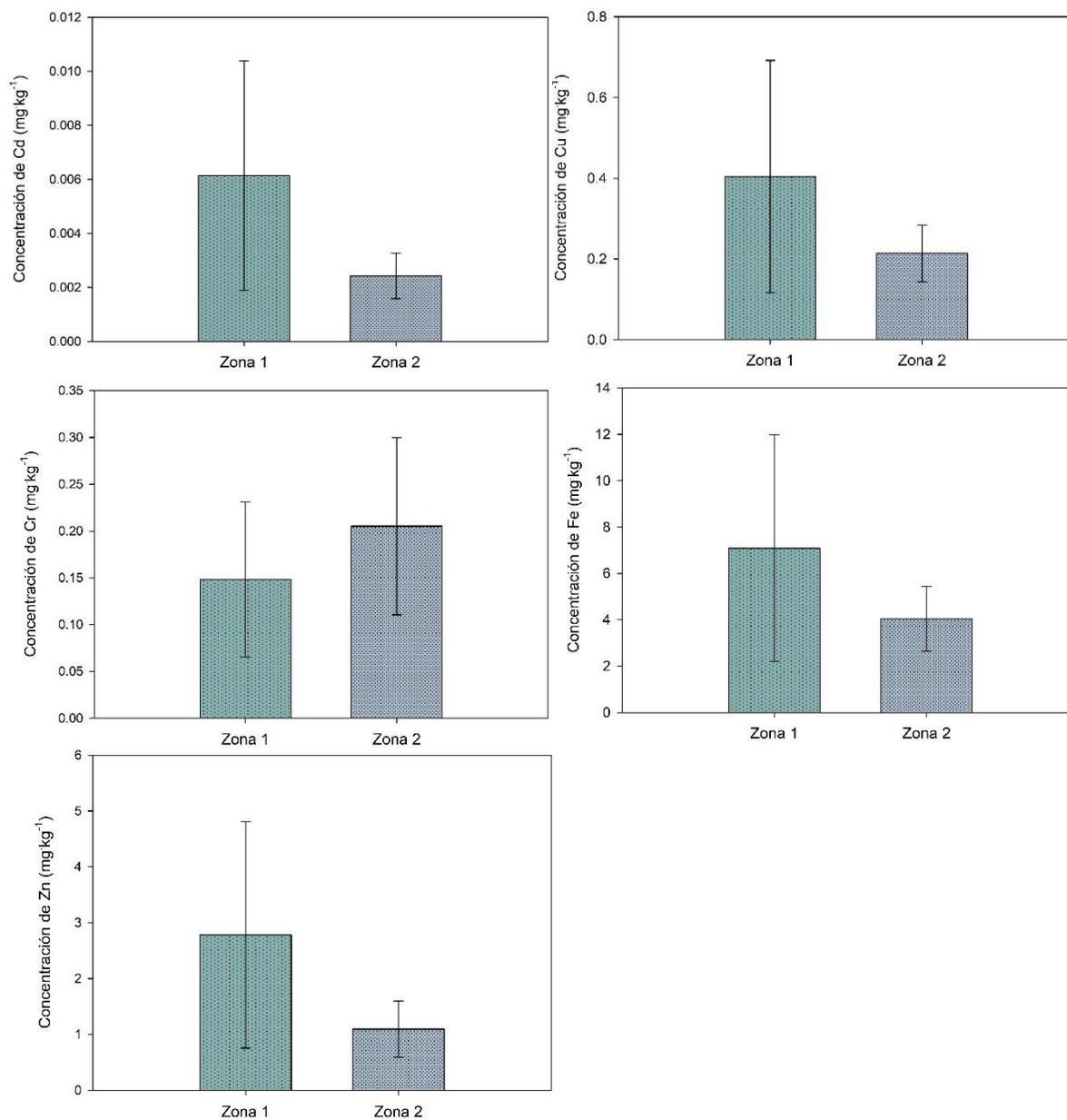


Figura 3.14. Concentraciones ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, peso seco) de Cd, Cr, Cu, Fe y Zn en copéodos de la laguna Chacmochuch ($n=7$) por zona.

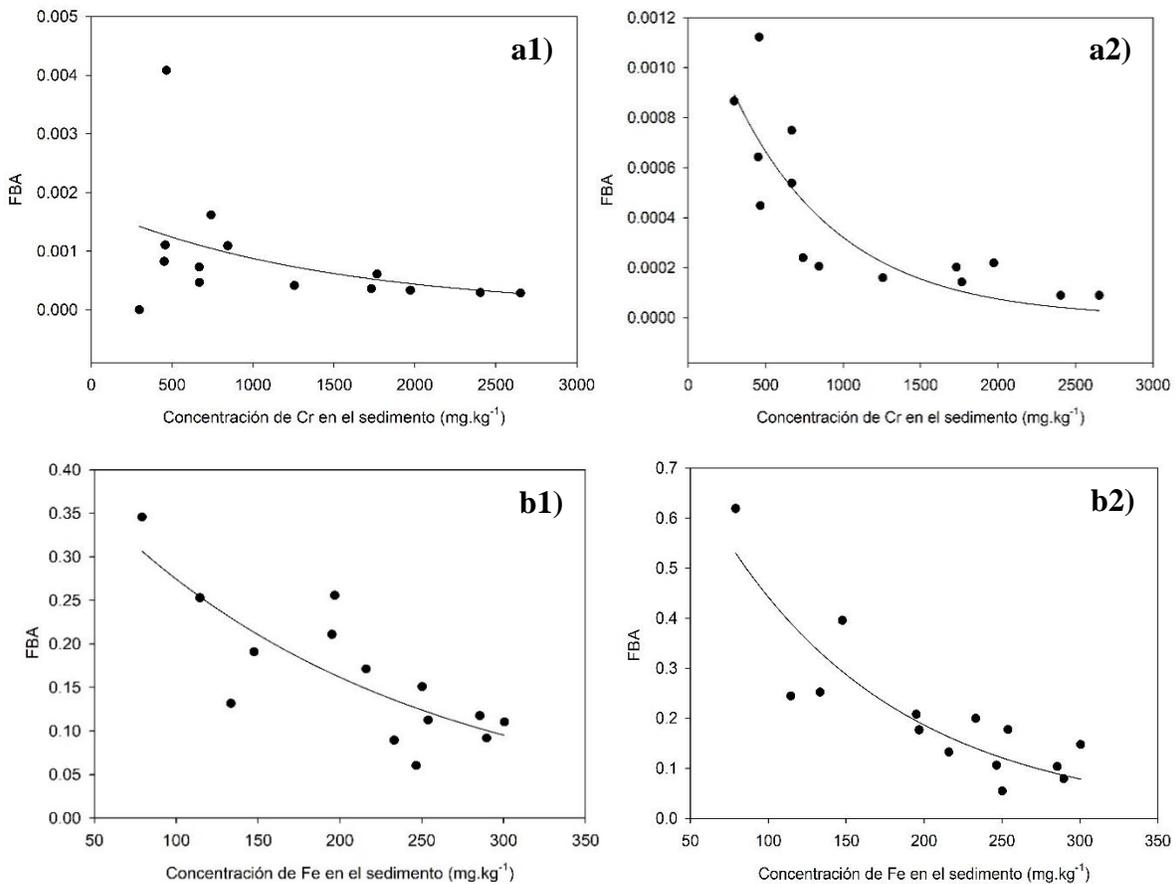
El orden creciente de las concentraciones de los metales cuantificados en los copéodos de la laguna Chacmochuch son: $\text{Fe} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cd}$. Siendo el Fe el metal con mayor concentración ($5.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y el Cd el de menor concentración ($0.004 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). En cuanto a la diferencia en las concentraciones entre zonas, se observa en la Figura 3.14 que la zona 1 tiene mayor concentración de Cd, Cu, Fe y Zn. Sin embargo, al realizar el estadístico de prueba U de Mann Whitney se

determinó que no existen diferencias estadísticas ($\rho > 0.05$), por lo que las concentraciones de Cd, Cu, Fe y Zn son similares en los copépodos de la zona 1 como en la zona 2.

3.5. Factores de bioacumulación (FBA) en *T. testudinum*

Los factores de bioacumulación (FBA) en relación con la concentración del metal en el sedimento ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), de las hojas (lado izquierdo) y raíces (lado derecho) de *T. testudinum* correspondientes al Cr, Cu, Fe, Pb y Zn se encuentran representadas en la Figura 3.15.

Debido a que algunas de las concentraciones del As y Cd en los sedimentos no se detectaron por el equipo de absorción atómica, no se aplicó la fórmula para obtener los FBA en las matrices de interés. En el caso del Cu se ha detectado en los sedimentos, pero no en las raíces por lo que únicamente se presenta la gráfica que corresponde a las hojas (Figura 3.15e1). Los datos de los FBA de los metales tanto para hojas como para raíces se encuentran en el Anexo 4.



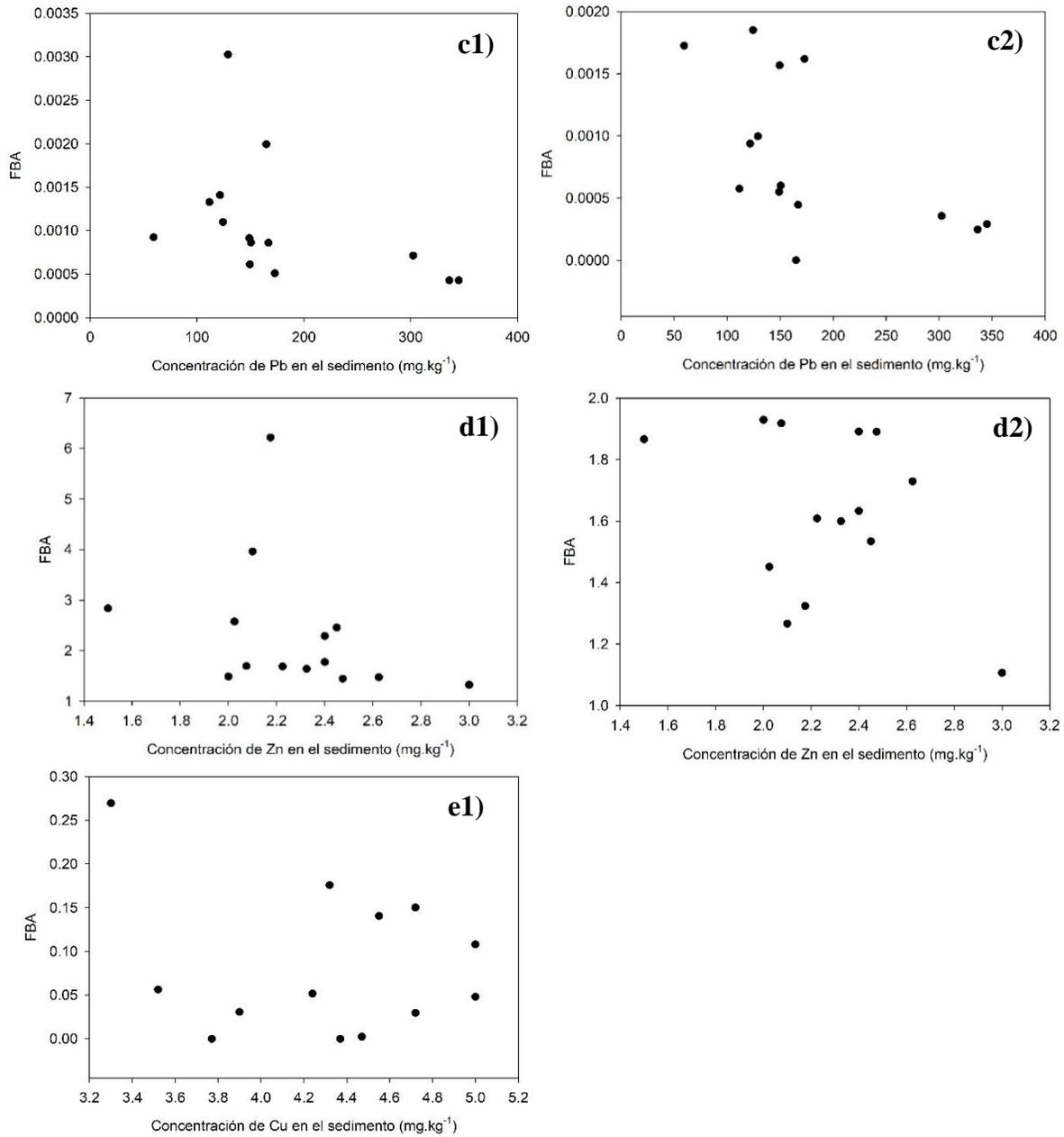


Figura 3.15. Relación de los FBA para hojas (a1, b1, c1, d1, e1) y raíces (a2, b2, c2, d2) de *T. testudinum* respecto a las concentraciones de Cr, Fe, Pb, Zn y Cu de los puntos de la zona 1 y zona 2 de la laguna Chacmochuch.

