



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE BIOLOGÍA

LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

**Determinación de la concentración de metales en
Cyprinus carpio, Linnaeus 1758 (carpa común) de la
Laguna de Metztlán, Hidalgo, México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

P R E S E N T A:

LOZADA ZARATE JOSÉ ERNESTO

DIRECTOR DE TESIS: WILLIAM SCOTT MONKS SHEETS

PACHUCA DE SOTO, HIDALGO

2007



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE BIOLOGÍA
COORDINACIÓN DE LA LICENCIATURA EN BIOLOGIA

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE CONTROL ESCOLAR, UAEH

P R E S E N T E

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al pasante de Licenciatura en Biología **José Ernesto Lozada Zárate** quien presenta el trabajo recepcional de tesis titulado “Determinación de la concentración de metales en *Cyprinus carpio*, Linnaeus 1758 (carpa común) de la Laguna de Metztlán, Hidalgo, México”, después de revisarlo en reunión de sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE:

Dr. Alberto José Gordillo Martínez

PRIMER
VOCAL:

Dr. Juan Carlos Gaytán Oyarzún

SEGUNDO
VOCAL:

Dr. William Scott Monks Sheets

TERCER
VOCAL:

Dra. Griselda Pulido Flores

SECRETARIO:

Dr. Francisco Prieto García

PRIMER
SUPLENTE:

Dra. Maritza López Herrera

SEGUNDO
SUPLENTE:

Biol. Jorge Alberto Valdiviezo Rodríguez

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

A T E N T A M E N T E
“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”
Pachuca de Soto, Hidalgo a 08 de enero de 2018


Biol. Ulises Iturbe Acosta
Coordinador Adjunto de la Licenciatura en Biología



AGRADECIMIENTOS

Al Dr. William Scott Monks Sheets y la Dra. Griselda Pulido Flores, por la disposición y consejos en la realización de esta tesis, por todo el apoyo desde que puse pie en el laboratorio, por sus valiosas opiniones personales las cuales me ayudaron a formarme en mi nivel académico y social, por todas las experiencias tan bonitas en salidas a campo y congresos y por sus grandes sentidos del humor, de verdad los quiero mucho.

Al comité evaluador de esta tesis por sus sugerencias, críticas y comentarios:

Al Dr. Alberto José Gordillo Martínez, por su gran amistad, apoyo y consejos que dejan huella.

Al Dr. Juan Carlos Gaytán Oyarzún, por el apoyo y las valiosas aportaciones en mi nivel académico, además por su gran amistad.

Al Dr. Francisco Prieto García, por atender las dudas que me han surgido, no solo en lo relacionado con la presente tesis, por su sencillez y franqueza que lo caracterizan.

A la Dra. Maritza López Herrera, por los comentarios realizados a esta tesis, por su valioso tiempo empleado en la revisión y por su gran humor que lleva siempre.

Al Biol. Jorge Alberto Valdivieso Rodríguez, agradezco el apoyo incondicional y sus grandes comentarios. “Biólogo, le agradezco el haber aceptado ser parte del comité evaluador”.

Mis más sinceros agradecimientos a las siguientes personas e instituciones cuyo apoyo fue elemental para la realización de este trabajo:

A los directivos y administradores de la Comisión Nacional de Áreas Protegidas Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán por el apoyo logístico.

Al fondo SIZA-CONACYT por el ortagamiento de una beca para la realización de la tesis dentro del proyecto “Inventario de la helminthiasis en peces y su riesgo potencial zoonótico en comunidades indígenas de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México” (Clave 20020803006).

Al Sr. Andrés López por su apoyo en la colecta de los peces.

A mis compañeros de laboratorio Julián, Francisco, Erick, Gerardo, Diana y Christian por sus momentos de buen humor y por el apoyo, gracias amigos.

Finalmente a mis amigos de mi pueblo y de la misma universidad: Javier (pollo), Pedro Farfán, Karla, Lucia, Araceli, Rosalba y muchos mas.....gracias por sus consejos y sobre todo gracias por confiar en mi y por tenerlos cerca.



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

DEDICATORIA

A mi familia:

A mis padres José Marcelino Lozada González y Sofia Zarate Hernández, por ser la base de quien soy, por darme todo su apoyo, cariño y amor; por la paciencia y grandes esfuerzos invertidos, sobre todo por creer en mi y en mis sueños y por el hecho de que todavía los tengo a mi lado, mil gracias por todo papas, los amo.

A mis hermanos Jorge Alberto, Dulce Mireya y José Manuel, por el intercambio de palabras de aliento que nunca nadie podrá remplazar, por aguantar mis loqueras y malos ratos, por confiar en mi y sobre todo mil gracias por la protección que siempre encuentro en ustedes.