En la Figura 3.15 se determina que los FBA del Cu, Cr, Fe y Pb están por debajo del valor 1 tanto para las hojas como para las raíces, por lo que las concentraciones de los metales bioacumuladas

en los tejidos del pasto marino son pequeñas respecto a las altas concentraciones de Cu, Cr, Fe y Pb en el sedimento. Sin embargo, con el Zn se registra un comportamiento diferente al del Cr, Fe, Pb y Cu, ya que los valores de FBA son mayores al valor de 1, lo que determina que este metal se está bioacumulando en los tejidos del pasto marino *T. testudinum*, es decir las concentraciones en el pasto son más altas que el sedimento donde se encuentran habitando.

Se realizaron pruebas estadísticas U de Mann Whitney para los FBA del Fe, Pb, Zn, Cr (hojas y raíces) y Cu (hojas) entre zonas para identificar la zona donde se bioacumulan más los metales respecto a cada matriz y se encontraron diferencias estadísticas en el Cr y Cu ($p < 0.05$) en las hojas y Pb ($p < 0.05$) en las raíces. Esto indica que el Cr y Cu se bioacumulan más en las hojas de *T. testudinum* de la zona 2 y 1, respectivamente. Mientras que el Pb se bioacumula en las raíces de la zona 1.

En cuanto a la dispersión de los puntos (Figura 3.15) se determina que únicamente el Cr y Fe (hojas y raíces) representan bioacumulación con la relación de que, a menor concentración del metal en los sedimentos, mayor será el FBA e inversamente, en cuanto mayor sea la concentración en el medio, el FBA será menor. Sin embargo, en el Pb, Zn (hojas y raíces) y Cu (hojas) no se determinó relación alguna entre los FBA y la concentración en el sedimento.

3.6. Factores de bioacumulación (FBA) en copépodos

En la Figura 3.16 de los FBA de los copépodos con respecto a las concentraciones del Cd, Cu, Fe y Zn en el medio acuático, se registró que los FBA para dichos metales son menores a 1, esto significa que los copépodos de la laguna Chacmochuch tienen menor concentración de estos metales en comparación con el medio acuático. El análisis estadístico U de Mann Whitney para determinar que estos microorganismos bioacumulan más a los elementos metálicos no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$), por lo que se puede inferir que en la zona 1 y 2, los microorganismos bioacumulan los metales de forma muy similar.

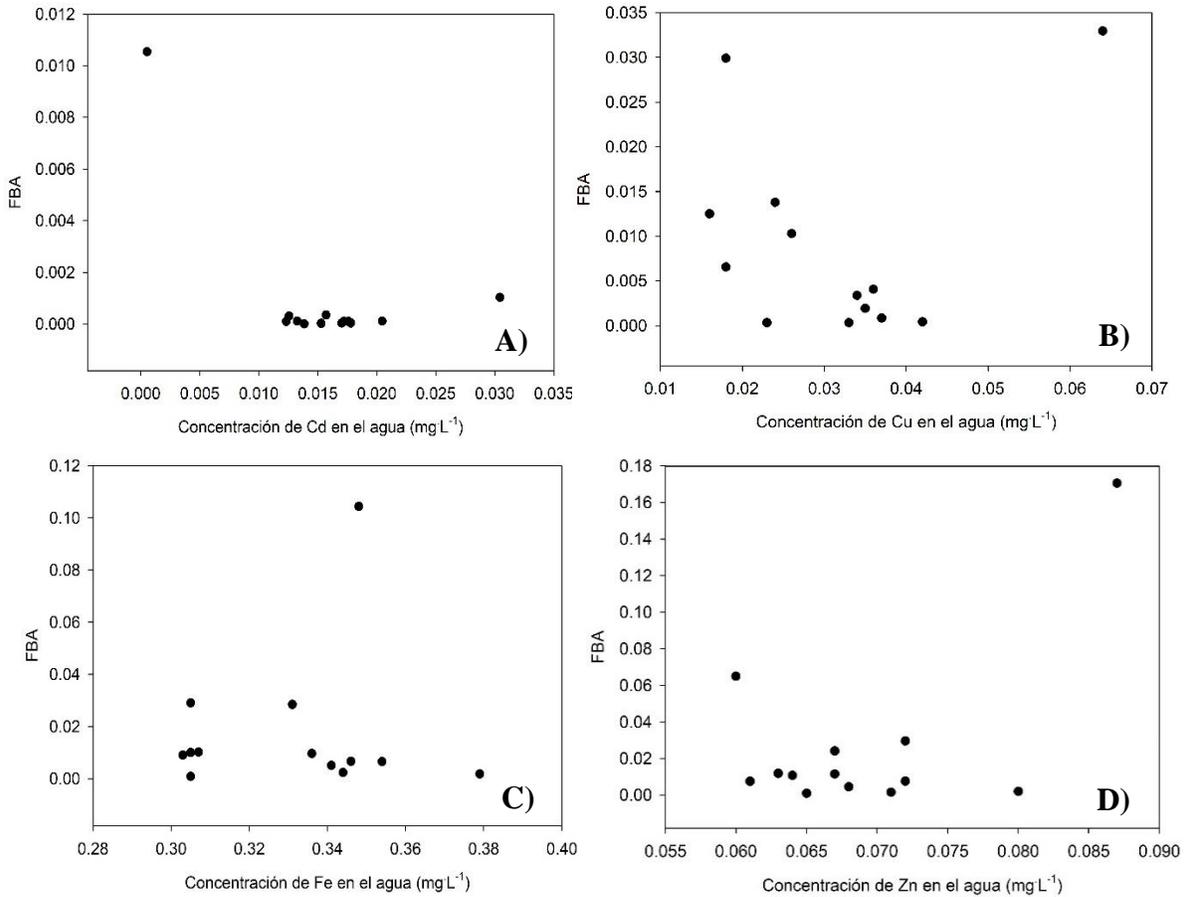


Figura 3.16. Relación de los factores de bioacumulación (FBA) en copépodos respecto a las concentraciones de A) cadmio, B) cobre, C) hierro y D) zinc de los puntos de la zona 1 y zona 2 de la laguna Chacmochuch.

En cuanto al comportamiento esperado entre la relación de los FBA y las concentraciones en el medio acuático, se registró que, a mayor concentración en el medio, el factor disminuye para el Cu, Fe y Zn, principalmente. En el Cd, este comportamiento no se observa en su totalidad; gran cantidad de los puntos al disminuir, se comportan constantes (en el FBA=0).

Tanto para el Cu, Fe, Zn y Cd, el valor del punto 1 de la zona 1 impide que se cumpla la premisa del concepto de bioacumulación en su totalidad, puesto que este valor es el único que aumenta cuando debería disminuir, por lo que se considera como un valor atípico.

En el Anexo 5 se encuentran las tablas con los datos de los FBA de estos metales.

3.7.DISCUSIÓN

3.7.1. Metales en agua

Los metales se encuentran de forma natural en un medio lagunar-estuarino, por medio de los aportes originados por la meteorización de la roca y por la mezcla de masas de agua que provienen del mar –que contienen en distintas concentraciones a estos elementos–. A estos aportes también se suman aquellos que provienen de las actividades antropogénicas (e.g. turismo, lanchas de uso turístico y pesquero, descargas de aguas residuales, escorrentía, lixiviados de rellenos sanitarios, etc.) y la acción de los vientos. Esta última, impacta las aguas lagunares someras por medio de su resuspensión, promoviendo la liberación de metales que precipitaron y se acumularon en los sedimentos. Lo anterior ocasiona variabilidad en las concentraciones de metales en la columna de agua, donde se encuentran tanto en la fase disuelta como en la de partículas (Luoma, 1990; Censi *et al.*, 2006; Beltrame *et al.*, 2009; Vázquez *et al.*, 1999; Jiménez *et al.*, 2021).

Al ser una laguna costera, la laguna Chacmochuch no es ajena a lo descrito con anterioridad, con profundidades que van desde los 0.3 m en las zonas cercanas a las costas a los 3.5 m de profundidad en el centro de la misma (Aguilar-Martínez, 2019). Adicionalmente, existe influencia de la corriente de Yucatán cuya trayectoria abarca la Isla de Cozumel y sube rumbo al Golfo de México, ocasionando surgencias en Cabo Catoche y pasando frente de la laguna Chacmochuch (Figura 3.5.17). Esto, incide tanto con la entrada constante de agua marina que proviene del Mar Caribe a la laguna como en su hidrodinámica (Reséndiz-Colorado, 2019).

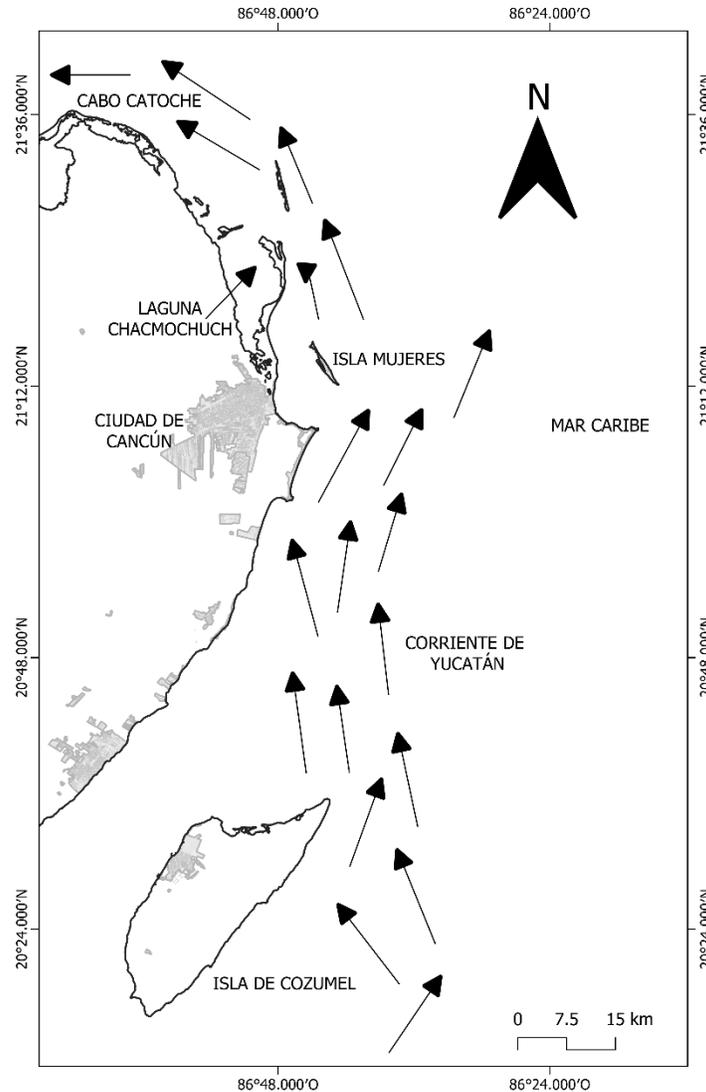


Figura 3.5.17. Representación de la corriente de Yucatán cuya circulación fluye frente a la entrada de la laguna Chacmochuch (imagen modificada de Reséndiz-Colorado, 2019).

En dicho intercambio y mezcla de masas de agua, la hidrodinámica es un factor importante, ya que ocasiona que los sistemas estuarinos costeros como Chacmochuch, presenten una heterogeneidad en las concentraciones de los elementos traza (García-Navarro, 2006). Dichos elementos, se pueden encontrar disueltos en el agua, adheridos al material particulado ocasionando su floculación, coagulación y sedimentación en los suelos marinos donde se acumulan (Beltrame *et al.*, 2009). Esto coincide con lo registrado en los resultados de las muestras de agua de la laguna, donde se encontraron mayores concentraciones en la Zona 1 (cercano a la boca) y con diferencias estadísticas significativas en el As, Cu, Fe y Zn. El tiempo de residencia de la laguna Chacmochuch se reporta

en 18 días, valor que se considera corto en comparación con el tiempo de residencia de la laguna Nichupté (sistema lagunar cercano a la laguna de Chacmochuch) que es de 40 días (Reséndiz-Colorado, 2019). Sin embargo, la advección de sus partículas en tres periodos -lluvias, nortes y secas- indica un desplazamiento y acumulación en la zona costera noroeste y suroeste, principalmente (Reséndiz-Colorado, 2019), que corresponden a la zona 1 y zona 2 del presente trabajo. El hecho de encontrar concentraciones de metales en una zona marina concuerda con los datos reportados por Cejudo *et al.*, (2021). En dicho trabajo, se cuantificaron concentraciones de Cd, Fe y Pb en la laguna Nichupté – conectada al mar– y se hipotetiza que entre las posibles fuentes que aportan metales a la laguna son el arribo de sargazo, las actividades turísticas, la navegación y el crecimiento urbano que continúa siendo evidente en la ciudad de Cancún.

Las concentraciones de los oligoelementos en el agua suelen ser bastante bajas por el efecto de dilución en el volumen de agua (Cejudo *et al.*, 2021). Tal es el caso de la laguna Manatí, que igualmente se encuentra bajo la presión del crecimiento poblacional Cancunense. Sin embargo, los estudios de las muestras de agua tomadas del canal de drenaje (donde se depositan los residuos que provienen de la ciudad) las concentraciones se encontraron por debajo del límite de detección del equipo (Hensley-Demidof, 2022). En Chacmochuch, las concentraciones de los metales analizados, fueron muy bajas (excepto para el Cr que se encontró por debajo del límite de detección del equipo) y la zona 1 -cercana al Mar Caribe- es la que mayor concentración de metales presenta, por lo que la hipótesis de la presente tesis se rechaza.

3.7.1.1. Concentraciones de metales en el agua de acuerdo a la normatividad

En México existen normas que permiten regular o prevenir el impacto antropogénico (como las descargas residuales e industriales) hacia los cuerpos de agua de la nación con el fin de mantener la salud de los ecosistemas y su vida acuática. Para determinar si las concentraciones de metales en el agua de la laguna Chacmochuch representan un riesgo, se tomaron como referencia los valores máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Los valores de las concentraciones obtenidas para el As, Cd, Cu, Cr, Pb y Zn se encontraron por debajo del MP establecido en la norma. Sin embargo, dichas concentraciones se encuentran por arriba de los valores establecidos por los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) para protección de la vida acuática (Tabla 3.5.10). Lo anterior, se traduce en un posible impacto a la biota acuática de la laguna aun cuando estas concentraciones son bajas. Para confirmar este supuesto, es necesario

establecer más estudios y monitoreos en más temporadas climáticas y en otros organismos acuáticos de interés comercial o de investigación (e.g. peces, caracoles, etc.) en la laguna Chacmochuch.

Tabla 3.5.10. Comparación de la concentración de los metales en el agua de la laguna Chacmochuch y los valores establecidos de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y CE-CCA-001/89. Los valores son reportados en mg·L⁻¹.

Metales	NOM-001-SEMARNAT-2021		CE-CCA-001/89	
	Embalses, lagos y lagunas	Zona marina mexicana	Protección a la vida acuática*	Laguna Chacmochuch**
Arsénico	0.1	0.2	0.01	0.037
Cadmio	0.1	0.2	0.0009	0.016
Cobre	4	4	0.003	0.031
Cromo	0.5	1	0.05	ND
Hierro	-	-	0.05	0.331
Plomo	0.2	0.5	0.006	0.103
Zinc	10	20	0.09	0.069

ND: No Detectado.

*Vida acuática de aguas marinas o zonas costeras.

** Promedio de las concentraciones de las dos zonas de interés de la presente tesis.

3.7.2. Metales en sedimentos

Los sedimentos son considerados una matriz relevante en los estudios científicos por su complejidad, son muy dinámicos y concentran un registro histórico de contaminación, ya que las sustancias que se introducen a los cuerpos de agua tienden a precipitarse y depositarse en el fondo (Jiménez *et al.*, 2021). Además de la interacción con otras matrices como el agua y la biota acuática marina que permite darle seguimiento a la movilidad de los contaminantes en un ecosistema acuático, como sucede con las lagunas costeras.

En el presente estudio en la laguna Chacmochuch se establecieron dos zonas; a) una cercana a la urbanización de la ciudad de Cancún y b) una cercana a la boca de la laguna, con características marinas. Lo anterior, con la finalidad de diferenciar el posible impacto antropogénico en los sedimentos de la laguna como se ha reportado en la laguna Manatí (Hensley-Demidof, 2022). En

dicha laguna, se reportaron concentraciones de Al, Ba, B, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en distintas matrices entre las que se encuentran los sedimentos; se tomaron muestras de cuatro distintas zonas (en el canal de drenaje, zona norte, oeste y este) dentro de la laguna. Los resultados mostraron que el canal de drenaje –que recibe las aguas pluviales y descargas de la zona urbana de Cancún– presentó mayor concentración de Cu ($29.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Fe ($1086.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Pb ($1.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Zn ($1332.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Mientras que la concentración del Cr fue menor en dicho canal ($5.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Hensley-Demidof, 2022). En Chacmochuch, se registraron cuatro metales considerados tóxicos para la salud del ecosistema (As, Cd, Cr y Pb) y, tres metales considerados esenciales (Cu, Fe, Zn). En los análisis, solo se registraron diferencias estadísticas significativas en el Cd y Cr, lo que determina que las concentraciones son mayores en la zona 1. La acumulación de elementos en los sedimentos se da por los cambios de tipo redox de un sistema acuático. La oxidación del Cr por acción de la materia orgánica genera su reducción a Cr III, ocasionando que sea menos soluble y se precipite al fondo marino. Esta forma química del elemento es la menos tóxica comparada con el Cr (V) que puede ocasionar enfermedades gástricas e intestinales (Arcega-Cabrera *et al.*, 2014; Covarrubias y Cabriales, 2017). Por otro lado, el Cd tiende a formar sales como el cloruro de cadmio (CdCl_2) (Arcega-Cabrera *et al.*, 2014), al ser temporada de secas, la acumulación de sales dentro de la laguna y los aportes marinos del Mar Caribe, contribuyen a la acumulación de este elemento.

Aun cuando no presentó diferencia estadística significativa, el As es el elemento que encabeza la lista de concentraciones promedio cuantificadas en la laguna, seguido del Cr. Este elemento si bien, se encuentra en la naturaleza en sus dos formas básicas: como arsenato (As V) y arsenita (As III); en su forma As (V) tiende a precipitar y permanecer en los sedimentos debido a su alta afinidad por los oxihidróxidos de hierro [$\text{FeO}(\text{OH})$] y óxidos de manganeso (MnO_2). Por el contrario, la forma As (III) es liberada a la columna de agua al presentar una menor afinidad a dichos compuestos (Covarrubias y Cabriales, 2017). En Chacmochuch, este elemento presenta mayor concentración en el sedimento ($1349.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) respecto al agua ($0.037 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). La posible explicación a este suceso es la acumulación de As en los sedimentos de la laguna y su liberación a la columna de agua por medio de su resuspensión debido a la acción del viento, su hidrodinámica o a las actividades de pesca y turísticas que se llevan a cabo en la laguna.

Las concentraciones de metales en el sedimento son mayores en la zona 1 respecto a la zona 2. Esto resulta en el rechazo de la hipótesis de la presente tesis, donde se esperaba encontrar mayor concentración en la zona 2 por su cercanía a la zona urbana de Cancún y los rellenos sanitarios.

3.7.2.1. Concentraciones de metales en el sedimento de acuerdo a la normatividad

Además de conocer las concentraciones de los metales que se encuentran en un cuerpo de agua, es importante tener valores de referencia que permitan evaluar su estado de salud. Debido a que en México no existe una norma oficial de los sedimentos marinos costeros o estuarinos-lagunares, para el presente trabajo se tomaron como referencia tanto las concentraciones de remediación para suelos (terrestres) contaminados con metales de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y las que se indican en la Guía Canadiense de calidad para sedimentos marinos. Para esto, se utilizaron los valores denominados *Interim Sediment Quality Guideline* (ISQG), donde los registros por debajo de ellos, no presentan un efecto biológico en la biota acuática marina (Tabla 3.5.11).

Tabla 3.5.11. Concentraciones de metales en laguna Chacmochuch, los valores de referencia de la Norma Mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) y la Guía Canadiense (ISQG). Los valores son reportados en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de peso seco.

Metal	NOM	ISQG	Laguna Chacmochuch (presente estudio)
Arsénico	22	7.24	1349.41
Cadmio	37	0.7	20.28
Cromo	280	52.3	1169.54
Cobre	nd	18.7	4.29
Hierro	nd	nd	210.14
Plomo	400	30.2	177.33
Zinc	nd	124	2.27

NOM: NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de metales en sedimentos terrestres.

ISQGs: Valores máximos permisibles de los sedimentos recomendados para soportar y mantener la vida acuática.

Nd: Sin dato.

Las concentraciones promedio reportadas para el As y Cr en la laguna Chacmochuch se encuentran por arriba de los límites máximos permisibles (LMP) de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Estos dos metales son prioritarios debido a su toxicidad y sus altas concentraciones se asocian a fuentes antropogénicas (Arcega-Cabrera *et al.*, 2014). En cuanto al Cd y Pb, metales tóxicos y no prioritarios para la biota acuática, se encuentran por debajo del LMP establecido en la norma.

En cuanto a los valores de la Guía Canadiense, los metales no esenciales y tóxicos para la biota acuática, como el As, Cd, Cr y Pb, se encuentran por arriba de los valores ISQGs. Lo anterior es preocupante debido a que concentraciones por arriba de estos valores significa que están teniendo un impacto negativo en la biota acuática que se encuentra en contacto directo con los sedimentos de la laguna. Las concentraciones del Cu y Zn se encuentran por debajo de estos valores.

3.7.3. Concentración de metales en hojas y raíces de *T. testudinum*

En las dos zonas establecidas dentro de la laguna Chacmochuch se cuantificaron y reportaron mayor concentración de metales considerados tóxicos como el As, Cd, Cr y Pb y esenciales como el Cu, Fe y Zn en las hojas que en las raíces. Esto se debe a que: a) en las hojas están presentes los tejidos fotosintéticos y proteínicos que permiten la absorción de los elementos traza (Bonilla-Heredia, 2009); y b) las plantas acuáticas no solo adquieren sus nutrientes del sedimento –como es el caso de las plantas terrestres– sino que también los toman del agua marina (Whelan III *et al.*, 2005). Dicho suceso se ha demostrado por medio de pruebas de laboratorio mediante la exposición de *T. testudinum* a metales como el Cd, Mn, Zn y Cs, donde se observó que las hojas absorbían más estos metales en comparación con las raíces (Schroeder y Thorhaug, 1980).