A mis amigos:

A Berenice Alemán, Rafaela Escorcía y Dulce Witvrun (Las freskis), que las quiero mucho y que sin ustedes las cosas pudieron haber sido muy aburridas.

A Sergio Checo, Julián Castelan, Fernanda (de mi pueblo), Rene Cabrera, Nallely Morales, Claudia (de químicas), Rene Cabrera (mi profesor) por tantas y tantas cosas compartidas, momentos de amistad pura y de baile, y sobre todo por su gran apoyo incondicional, gracias hermanos.

A Claudia Calvario, Felipe, Jorge y Pedro Salinas, por su apoyo y su gran amistad, ya que sin ustedes las cosas allí hubieran sido muy aburridas.

A Mary y Natalia de la coordinación por su gran apoyo y por ser tan lindas conmigo, gracias amigas las quiero mucho.

Finalmente, dedico este trabajo a toda la gente del Centro de Investigaciones Biológicas, incluyendo a las del Centro de Investigaciones Químicas, que de alguna manera siempre tuvieron algo nuevo que enseñarme.

En general, dedico este trabajo a la gente que conocí durante mi estancia en la UAEH ya que tuvo una repercusión importante en mi vida.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. ANTECEDENTES	5
2.1. Características biogeográficas de la laguna de Metztlán	5
2.2. Contaminación por metales pesados	7
2.3. Tabla de concentraciones máximas de metales recomendadas en diferentes muestras	8
2.4. Distribución y niveles de metales pesados en peces (estudios en México y otras partes del mundo)	10
2.5. Características generales de los metales en estudio	12
2.5.1. Elementos esenciales	12
2.5.1.1. Calcio	12
2.5.1.2. Magnesio	13
2.5.1.3. Potasio	14
2.5.1.4. Sodio	15
2.5.1.5. Zinc	15
2.5.2. Elementos no esenciales	16
2.5.2.1. Aluminio	16
2.5.2.2. CADMIO	18
2.5.2.3. Cromo	19
2.5.2.4. Plomo	20

2.6. Antecedentes técnicos: el uso de la espectroscopia atómica para la determinación de metales	21
2.7. Aspectos generales de la carpa común	23
3. JUSTIFICACIÓN.....	24
4. OBJETIVOS	26
4.1. Objetivo general	26
4.2. Objetivos específicos	26
5. MATERIAL Y MÉTODOS	27
5.1. Zona de estudio (área de colecta)	27
5.2. Trabajo de campo	27
5.3. Trabajo de laboratorio	28
5.4. Análisis	30
5.4.1. Digestión de la muestra por microondas.....	30
5.4.2. Preparación de estándares para la lectura de los elementos en estudio.....	30
5.4.3. Preparación de muestras para la determinación de los elementos en emisión atómica	31
5.4.4. Lectura de los metales de estudio por medio del equipo de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP)	31
6. RESULTADOS	33
6.1. Época de estiaje	33
6.2. Época de lluvia	38
7. DISCUSIÓN	44
7.1. Concentración bioacumulada de metales en <i>Cyprinus carpio</i> (en época de estiaje y de lluvia)	44

7.2. Concentración de metales en agua (época de estiaje y de lluvia)	48
7.3. Potencial de riesgo asociado al consumo de los ejemplares estudiados	51
8. CONCLUSIONES	54
9. BIBLIOGRAFÍA	56
10. ANEXOS	62
10.1. Siglas usadas	62
10.2. Material y reactivos utilizado	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de Hidalgo, localizando los límites de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, y dentro de la Reserva con un círculo rojo, situación de la Laguna de Metztitlán	5
Figura 2	Zona de estudio (Laguna de Metztitlán)	27
Figura 3	<i>Cyprinus carpio</i> (carpa común) que se utilizó en el presente estudio.....	28
Figura 4	Separación del pescado en sus partes: branquias, piel, músculo, tracto digestivo con órganos asociados y esqueleto	29
Figura 5	Equipo de microondas que se utilizó para digerir los tejidos de la carpa.....	30
Figura 6	Muestras que se digirieron, filtraron y aforaron para su análisis en el equipo	31
Figura 7	Equipo de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente que se utilizó para la lectura de metales	32
Figura 8	Cinética de pérdida de humedad de cada tejido del pescado durante seis días	34
Figura 9a	Concentración bioacumulada en mg/100g de Cd, Cr y Pb por cada tejido del pescado	35
Figura 9b	Concentración bioacumulada en mg/100g de Al, K y Zn por cada tejido del pescado	36
Figura 9c	Concentración bioacumulada en mg/100g de Ca, Mg y Na por cada tejido del pescado	37
Figura 10	Niveles de concentración de metales presentes en el agua de la Laguna de Metztitlán	38