En los resultados reportados en la presente tesis, el As se encuentra en el tercer lugar de elementos metálicos cuantificados para la laguna, posterior al Fe y Zn. A diferencia de estos, el As, no es considerado un elemento esencial para los pastos, por lo que se esperaría tener concentraciones bajas de acuerdo al concepto de “dilución por crecimiento” expuesto por Martínez-Vázquez (2007). En la dilución por crecimiento, los elementos esenciales como el Fe y Zn aumentan durante el crecimiento al ser necesarios para el metabolismo de *T. testudinum*. Es decir, a mayor crecimiento mayor es la necesidad de los nutrientes que requiere la planta, por lo tanto, mayor es la concentración de elementos esenciales. En cambio, con los elementos no esenciales como el As, Pb, Cd y Cr, estos deberán disminuir o diluirse debido al crecimiento, por lo que las concentraciones deberán ser menores. En las praderas de *T. testudinum* de la laguna Chacmochuch, dicho supuesto se cumple con el Pb, Cd y Cr, pero no con el As. De acuerdo con Whelan III *et al.* (2005), las concentraciones máximas del As se presentan en invierno y, considerando que el tiempo

de recambio de las hojas de *T. testudinum* es de aproximadamente de 3-4 meses (Solis *et al.*, 2008), es posible que las concentraciones reportadas en el presente trabajo, correspondan a los meses de febrero, marzo y abril; indicando la bioacumulación de As al final de la temporada de nortes (en febrero) y al inicio de la temporada de secas (en marzo y abril) en el Caribe mexicano (Aguilar-Martínez, 2015).

Aunado a esto, el As en su forma química As (V), además de ser tóxico, es común de encontrar en los sistemas estuarinos y marinos. Su similitud química con el fósforo (P), promueve la absorción del As a través del sistema de transporte de fosfato de *T. testudinum* (Meharg y Macnair, 1992). Su absorción se ve favorecida debido a que las concentraciones de P son limitadas en las praderas de *T. testudinum* en comparación con las del N (en una relación N:P de 30:1) en los sistemas acuáticos tropicales de suelos carbonatados; este tipo de suelos retienen el P y dificultan que se lleve a cabo correctamente el proceso de la fotosíntesis (Fourqurean, y Cai, 2001).

Con el Cd se puede considerar que la translocación acropetal no se haya llevado a cabo todavía. Por ejemplo, en *P. oceánica* se ha observado una correlación positiva entre el Cd de las hojas y las del sedimento. Dicho suceso es debido a la translocación acropetal, la cual también ha sido observada en otras especies de pasto marino como *Zostera marina* (Malea *et al.*, 1993). Por otro lado, se ha demostrado que el Cu inhibe la absorción del Cd en las macroalgas (Malea *et al.*, 1993). Esto explicaría las bajas concentraciones de Cd en *T. testudinum* en este estudio, ya que el Cd es el metal con menor concentración y el Cu es el cuarto elemento con mayor concentración. Para corroborar esta hipótesis, hace falta realizar más pruebas experimentales en laboratorio y campo para nuestro sitio de estudio.

Otra posible causa de las altas concentraciones de cadmio en las hojas de *T. testudinum* en la zona 1, se debe a que el contenido de carbonato de calcio sea menor en esta zona, en comparación con la zona 2. El alto contenido de carbonato de calcio en los sedimentos disminuye las concentraciones y la absorción del Cd y otros elementos traza (como el Pb) en las plantas. Dicho comportamiento ha sido observado en Livorno, un sitio caracterizado por su alto contenido de carbonato de calcio, esta característica ocasionó que *P. oceánica* no absorbiera Cd en su tejido foliar (Lafabrie *et al.*, 2007). Sin embargo, en Chacmochuch es importante profundizar tanto el estudio del contenido de los sedimentos como en *T. testudinum* para poder determinar las relaciones existentes en los contenidos de los sedimentos y la matriz biológica. Aún con todo esto, representa un reto debido a

que existen variaciones naturales de los elementos traza dentro de un sistema lagunar. De acuerdo con Whelan III *et al.* (2005), estas variaciones se presentan en los sedimentos, en el agua, en la morfología de las praderas de *T. testudinum* y entre estaciones.

En cuanto a las concentraciones del Pb, este elemento ocupa el segundo puesto con menor concentración cuantificada tanto en hojas como en raíces de *T. testudinum* en la laguna Chacmochuch. La baja concentración del Pb se puede deber a los sedimentos carbonatados (Lafabrie *et al.*, 2007) de la laguna y a la ausencia de precipitaciones (temporada de secas) que favorecen las escorrentías continente-laguna, ya que la deposición húmeda es uno de los principales mecanismos de movilidad de este metal (Bonilla-Heredia, 2009). Aunado a esto, en un estudio realizado por Bonilla-Heredia (2009), se demostró que las lagunas costeras del Estado de Quintana Roo –en comparación con las de los Estados de Campeche y Yucatán– son las menos contaminadas con este metal. A pesar de que las principales fuentes y actividades que se realizan en el Estado se encuentran las descargas domésticas, el mal manejo de los residuos sólidos urbanos y el turismo.

En la laguna Chacmochuch, las concentraciones de Pb en las hojas de *T. testudinum* han sido estudiadas con anterioridad (Bonilla-Heredia, 2009). Dichas concentraciones se compararon con el valor del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), sitio que se catalogó como contaminado con una concentración de $8.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de plomo. Bonilla-Heredia (2009) establecieron a Chacmochuch como una zona no contaminada, presentando un valor de $4.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de plomo. En el presente estudio, el promedio de la concentración de dicho metal es aún menor ($0.166 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de plomo), por lo que se hipotetiza que *T. testudinum* continúa sin ser impactada negativamente con este metal, aun cuando su concentración es alta en los sedimentos, superando los valores de la Guía Canadiense (ISQG).

Por otro lado, Whelan III *et al.* (2011), reportaron concentraciones de Mn, Fe, Cu, Zn, Pb y Cr en hojas y raíces de *T. testudinum* para cuatro zonas dentro del Caribe mexicano posterior a la temporada de huracanes. Las concentraciones que se encuentran por arriba de las reportadas para Chacmochuch son las del Cu, Zn, Pb y Cr para Ojo de Agua y Puerto Morelos. Las concentraciones del Fe en Chacmochuch ($30.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) son mayores en comparación con las reportadas para la laguna Nichupté ($22.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y para Puerto Morelos ($23.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), siendo el único elemento metálico esencial que se encuentra en mayor concentración con respecto a otros sitios del Caribe mexicano. En las raíces, las concentraciones del Cu, Zn y Pb en la laguna Nichupté fueron mayores

en comparación con las obtenidas en la laguna Chacmochuch, en el presente estudio. En cambio, con el Fe, Cr y Pb en Ojo de agua y Puerto Morelos estas concentraciones son menores, figurando a Chacmochuch como una laguna contaminada con dichos elementos.

Las concentraciones, cuyas diferencias estadísticas fueron significativas en las hojas y raíces de *T. testudinum* en la laguna Chacmochuch, resultaron en el rechazo de la hipótesis inicial del proyecto para las raíces. Únicamente el As presente en las hojas del pasto marino, es aquel metal que nos permite aceptarla, por lo que es posible que su principal fuente provenga del continente.

3.7.4. El factor de bioacumulación (FBA) de metales en *T. testudinum*

Entre las principales razones por las que el estudio de los elementos traza en los sistemas acuáticos es importante, se debe a que estos no solo se acumulan en el agua o sedimento, sino que también se movilizan a las matrices biológicas. Ahí, son absorbidos y se acumulan en los tejidos de los organismos ya sea por medio del alimento o por contacto. Cuando la tasa de eliminación es menor en comparación con la tasa de absorción, se dice entonces que el organismo está bioacumulando al contaminante (Nnaji *et al.*, 2023). Para determinar la relación que existe entre el organismo y el medio en el que habita, se utiliza el factor de bioacumulación cuyo valor debe ser menor a 1. Para determinar dicha relación en las praderas de pastos, se toman las concentraciones del sedimento y de las hojas. Lafabrie *et al.* (2007), midieron dicha relación en las hojas de la especie *P. oceánica* y reportaron la bioacumulación del Cd, Hg, Ni y Pb. En el Caribe mexicano, Whelan III *et al.* (2011), demostraron que el Mn, Fe, Cu, Zn y Pb se bioacumulan en las hojas ($FBA > 1$) y en las raíces de *T. testudinum*. Sin embargo, únicamente el Mn, Fe y Zn son bioacumulados, siendo que el Cr el único metal que obtuvo un $FBA < 1$. Respecto a estos estudios en comparación con los datos reportados para la laguna Chacmochuch, el Fe, As, Cr, Cu, Pb y Cd se encontraron por debajo del valor 1 tanto en hojas como en raíces, en cambio, el Zn figuró ser el único metal que obtuvo un $FBA > 1$ en ambas matrices.

3.7.5. Concentración de metales en copépodos

En el presente estudio, se registró el siguiente orden de acumulación de metales en los copépodos de acuerdo a su concentración: $Fe > Cu > Zn > Cr > Cd$. El que se haya cuantificado mayor concentración de Cu respecto al Cd, se ha registrado previamente en pruebas experimentales ecotoxicológicas con el copépodo calanoide *Eurytemmora affinis*. En el trabajo de Zidour *et al.*

(2019), estos microorganismos fueron expuestos a un medio acuático con mezcla de concentraciones de Ni, Cu y Cd. En el experimento se observó que existe una competencia entre metales, siendo el Cu el elemento que más tiende a ser acumulado estando solo o mezclado con otros elementos. La toxicidad del Cu afecta a las poblaciones de copépodos no solo de *E. affinis* sino también se ha comprobado su efecto en el calanoide *Acartia pacifica* (Jiang *et al.*, 2007; Zidour *et al.*, 2019). En dicho experimento, *E. affinis* acumuló más Cu y Ni, en tanto que las concentraciones de Cd fueron menores (Zidour *et al.*, 2019). La dilución por crecimiento de un elemento no esencial es una posible causa de las bajas concentraciones reportadas para el Cd. Esto, se ha registrado en los copépodos *P. annandalei* cuyas concentraciones de exposición al Cd por el medio acuático disminuyeron al transcurrir el tiempo debido al crecimiento corporal o cambio de fase de los individuos (Kadiene *et al.*, 2019b). En un experimento generacional de *Eurytemmora affinis* realizado con una mezcla de metales (Cd, Cu, Ni y Pb), se observó que la generación F1 acumuló más metales respecto a sus generaciones posteriores (F2 y F3), siendo la generación F2 la que presentó saturación. El Cd presentó la menor acumulación tanto en la experimentación solo como en la mezcla con el Cu, Ni y Pb, siendo el Cu el que mayor concentración presentó. Dichos resultados coinciden con lo registrado en la laguna Chacmochuch, donde este comportamiento se debe a que el Cu es un elemento esencial para la biota acuática marina y además se comprueba que la dilución por crecimiento puede ser un factor para que las concentraciones de Cd (elemento no esencial) sean menores (Das *et al.*, 2020).

Por otro lado, se han realizado trabajos experimentales para determinar la vía de entrada de los metales en los copépodos y se ha comprobado por un lado que la ingesta oral de metales disueltos en el medio acuático, es mayor comparada con la ingesta mediante el alimento para Cd, Cu y Ni (Kadiene *et al.*, 2019b). Dicho comportamiento se ha observado en el *Acartia tonsa* cuya acumulación de Cd es menos del 50% por medio del alimento, en comparación con el medio acuático ambiental (>50%). Lo que demuestra que este metal tiende a ser acumulado a través de la fase disuelta (Kadiene *et al.*, 2019b), lo que podría explicar su acumulación en los copépodos de la laguna Chacmochuch en comparación con el As y Pb. Este elemento mostró diferencias estadísticas en los sedimentos, cuya resuspensión puede ocasionar la liberación de este ión haciendo que se encuentre disponible para la microbiota. En *E. affinis* se ha comprobado la disminución poblacional de nauplios (etapas F1 y F2) al exponerse a medios cuyos sedimentos tienden a resuspender y están contaminados con elementos metálicos (Das *et al.*, 2020). El mismo comportamiento se ha

observado en el *Nitocra spinipes*, donde los nauplios se mostraron sensibles ante la exposición a sedimentos contaminados por medio de su resuspensión, lo que ocasionó la poca subsistencia de los organismos (Pérez-Landa y Simpson, 2011). Por lo que la exposición no solo del medio acuático o por medio de la dieta, sino que también a través de la resuspensión de los sedimentos influyen en la acumulación de metales.

Mas allá de la experimentación ecotoxicológica en un medio controlado como sucede con las pruebas de laboratorio; el efecto tóxico de los elementos traza en mezcla en el agua marina y su relación tanto con el medio acuático como sedimentario ha sido poco estudiado (Das *et al.*, 2020). Sin embargo, en el Estado de Quintana Roo se reportaron concentraciones de Al, Ba, B, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en distintos grupos de zooplancton entre los que se encontraban los copépodos dentro de la laguna Manatí (Hensley-Demidof, 2022). En dicha laguna, cuya principal fuente de contaminación es de la ciudad de Cancún –a través del canal de drenaje y depósito de las aguas residuales– no se detectaron concentraciones de metales en el zooplancton estudiado. Por el contrario, en el presente estudio, la laguna Chacmochuch –también asociada a la urbanización de Cancún– se encontraron concentraciones de metales como el Cu, Fe, Zn, Cr y Cd. Siendo el Cd el único metal no esencial y de interés por su propiedad tóxica y acumulable en el ambiente marino. En tanto que las concentraciones de Pb y As no se detectaron en los copépodos de la laguna que, de acuerdo con Yañez (2020), puede deberse a que su acumulación depende mucho de cuan disponible se encuentran los elementos y las interacciones con la biota acuática.

3.7.6. Factor de bioacumulación (FBA) en copépodos

En la Figura 3.16A que corresponde al FBA del cadmio, se describe que los puntos no se dispersan ni disminuyen conforme aumenta la concentración del metal en el medio acuático –como se observa con el Cu, Fe y Zn (Figura 3.16 B, C y D) – sino que se acumulan formando una meseta. Este comportamiento ha sido previamente observado en *E. affinis*, el cual absorbió grandes cantidades de Cd al inicio de exposición, al transcurrir el tiempo, se observó la formación de esta meseta en la concentración absorbida. La explicación a este comportamiento está dada por la saturación de este metal en el organismo (Zidour *et al.*, 2019). Yañez (2020), explica que el comportamiento constante de la relación de un FBA respecto a la concentración en el medio acuático es un indicador de toxicidad.

Otra posible explicación a este comportamiento se debe a que las tasas de excreción del metal son más lentas cuando la exposición al elemento se da más por medio acuático y no por medio de la dieta contaminada. Pues se ha demostrado que la asimilación de los elementos traza aumenta conforme más tiempo se encuentran en los intestinos (Kadiene *et al.*, 2019b). Sin embargo, en el presente estudio únicamente se está tomando en cuenta la exposición mediante el medio acuático que incluye la mezcla del alimento como la del hábitat, por lo que haría falta implementar un estudio enfocado a la dieta de los copépodos para complementar la información.

Por otro lado, la acumulación del Cd difiere entre machos y hembras, siendo los machos más sensibles a este elemento en comparación con las hembras (Kadiene *et al.*, 2017). Cuando un organismo se expone a un metal tóxico, la proteína llamada “metalotioneína” se induce para llevar a cabo el proceso de desintoxicación, lo que se traduce a que dicha proteína es más eficaz en las hembras en comparación con los machos (Kadiene *et al.*, 2019b). En el análisis de la bioacumulación del Cd en el presente trabajo, se analizaron los organismos en conjunto (Figura 3.5.18). Por lo que para afirmar que, debido a la abundancia de machos respecto a las hembras, la gráfica de los FBA del Cd tiene un comportamiento que indica saturación e intoxicación por exposición, faltaría implementar un estudio en donde se separen a los organismos por sexos y así, determinar el impacto del Cd tanto en hembras como en machos.



Figura 3.5.18. Mezcla de copépodos utilizada para el estudio de la bioacumulación de metales en la laguna Chacmochuch.

En cuanto a los FBA del Cu, en un estudio realizado en las generaciones F1, F2 y F3 de *E. affinis* se demostró que Cu obtuvo el factor de bioacumulación más alto comparado con los FBA del Ni,

Pb y Cd tanto en el tratamiento solo como en el de mezcla de metales, debido a que es un elemento esencial (Das *et al.*, 2020). En los FBA de los copépodos de Chacmochuch, el Cu es el elemento cuyo factor es menor seguido del Cd, siendo el Zn y Fe los que presentan el mayor valor de bioacumulación, posiblemente porque el Fe y Zn son la base de los elementos esenciales, útiles para las actividades biológicas, seguidos del Cu.

CONCLUSIONES

Se detectaron metales tóxicos y esenciales en la laguna Chacmochuch. El As se detectó en agua, sedimento y *T. testudinum*. El Cd en agua, sedimento, *T. testudinum* y copépodos. El Cr se detectó en sedimento, *T. testudinum* y copépodos. El Pb se detectó en agua, sedimento y *T. testudinum*. El Fe, Cu y Zn se detectaron en agua, sedimento, *T. testudinum* y copépodos.

De acuerdo a los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua para la protección de la vida acuática (CE-CCA-001/89), las concentraciones de As, Cd y Pb en el agua representan un riesgo para la biota de la laguna Chacmochuch. En los sedimentos, las concentraciones reportadas para el As y Cr se encuentran por arriba de los límites máximos permisibles de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 así como de los valores de la Guía Canadiense (ISQG). En cambio, las concentraciones de Cd y Pb únicamente se encuentran por arriba de los ISQG. Esto indica que la laguna Chacmochuch está contaminada por metales tóxicos que se movilizan entre matrices y que podrían ocasionar daños a la biota acuática.

La diferencia de concentraciones de metales entre zonas indica que en la zona 1 se cuantificó mayor concentración de As en el agua y en *T. testudinum* (hojas y raíces). En los sedimentos de la zona 1 se reportó mayor concentración de Cd y Cr. Por lo que la zona 1 (cerca a la boca de la laguna) es la más contaminada con As, Cd y Cr respecto a la zona 2 (cerca al antiguo relleno sanitario de la ciudad de Cancún). Las concentraciones de Cd y Pb en los copépodos no presentaron diferencias entre zonas.

Los factores de bioacumulación (FBA) de los metales tóxicos cuantificados en *T. testudinum* y copépodos son menores a 1.0, lo que indica que no existe bioacumulación. Sin embargo, existen diferencias de los FBA entre zonas en *T. testudinum*, indicando una mayor bioacumulación de Cr y Cu en las hojas de la zona 2 y una mayor bioacumulación de Pb en las raíces de la zona 1, aun cuando los $FBA < 1.0$. En copépodos el FBA de Cd y Cu no presentaron diferencias entre zonas.

Los metales reportados en el presente trabajo en conjunto con las matrices estudiadas son relevantes para el estudio del estado de salud de la laguna Chacmochuch y a partir de los datos generados, se pueden implementar más estudios, acciones de conservación y protección hacia la laguna.

REFERENCIAS

- Aguilar-Martínez, P. (2015). Variación estacional de parámetros ambientales e hidrológicos de la laguna Chacmochuch, Quintana Roo, 1-141. Tesis de Maestría, CICY, México. <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/362>.
- Arcega-Cabrera, F., Garza-Pérez, R., Noreña-Barroso, E. y Ocegüera-Vargas, I. (2014). Impacts of Geochemical and Environmental Factors on Seasonal Variation of Heavy Metals in a Coastal Lagoon Yucatán, México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 94, 58–65. <https://doi.org/10.1007/s00128-014-1416-1>.
- Arslan, B. (2019). Re: How to convert mg/L to mg/kg?. Retrieved from: https://www.researchgate.net/post/How_to_convert_mg_L_to_mg_kg/5d4817df4f3a3e10115145d4/citation/download.
- Avelar, M., Bonilla-Heredia, B., Merino-Ibarra, M., Herrera-Silveira, J.A., Ramírez, J., Rosas, H., Valdespino, J., Carricart-Ganivet, J.P y Martínez, A. (2013). Iron, cadmium, and chromium in seagrass (*Thalassia testudinum*) from a coastal nature reserve in karstic Yucatán. *Environ. Monit. Assess.*, 185, 7591-7603. 10.1007/s10661-013-3121-7.
- Beltrame, M.O., De Marco, S.G. y Marcovecchio, J.E. (2009). Dissolved and particulate heavy metals distribution in coastal lagoons. A case study from Mar Chiquita Lagoon, Argentina. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 85, 45–56. 10.1016/j.ecss.2009.04.027.
- Bonilla-Heredia, B.R. (2009). Determinación de plomo en *Thalassia testudinum* de la Península de Yucatán. Thesis, Chemistry Faculty, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, 107.
- Brinkhuis, B.H., Penello, W.F. y Churchill, A.C. (1980). Cadmium and manganese flux in eelgrass *Zostera marina* II. Metal uptake by leaf and root-rhizome tissues. *Mar. Biol.*, 58, 187–196. <https://doi.org/10.1007/BF00391875>.
- Caballero-Vázquez, J.A., Gamboa-Pérez, H.C. y Schmitter-Soto, J. (2005). Composition and spatio-temporal variation of the fish community in the Chacmochuch Lagoon system, Quintana Roo, Mexico. *Hidrobiológica*; 15(2 especial), 512-225.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2024). Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life Freshwater and Marine ISQG/PEL. <https://ccme.ca/en/summary-table>.
- Calva, L.G. y Torres, M. (2003). Metales pesados y sus efectos en organismos. Laboratorio de Ecosistemas Costeros, Depto. Hidrobiología. D.C.B.S. UAM-I, 33-42.
- Caramujo, M.J. (2015). Orden Harpacticoida. *Revista IDE@- SEA no°91ª* (30-06-2015): 1-12. ISSN 2386-7183.
- Castañeda-Chávez, M.R., Lango-Reynoso, F. y Navarrete-Rodríguez, G. (2017). Heavy Metals in Sediments from Alvarado Lagoon System in Veracruz, México. *International Journal of*

- Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB), 2 (3). ISSN: 2456-1878. 10.22161/ijeab/2.3.26.
- Cejudo, E., Acosta-González, G., Ortega-Camacho, D., Ventura-Sánchez, K. (2021). Water quality in natural protected areas in Cancun, México: A historic perspective for decision makers. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 48, 2352-4855. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.102035>.
- Censi, P., Spoto, S.E., Saiano, F., Sprovieri, M., Mazzola, S., Nardone, G., Di Geronimo, S.I., Punturo, R., Ottonello, D. (2006). Heavy metals in coastal water systems. A case study from the northwestern Gulf of Thailand. *Chemosphere*, 64, 1167–1176. 10.1016/j.chemosphere.2005.11.008.
- Covarrubias, S.A y Cabriales, J.J. (2017). Contaminación Ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 33, 7-21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>.
- Dahms, H. U., Won, E. J., Kim, H. S., Han, J., Park, H. G., Souissi, S., Raisuddin, S. y Lee, J. S. (2016). Potential of the small cyclopoid copepod *Paracyclops nana* as an invertebrate model for ecotoxicity testing. *Aquat Toxicol*, 180, 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.10.013>.
- Das, S., Ouddane, B., Hwang, J.S. y Souissi, S. (2020). Intergenerational effects of resuspended sediment and trace metal mixtures on life cycle traits of a pelagic copepod. *Environ Pollut*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115460>.
- Diario Oficial de la Federación. (1999). Decreto por el que se declara area natural protegida la Region denominada Sistema Lagunar Chacmochuch, con la Categoria de Zona Sujeta a Conservacion Ecológica, Refugio Estatal de Flora y Fauna, ubicada en los municipios de Benito Juárez e Isla Mujeres, Quintana Roo. Secretaría de Gobernación. https://conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/ANPL/QRo/CHACMOCHUCH.pdf.
- Diarios Oficial de la Federación. (2007). NORMA Oficial Mexicana: NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Secretaria de Gobernación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4964569&fecha=02/03/2007#gsc.tab=0.
- Diario Oficial de la Federación. (2016). Decreto por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región conocida como Caribe Mexicano. Secretaría de Gobernación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5545531&fecha=30/11/2018#gsc.tab=0.
- Duarte, C.M., Merino, M., Gallegos, M. (1995). Evidence of iron deficiency in seagrasses growing above carbonate sediments. *Limnol Oceanogr.*, 40, 1153–1158. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.6.1153>.
- Dumont, H.J., Van de Velde, I. y Dumont, S. (1975). The Dry Weight Estimate of Biomass in a Selection of Cladocera, Copepoda and Rotifera from the Plankton, Periphyton and Benthos of Continental Waters. *Oecologia*, 19 (1), 75-97. <http://www.jstor.org/stable/4215097>.

- Escamilla, J. B., Suárez-Morales, E. y Gasca, R. (2001). Distribución del zooplancton durante flujos de marea opuestos en el complejo lagunar de Chelem, Yucatán, México. *Rev. biol. Trop.*, 49(1), 47–51.
- Escamilla, B.J., Ordóñez-López, U. y Suárez-Morales, E. (2011). Spatial and seasonal variability of *Acartia* (Copepoda) in tropical coastal lagoon of the southern Gulf of México. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 46 (3), 379-390.
- Espinoza-Avalos, J. (1995). Distribution of seagrass in the Yucatan Peninsula, México. *Bull. Mar. Sci.*, 59 (2), 449-454.
- Fernández de Puellas, M.L. (2015). Orden Calanoida. *Revista IDE@-SEA*, nº 89 (30-06-2015): 1-27. ISSN 2386-7183.
- Flores-Audelo, J.M. (2010). Generación de energía eléctrica utilizando biogás de relleno sanitario [Diapositivas de PowerPoint]. Energreen Cancún. https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20100826_3_Energreen.pdf.
- Fourqurean, J.W. y Cai, Y. (2001). Arsenic and phosphorus in seagrass leaves from the Gulf of Mexico. *Aquat. Bot.*, 71, 247–258.
- García-Navarro, J. (2006). Metales pesados en sedimentos en tres lagunas costeras del sur de Tamaulipas y norte de Veracruz, 1-149. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=9B9QDjoAAA AJ&citation_for_view=9B9QDjoAAAAJ:u5HHmVD_uO8C.
- Garza-León, C.V., Fernández-Flores, C.A., Arzate-Cárdenas, M.A., Rubio-Franchini, I. y Rico-Martínez, R. (2023). Differential effects on the toxicity and bioconcentration of hexavalent and trivalent chromium on the rotifer *Lecane papuana* (Murray, 1913) (Monogononta: Lecanidae). *Hidrobiológica*, 33(3), 329-338. <https://doi.org/10.24275/lczi5134>.
- Gutiérrez, M.E., Morales, E., Aguirre, M.A., Briano, M., Ramírez, J.G. y Espejo, T. (2008). Cladocera y copepoda de aguas continentales de México. Primera edición. ISBN: 978-970-32-4852-0, 135-153.
- Hensley-Demidof, D.C. (2022). Evaluación ambiental de la contaminación por metales en la laguna Manatí, una zona sujeta a conservación ecológica en ambiente marino, 1-93. Tesis de Maestría, CICY, México. <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/2117>.
- Hernández-Terrones, L., Null, K., Ortega-Camacho, D., Paytan, A. (2015). Water quality assessment in the Mexican Caribbean: Impacts on the coastal ecosystem. *Cont. Shelf Res.* 102, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.04.015>.
- Herrera-Silveira, J.A. (2006). Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotrópicos*, 19 (2), 94-108. <http://ecotropicos.saber.ula.ve>.
- Herrera-Silveira, J.A., Morales-Ojeda, S.M., Mendonza-Martínez, J.E., Medina-Gómez, I., Ramírez-Ramírez, J., Sandoval-Gil, J.M. y Camacho-Ibar, V.F. (2019). Pastos Marinos. Programa mexicano el carbono. Research Gate, 1-29.

- Herzka, S., Álvarez, R.A., Peters, E.M y Cárdenas, G. (2020). Atlas de línea base ambiental del Golfo de México, Tomo VI: Pastos marinos en Margarita E. Gallegos Martínez y Gilberto Hernández Cárdenas (Eds.). Primera edición, 1-107. CICESE. <https://atlasigom.cicese.mx>.
- Hook, S.E. y Fisher, N.S. (2001). Reproductive toxicity of metals in calanoid copepods. *Mar. Biol.*, 138(6), 1131–1140. <https://doi.org/10.1007/s002270000533>.
- Illescas-Ángeles, J.C. (2010). Determinación de los metales pesados en sedimento y en mejillón “*Mytilopsis sallei*” de la Bahía de Chetumal, Quintana Roo. 1-81. Tesis de Maestría. División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo. [TD879.I43.2010-59933.pdf](https://doi.org/10.1007/978-979-959-933-3).
- INEGI. (2013). Edafología. Consultado el 17 de noviembre de 2022 de URL: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>.
- Jiang, X.D., Wang, G-Z., Li, S-J., He, J.F. (2007). Heavy metal exposure reduces hatching success of *Acartia pacifica* resting eggs in the sediment. *J. Environ. Sci.*, 19, 733–737. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60122-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60122-3).
- Jiménez, C.G., Brito-Manzano, N.P., Vargas-Falcón, P.M., García, M.A. y Bernat-Rodríguez, J. (2021). Metales pesados en agua y sedimento de dos lagunas costeras de Tabasco, México. *Braz. J. Anim. Environ. Res.*, 4 (4), 5993-6002. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n4-092>.
- Kadiene, E.U., Bialais, C., Ouddane, B., Hwang, J.S. y Souissi, S. (2017). Differences in lethal response between male and female calanoid copepods and life cycle traits to cadmium toxicity. *Ecotoxicology*. 10.1007/s10646-017-1848-6.
- ^aKadiene, E., Ouddane, B., Hwang, J. y Souissi, S. (2019). Bioaccumulation of metals in calanoid copepods by oral intake. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45987-2>.
- ^bKadiene, E. U., Meng, P.J., Hwang, J.S. y Souissi, S. (2019). Acute and chronic toxicity of cadmium on the copepod *Pseudodiaptomus annandalei*: A life history traits approach. *Chemosphere*, 233, 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.220>.
- Kennedy, S.V. y Newell, R.I. (1996). The Eastern Oyster (*Crassostrea virginica*). Maryland Sea Grant College. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/45763>.
- Morales-Serna, F. y Gómez, S. (2012). Generalidades de los copépodos parásitos de peces en aguas profundas y el caso de *Lophoura brevicollum* (Siphonostomatoida: Sphyrriidae).
- Lafabrie, C., Pergent, G., Kantin, R., Pergent-Martini, C. y Gonzalez, J.L. (2007). Trace metals assessment in water, sediment, mussels and seagrass species- Validation of the use of *Posidonia oceánica* as a metal biomonitor. *Chemosphere*, 68, 2033-2039. 10.1016/j.chemosphere.2007.02.039.
- Lau, S., Mohamed, M., Chi-Yen., A.T. y Su’ut, S. (1998). Accumulation of heavy metals in freshwater molluscs. *Sci. Total Environ.*, 214, 113-121.
- López, C., Jiménez, J.M. y Bucio, J.L. (2006). Estudio de la contaminación por Hg, Pb, Cd y Zn en la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 72 (1), ISSN: 1810-634X.

- López-Gutiérrez, L.F., Rubio-Franchini, I., Rico-Martínez, R., Mesquita-Joanes, F., Ramírez-López, E.M., Arredondo-Figueroa, J.L. y Silva-Briano, M. (2018). Inter and Intraspecific Variability in Invertebrate Acute Toxicity Response to Arsenic and Fluoride Exposure. *Journal of Environment*, 1-10.
- Luoma, S. (1990). Processes Affecting Metal Concentrations in Estuarine and Coastal Marine Sediments. En Furness, R. y Rainbow, P. (Eds). *Heavy Metals in the Marine Environment*, 51-62. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Malea, P., Haritonidis, S. y Kevrekidis, T. (1994). Seasonal and local variations of metal concentrations in the seagrass *Posidonia oceánica* (L.) Delile in the Antikyra Gulf, Greece. *Sci. Total Environ.*, 153, 225-235.
- Martínez-Vázquez, A.M. (2007). Metales pesados (Fe, Cd y Cr) en pastos marinos (*Thalassia testudinum*) de la laguna Yalahau, Quintana Roo: evidencia de posible contaminación del agua subterránea, 1-85. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/96800>.
- Meharg, A. A. y Macnair, M.R. (1992). Suppression of the High Affinity Phosphate Uptake System: A Mechanism of Arsenate Tolerance in *Holcus lanatus* L. *J. Exp. Bot.*, 43 (249), 519-524.
- Miracle, M.R. (2015). Orden Cyclopoida. *Revista IDE@-SEA*, n° 95 (30-06-2015): 1-19. ISSN 2386-7183.
- Nnaji, N.D., Onyeaka, H., Miri, T. y Chinenye, U. (2023). Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Appl. Sci*, 5, 125. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>.
- Ordóñez-López, U. y García-Hernández, V.D. (2005). Ictiofauna juvenil asociada a *Thalassia testudinum* en Laguna Yalahau, Quintana Roo. *Hidrobiológica*, 15 (2), 1-7. ISSN: 0188-8897.
- Páez-Osuna F. y Osuna-López, J.I. (1987). Acumulación de metales pesados en Mitla: una laguna costera tropical. *Ciencias Marinas*; 13(3): 97-112,1987. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v13i3.539>.
- Páez-Osuna, F. (2005). Fuentes de metales en la zona costera marina. In: A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. 329-342.
- Pérez-Gómez, J.A., García-Mendoza, E., Olivos-Ortiz, A., Paytand, A., Rebolledo-Vieyrae, M., Delgado-Pech, B., Almazán-Becerril, A. (2020). Indicators of nutrient enrichment in coastal ecosystems of the northern Mexican Caribbean. *Ecol. Indic.*, 118, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106756>.
- Pérez-Landa, V., Simpson, S.L. (2011). A short life-cycle test with the epibenthic copepod *Nitocra spinipes* for sediment toxicity assessment. *Environ. Toxicol. Chem.*, 30, 1430-1439. <https://doi.org/10.1002/etc.513>.

- Ponce-Velez, G. y Botello, A.V. (1992). Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la Laguna de Términos, Campeche. *Hidrobiológica*, 1 (2), 1-10. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa Distrito Federal, México.
- Reséndiz-Colorado, G. (2019). Análisis de los transportes de agua en la laguna Chacmochuch, Quintana Roo durante tres eventos contrastantes del periodo 2013-2014, 1-94. Tesis de Maestría, CICY, México. <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1511>.
- Rubio-Arias, H.O., Mejía-Leyva, P.F., Cortés-Palacios, L., Ochoa-Rivero, J.M. y De La Mora-Orozco, C. (2018). Metales pesados en sedimentos de la laguna de Bustillos, Chihuahua, México y comparación de agua regia y peróxido de hidrógeno como métodos de digestión. *Investigación y Ciencia*, 26 (4), 39-47 Universidad Autónoma de Aguascalientes México. ISSN: 1665-4412.
- Rubio-Franchini, I., López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M. G. y Rico-Martínez, R. (2016). Bioaccumulation of metals arsenic, cadmium, and lead in zooplankton and fishes from the Tula River Watershed, Mexico. *Water, Air and Soil Pollution*, 227, 1-12.
- Ruiz, O.E. (2005). La presencia de Fe y Cr en *Thalassia testudinum* del Golfo de México y Mar Caribe. Thesis, Chemistry Faculty, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 72.
- Ruíz-Pineda, C., Suárez-Morales, E. y Gasca, R. (2016). Copépodos planctónicos de la Bahía de Chetumal, Caribe Mexicano: Variaciones estacionales durante un ciclo anual. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 51(2), 301–316. [10.4067/s0718-19572016000200008](https://doi.org/10.4067/s0718-19572016000200008).
- Sandoval-Rojo, L.C., Flores-Verdugo, F. J., Zaragoza-Araujo, U., Day J.W., Estrada-Mercado, A. (1988). Phytoplankton Productivity in the Barra de Navidad Coastal Lagoon on the Pacific Coast of Mexico. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 21, 101-108.
- Schroeder, P.B., Thorhaug, A. (1980). Trace metal cycling in tropical-subtropical estuaries dominated by the seagrass *Thalassia testudinum*. *Am. J. Bot.*, 67, 1075-1088.
- Schulte, P. M. (2013). What is environmental stress? Insights from fish living in a variable environment. *Journal of Experimental Biology*, 217(1), 23–34. <https://doi.org/10.1242/jeb.089722>.
- Schulze, E.D., Beck, E. y Müller-Hohenstein, K. (2002). *Plant Ecology*. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1093/aob/mcj018>.
- Solís, C., Isaac-Olivé, K., Martínez, A., Lavoisier, E., Ruiz, Z., (2008). Trace metals in the seagrass *Thalassia testudinum* from the Mexican Caribbean Coast. *X-Ray Spectrometry* 37, 103–106. <https://doi.org/10.1002/xrs.1028>.
- U.S. EPA. (1996). “Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils,” Revision 2. Washington, DC.
- Valdespino-Saenz, J. (2005). Determinación de metales pesados en *Thalassia testudinum* en dos zonas de la Península de Yucatán, 1-87. Tesis de Maestría de la Facultad de Química, UNAM. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000343826.

- Van Tussenbroek, B. I., Guadalupe, M., Santos, B., Gonzálo, J., Wong, R., Kornelis Van Dijk, J. y Waycott, M. (2010). A guide to the tropical seagrasses of the Western Atlantic. In Universidad Nacional Autónoma de México. Del Coyoacan, México. <https://www.healthyreefs.org/cms/wp-content/uploads/2015/04/CaribbeanSeagrassGuide.pdf>.
- Vázquez, G.F., Sharma, V.K., Magallanes, V.R y Marmolejo, A.J. (1999). Heavy metals in a coastal lagoon of the Gulf of Mexico. *Mar. Pollut. Bull.*, 38 (6), 479-485.
- Vázquez, G y Martínez, M. (2022). Lagunas costeras, mucho más que agua. INECOL-Instituto de Ecología A.C. <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>.
- Villalba, R. (1995). Evaluación actual de los sedimentos y metales pesados en la laguna costera La Cruz, Sonora, 1-109. Tesis de Maestría, Universidad del Sonora. <http://148.225.114.121/handle/unison/3092>.
- Villareal-Treviño, C.M., Obregón-Morales, M.E., Lozano-Morales, J.F. y Villegas-Navarro, A. (1986). Bioaccumulation of lead, copper, iron, and zinc by fish in a transect of the Santa Catarina River in Cadereyta Jiménez, Nuevo León, México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol*, 37, 395-401.
- Walker, C., Sibly, R., Hopkin, S. y Peakall, D. (2012). *Principles of ecotoxicology*. 4 ed. New York: Taylor & Francis Group LLC.
- Whelan III, T., Espinoza, J., Villareal, X. y CottaGoma, M. (2005). Trace metal partitioning in *Thalassia testudinum* and sediments in the Lower Laguna Madre, Texas. *Environ. Int.*, 31, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.05.010>.
- Whelan III, T., Van Tussenbroek, B.I., Santo, M.G. (2011). Changes in trace metals in *Thalassia testudinum* after hurricane impacts. *Mar. Pollut. Bull.*, 62, 2797–2802. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.007>.
- Yañez, D. (2020). Bioacumulación de cadmio y plomo en cuatro grupos de zooplancton del noreste de Quintana Roo, México. Tesis de Maestría, CICY, México. <http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1772>.
- Zidour, M., Boubechiche, Z., Pan, Y.J., Bialais, C., Cudennec, B., Grard, T., Drider, D., Flahaut, C., Ouddane, B. y Soussi, S. (2019). Popultaions response of the estuarine copepod *Eurytemora affinis* to its bioaccumulation of trace metals. *Chemosphere*, 220, 505—513. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.148>.

ANEXOS

Anexo 1. Metales en agua

Tabla A1. Valores promedio \pm D.E de las concentraciones de metales en agua por zonas de la laguna Chacmochuch.

		Metales en agua (mg·L⁻¹)						
		Cu	Fe	As	Cd	Cr	Pb	Zn
Zona 1	n= 6	0.04 \pm 0.01	0.345 \pm 0.01	0.06 \pm 0.01	0.02 \pm 0.01	ND	0.10 \pm 0.04	0.07 \pm 0.01
Zona 2	n= 7	0.02 \pm 0.01	0.319 \pm 0.03	0.01 \pm 0.01	0.01 \pm 0.01	ND	0.10 \pm 0.07	0.06 \pm 0.01

ND: No Detectado

Anexo 2. Metales en sedimentos

Tabla A2. Valores promedio \pm D.E de las concentraciones de metales en sedimentos por zonas de la laguna Chacmochuch (n=7).

		Metales en sedimento (mg·kg⁻¹)						
		Cu	Fe	As	Cd	Cr	Pb	Zn
Zona 1		4.28 \pm 0.71	220.67 \pm 74.61	2166.03 \pm 1502.16	27.03 \pm 24.06	1803.46 \pm 624.45	130.49 \pm 38.60	2.18 \pm 0.38
Zona 2		4.32 \pm 0.29	199.61 \pm 67.23	532.78 \pm 678.80	1.93 \pm 4.45	535.60 \pm 159.17	224.17 \pm 98.60	2.36 \pm 0.32

Anexo 3. Metales en *Thalassia testudinum*

Tabla A3. Valores promedio \pm D.E. de las concentraciones de metales en hojas y raíces de *T. testudinum* por zona de la laguna Chacmochuch (n=7).

Metales en <i>T. testudinum</i> (mg·kg⁻¹)							
Hojas							
	Cu	Fe	Pb	Zn	Cr	As	Cd
Zona 1	0.48 \pm 0.29	33.92 \pm 10.06	0.15 \pm 0.11	3.99 \pm 0.70	0.27 \pm 0.09	0.49 \pm 0.35	0.03 \pm 0.01
Zona 2	0.16 \pm 0.28	26.99 \pm 8.01	0.18 \pm 0.07	6.38 \pm 3.56	0.33 \pm 0.13	1.07 \pm 0.29	0.02 \pm 0.02
Raíces							
Zona 1	0.39 \pm 0.99	35.99 \pm 13.19	0.16 \pm 0.09	3.85 \pm 0.78	0.75 \pm 0.19	1.64 \pm 0.54	0.05 \pm 0.04
Zona 2	0.00 \pm 0.00	35.62 \pm 11.86	0.08 \pm 0.04	3.46 \pm 0.52	0.68 \pm 0.65	0.56 \pm 0.45	0.01 \pm 0.01

Anexo 4. FBA de *T. testudinum*

Tabla A4.1. Factores de bioacumulación de cadmio en hojas y raíces de *T. testudinum*.

Cadmio (Cd)					
Puntos de muestreo	Metal en el sedimento (mg·kg⁻¹)	Metal en las hojas (mg·kg⁻¹)	FBA- Hojas	Metal en las raíces (mg·kg⁻¹)	FBA- Raíces
P1	10.00	0.01	0.001	0.13	0.013
P2	66.35	0.04	0.001	0.07	0.001
P3	23.75	0.05	0.002	0.00	0.000
P4	13.13	0.02	0.002	0.06	0.005
P5	13.53	0.02	0.002	0.04	0.003
P6	55.90	0.03	0.001	0.02	0.000
P7	6.58	0.03	0.005	0.04	0.007
P8	ND	0.01	-	0.00	-

P9	ND	0.02	-	0.04	-
P10	1.33	0.06	0.043	0.01	0.010
P11	ND	0.01	-	0.01	-
P12	ND	0.01	-	0.00	-
P13	11.98	0.00	0.000	0.01	0.001
P14	0.28	0.01	0.018	0.00	-0.014

ND: No Detectado

Tabla A4.2. Factores de bioacumulación de arsénico en hojas y raíces de *T. testudinum*.

Arsénico (As)					
Puntos de muestreo	Metal en el sedimento (mg·kg⁻¹)	Metal en las hojas (mg·kg⁻¹)	FBA- Hojas	Metal en las raíces (mg·kg⁻¹)	FBA- Raíces
P1	3617.50	0.01	0.000	1.13	0.000
P2	2145.25	0.57	0.000	1.11	0.001
P3	1110.50	0.08	0.000	1.38	0.001
P4	3162.50	0.47	0.000	2.62	0.001
P5	ND	0.65	-	2.05	-
P6	1094.00	0.65	0.001	1.45	0.001
P7	4032.50	1.01	0.000	1.72	0.000
P8	199.75	0.84	0.004	1.33	0.007
P9	ND	1.08	-	0.75	-
P10	1726.00	1.35	0.001	0.06	0.000
P11	1132.00	0.79	0.001	0.51	0.000
P12	671.75	1.07	0.002	0.65	0.001
P13	ND	0.81	-	0.61	-
P14	ND	1.56	-	0.00	-

ND: No Detectado

Tabla A4.3. Factores de bioacumulación de cobre en hojas y raíces de *T. testudinum*.

Cobre (Cu)					
Puntos de muestreo	Metal en el sedimento (mg·kg ⁻¹)	Metal en las hojas (mg·kg ⁻¹)	FBA- Hojas	Metal en las raíces (mg·kg ⁻¹)	FBA- Raíces
P1	3.30	0.89	0.270	2.64	0.800
P2	5.00	0.54	0.108	ND	0.000
P3	4.72	0.71	0.150	0	0.000
P4	5.00	0.24	0.048	0.12	0.024
P5	3.90	0.12	0.031	ND	0.000
P6	3.52	0.20	0.057	ND	0.000
P7	4.55	0.64	0.141	ND	0.000
P8	4.24	0.22	0.052	ND	0.000
P9	4.32	0.76	0.176	ND	0.000
P10	4.37	0	0.000	ND	0.000
P11	4.37	0	0.000	ND	0.000
P12	4.47	0.011	0.002	ND	0.000
P13	3.77	0	0.000	ND	0.000
P14	4.72	0.14	0.030	ND	0.000

ND: No Detectado

Tabla A4.4. Factores de bioacumulación de cromo en hojas y raíces de *T. testudinum*.

Cromo (Cr)					
Puntos de muestreo	Metal en el sedimento (mg·kg ⁻¹)	Metal en las hojas (mg·kg ⁻¹)	FBA- Hojas	Metal en las raíces (mg·kg ⁻¹)	FBA- Raíces
P1	843.25	0.17	0.000	0.92	0.001

P2	1971.75	0.43	0.000	0.66	0.000
P3	2652.50	0.24	0.000	0.76	0.000
P4	1766.25	0.25	0.000	1.07	0.001
P5	2404.50	0.22	0.000	0.71	0.000
P6	1255.25	0.20	0.000	0.52	0.000
P7	1730.75	0.35	0.000	0.62	0.000
P8	668.75	0.36	0.001	0.31	0.000
P9	667.00	0.50	0.001	0.49	0.001
P10	457.50	0.51	0.001	0.51	0.001
P11	465.00	0.21	0.000	1.90	0.004
P12	452.25	0.29	0.001	0.37	0.001
P13	741.25	0.18	0.000	1.20	0.002
P14	297.50	0.26	0.001	0.00	0.000

Tabla A4.5. Factores de bioacumulación de zinc en hojas y raíces de *T. testudinum*.

Zinc (Zn)					
Puntos de muestreo	Metal en el sedimento (mg·kg⁻¹)	Metal en las hojas (mg·kg⁻¹)	FBA- Hojas	Metal en las raíces (mg·kg⁻¹)	FBA- Raíces
P1	1.50	4.26	2.840	2.80	1.867
P2	2.03	5.22	2.578	2.94	1.452
P3	2.40	4.26	1.775	4.54	1.892
P4	2.63	3.88	1.478	4.54	1.730
P5	2.23	3.76	1.690	3.58	1.609
P6	2.00	2.98	1.490	3.86	1.930
P7	2.48	3.58	1.446	4.68	1.891
P8	2.10	8.32	3.962	2.66	1.267
P9	2.18	13.52	6.216	2.88	1.324

P10	2.45	6.02	2.457	3.76	1.535
P11	2.33	3.82	1.643	3.72	1.600
P12	2.08	3.52	1.696	3.98	1.918
P13	3.00	3.98	1.327	3.32	1.107
P14	2.40	5.50	2.292	3.92	1.633

Tabla A4.6. Factores de bioacumulación de plomo en hojas y raíces de *T. testudinum*.

Plomo (Pb)					
Puntos de muestreo	Metal en el sedimento (mg·kg ⁻¹)	Metal en las hojas (mg·kg ⁻¹)	FBA- Hojas	Metal en las raíces (mg·kg ⁻¹)	FBA- Raíces
P1	59.38	0.05	0.001	0.10	0.002
P2	111.53	0.15	0.001	0.06	0.001
P3	166.98	0.14	0.001	0.07	0.000
P4	149.45	0.09	0.001	0.23	0.002
P5	172.83	0.09	0.001	0.28	0.002
P6	124.40	0.14	0.001	0.23	0.002
P7	128.93	0.39	0.003	0.13	0.001
P8	121.55	0.17	0.001	0.11	0.001
P9	302.25	0.22	0.001	0.11	0.000
P10	345.00	0.15	0.000	0.10	0.000
P11	150.30	0.13	0.001	0.09	0.001
P12	148.88	0.14	0.001	0.08	0.001
P13	336.25	0.14	0.000	0.08	0.000
P14	164.95	0.33	0.002	0.00	0.000

Tabla A4.7. Factores de bioacumulación de hierro en hojas y raíces de *T. testudinum*.

Hierro (Fe)					
Puntos de muestreo	Metal en el sedimento (mg·kg ⁻¹)	Metal en las hojas (mg·kg ⁻¹)	FBA- Hojas	Metal en las raíces (mg·kg ⁻¹)	FBA- Raíces
P1	79.16	27.39	0.346	49	0.619
P2	250.23	37.8	0.151	13.6	0.054
P3	289.6	26.6	0.092	23	0.079
P4	300.52	33.2	0.110	44.34	0.148
P5	233.19	20.86	0.089	46.6	0.200
P6	195.093	41.2	0.211	40.6	0.208
P7	196.92	50.4	0.256	34.8	0.177
P8	114.55	29	0.253	28	0.244
P9	215.89	37	0.171	28.6	0.132
P10	253.83	28.6	0.113	45	0.177
P11	147.6	28.2	0.191	58.4	0.396
P12	285.53	33.6	0.118	29.52	0.103
P13	246.54	14.94	0.061	26.2	0.106
P14	133.38	17.6	0.132	33.6	0.252

Anexo 5. FBA de los copépodos**Tabla A5.1.** Factores de bioacumulación de cobre en copépodos.

Cobre (Cu)				
Zonas	Puntos	Metal en los copépodos (mg·L ⁻¹)	Metal en el agua (mg·L ⁻¹)	FBA
Zona 1	1	0.002	0.064	0.033

Zona 1	2	0.000	0.042	0.000
Zona 1	3	0.000	0.036	0.004
Zona 1	4	0.000	0.034	0.003
Zona 1	5	0.000	0.035	0.002
Zona 1	6	0.000	0.033	0.000
Zona 2	8	0.000	0.023	0.000
Zona 2	9	0.000	0.026	0.010
Zona 2	10	0.000	0.037	0.001
Zona 2	11	0.000	0.018	0.007
Zona 2	12	0.001	0.018	0.030
Zona 2	13	0.000	0.016	0.013
Zona 2	14	0.000	0.024	0.014

Tabla A5.2. Factores de bioacumulación de hierro en copépodos.

Hierro (Fe)				
Zonas	Puntos	Metal en los copépodos (mg·L ⁻¹)	Metal en el agua (mg·L ⁻¹)	FBA
Zona 1	1	0.036	0.348	0.104
Zona 1	2	0.003	0.336	0.010
Zona 1	3	0.002	0.354	0.007
Zona 1	4	0.002	0.341	0.005
Zona 1	5	0.002	0.346	0.007
Zona 1	6	0.001	0.344	0.002
Zona 2	8	0.000	0.305	0.001
Zona 2	9	0.003	0.305	0.010
Zona 2	10	0.001	0.379	0.002
Zona 2	11	0.003	0.303	0.009

Zona 2	12	0.009	0.305	0.029
Zona 2	13	0.003	0.307	0.010
Zona 2	14	0.009	0.331	0.029

Tabla A5.3. Factores de bioacumulación de zinc en copéodos.

Zinc (Zn)				
Zonas	Puntos	Metal en los copéodos (mg·L ⁻¹)	Metal en el agua (mg·L ⁻¹)	FBA
Zona 1	1	0.015	0.087	0.171
Zona 1	2	0.002	0.072	0.030
Zona 1	3	0.001	0.067	0.012
Zona 1	4	0.000	0.068	0.005
Zona 1	5	0.001	0.072	0.008
Zona 1	6	0.000	0.071	0.002
Zona 2	8	0.000	0.065	0.001
Zona 2	9	0.001	0.063	0.012
Zona 2	10	0.000	0.08	0.002
Zona 2	11	0.000	0.061	0.008
Zona 2	12	0.004	0.06	0.065
Zona 2	13	0.001	0.064	0.011
Zona 2	14	0.002	0.067	0.024

Tabla A5.4. Factores de bioacumulación de plomo en copéodos.

Plomo (Pb)				
Zonas	Puntos	Metal en los copéodos (mg·L ⁻¹)	Metal en el agua (mg·L ⁻¹)	FBA

Zona 1	1	ND	0.088	-
Zona 1	2	ND	0.173	-
Zona 1	3	ND	0.080	-
Zona 1	4	0.002	0.092	0.022
Zona 1	5	0.006	0.092	0.065
Zona 1	6	ND	0.088	-
Zona 2	8	ND	0.077	-
Zona 2	9	ND	0.090	-
Zona 2	10	ND	0.228	-
Zona 2	11	ND	0.093	-
Zona 2	12	ND	0.099	-
Zona 2	13	ND	0.138	-
Zona 2	14	ND	ND	-

ND: No Detectado

Tabla A5.5. Factores de bioacumulación de arsénico en copépodos.

Arsénico (As)				
Zonas	Puntos	Metal en los copépodos (mg·L ⁻¹)	Metal en el agua (mg·L ⁻¹)	FBA
Zona 1	1	ND	0.050	-
Zona 1	2	ND	0.055	-
Zona 1	3	ND	0.074	-
Zona 1	4	ND	0.053	-
Zona 1	5	ND	0.062	-
Zona 1	6	ND	0.079	-
Zona 2	8	ND	0.024	-
Zona 2	9	ND	0.024	-

Zona 2	10	ND	0.006	-
Zona 2	11	ND	0.012	-
Zona 2	12	ND	0.004	-
Zona 2	13	ND	0.033	-
Zona 2	14	ND	ND	-

ND: No Detectado

Tabla A5.6. Factores de bioacumulación de cadmio en copépodos.

Cadmio (Cd)				
Zonas	Puntos	Metal en los copépodos (mg·L ⁻¹)	Metal en el agua (mg·L ⁻¹)	FBA
Zona 1	1	0.000	0.030	0.001
Zona 1	2	0.000	0.013	0.000
Zona 1	3	0.000	0.020	0.000
Zona 1	4	0.000	0.013	0.000
Zona 1	5	0.000	0.018	0.000
Zona 1	6	0.000	0.015	0.000
Zona 2	8	0.000	0.014	0.000
Zona 2	9	0.000	0.017	0.000
Zona 2	10	0.000	0.017	0.000
Zona 2	11	0.000	0.012	0.000
Zona 2	12	0.000	0.016	0.000
Zona 2	13	0.000	0.018	0.000
Zona 2	14	0.000	0.001	0.011

Tabla A5.7. Factores de bioacumulación de cromo en copépodos.

Cromo (Cr)				
Zonas	Puntos	Metal en los copépodos (mg·L ⁻¹)	Metal en el agua (mg·L ⁻¹)	FBA
Zona 1	1	0.634	ND	-
Zona 1	2	0.162	ND	-
Zona 1	3	0.076	ND	-
Zona 1	4	0.034	ND	-
Zona 1	5	0.038	ND	-
Zona 1	6	0.018	ND	-
Zona 2	8	0.010	ND	-
Zona 2	9	0.067	ND	-
Zona 2	10	0.015	ND	-
Zona 2	11	0.318	ND	-
Zona 2	12	0.265	ND	-
Zona 2	13	0.061	ND	-
Zona 2	14	0.701	ND	-

ND: No Detectado

Anexo 6. Prueba estadística U de Mann Whitney en matrices de estudio.

Tabla A6.1. Datos estadísticos de las concentraciones de metales en el agua.

	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
Valor de z	2.9**	0.86	2.36**	2.08**	0.36	2.15**
Valor de p	0.003	0.39	0.018	0.037	0.720	0.031

**Diferencia estadística

Tabla A6.2. Datos estadísticos de las concentraciones de metales en los sedimentos.

	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Pb	Zn
Valor de z	1.87	2.84**	3.06**	0.32	0.51	1.53	0.57
Valor de ρ	0.06	0.004	0.002	0.75	0.609	0.125	0.564

**Diferencia estadística

Tabla A6.3. Datos estadísticos de las concentraciones de metales en hojas y raíces de *T. testudinum*.

Hojas							
	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Pb	Zn
Valor de z	2.68**	1.70	1.02	1.92	0.06	1.23	1.40
Valor de ρ	0.007	0.087	0.306	0.054**	0.948	0.218	0.159
Raíces							
Valor de z	2.81**	2.15**	1.27	-	0.25	1.21	0.89
Valor de ρ	0.004	0.031	0.201	-	0.798	0.222	0.371

**Diferencia estadística

Tabla A6.4. Datos estadísticos de las concentraciones de metales en copépodos.

	Cd	Cr	Cu	Fe	Zn
Valor de z	0.39	0	0.25	0.12	0.38
Valor de ρ	0.69	1	0.798	0.898	0.701

Tabla A6.5. Datos estadísticos de los factores de bioacumulación de las hojas y raíces de *T. testudinum*.

Hojas					
	Cr	Cu	Fe	Pb	Zn
Valor de z	2.6**	2.05**	0.32	0.96	0.76
Valor de ρ	0.009	0.004	0.748	0.336	0.443
Raíces					
Valor de z	1.68	-	0.31	2.16**	1.79
Valor de ρ	0.09	-	0.749	0.03	0.073

**Diferencia estadística

Tabla A6.7. Datos estadísticos de los factores de bioacumulación en copépodos.

	Cd	Cu	Fe	Zn
Valor de z	-	0.93	0.28	0.28
Valor de ρ	-	0.350	0.772	0.774