Figura 11	Cinética de pérdida de humedad de cada tejido del pescado durante seis días	39
Figura 12b	Concentración bioacumulada en mg/100g de Al, K y Zn por cada tejido del pescado	41
Figura 12c	Concentración bioacumulada en mg/100g de Ca, Mg y Na por cada tejido del pescado	42
Figura 13	Niveles de concentración de metales presentes en el agua de la Laguna de Metztitlán	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I	Valores límites establecidos para aluminio	8
Tabla II	Valores límites establecidos para cadmio	8
Tabla III	Valores límites establecidos para calcio	8
Tabla IV	Valores límites establecidos para cromo	8
Tabla V	Valores límites establecidos para magnesio	9
Tabla VI	Valores límites establecidos para plomo	9
Tabla VII	Valores límites establecidos para potasio	9
Tabla VIII	Valores límites establecidos para sodio	9
Tabla IX	Valores límites establecidos para zinc	9
Tabla X	Valores límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-027SSA1-1993, Bienes y servicios. Productos de la pesca	9
Tabla XI	Determinaciones de las humedades en el tiempo	33
Tabla XII	Concentraciones de metales bioacumulados en cada tejido, evaluados en base seca	35
Tabla XIII	Concentración de metales pesados presentes en el agua de la Laguna de Metztitlán	37
Tabla XIV	Concentraciones de metales bioacumulados en cada tejido, evaluados en base seca	38
Tabla XV	Concentraciones de metales bioacumulados en cada tejido, evaluados en base seca	40
Tabla XVI	Concentración de metales pesados presentes en el agua de la Laguna de Metztitlán	43

RESUMEN

Estudios realizados sobre la evaluación de la calidad ambiental dentro de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, indican que el agua está contaminada por metales pesados con valores que sobrepasan lo permitido por la Norma Oficial Mexicana. Por su alta persistencia en el entorno y al ser bioacumulados por los seres vivos, dichos metales afectan las cadenas tróficas. Este trabajo se realizó con peces de la Laguna de Metztitlán, Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, la cual es económica y ecológicamente importante para la región. El objetivo del estudio fue determinar la concentración de Aluminio, Cadmio, Calcio, Cromo, Plomo, Magnesio, Potasio, Sodio y Zinc bioacumulados en *Cyprinus carpio*, pez que se cultiva y se consume en la zona de estudio.

Los peces se disectaron y se separaron en tejidos, los tejidos se secaron en estufa a 40°C hasta obtener una masa constante, se realizó la digestión por microondas y se determinó la concentración de metales por emisión atómica con plasma acoplado inductivamente.

Los resultados no mostraron la bioacumulación de los metales tóxicos (cadmio, cromo y plomo) en los tejidos de la carpa, mientras que para los metales considerados de menor toxicidad (aluminio, calcio, magnesio, potasio, sodio y zinc), se manifiestan en los diferentes tejidos, con niveles de concentración altos. Es evidente que existiendo estos metales en el agua y siendo biodisponibles, las branquias, la piel, las vísceras, el músculo y el hueso estarán expuestos continuamente a esta contaminación.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire, el agua y el suelo, es uno de los más graves problemas que preocupa al hombre, el cual es un fenómeno que él mismo ha ocasionado. La industria que se ha convertido en una actividad necesaria para la vida moderna en los países desarrollados, ha generado una serie de peligros ambientales. Los países en desarrollo, al modernizarse han generado el mismo tipo de problemas, quizá más agudos debido a la falta de recursos económicos, científicos, tecnológicos y humanos que los enfrenten; a causa de ello, día a día el mundo se enfrenta a la necesidad de crear una conciencia sobre el medio ambiente (Peña *et al*, 2001).

Los contaminantes solubles de la atmósfera y de los suelos, a través de escurrimientos y filtraciones al subsuelo de las precipitaciones pluviales naturales son arrastrados, las aguas residuales e industriales que tienen un tratamiento deficiente o inclusive ningún tipo de tratamiento de depuración, son introducidos en los sistemas de drenajes y alcantarillados urbanos con destino final en los ríos, lagunas y mares lo que ocasiona el deterioro de los ecosistemas y cuencas hidrológicas, además de la biodiversidad que habita en ellos (Viessman y Hammer, 1993).

Diversos contaminantes del agua como pesticidas, sales, detergentes y los metales pesados, entre otros, los metales pesados son muy importantes, éstos se definen como elementos químicos con densidad mayor que 5g/cm^3 en forma elemental o con número atómico mayor de 20. Se clasifican entre las sustancias identificadas como contaminantes, aunque este término es impreciso, ya que existen 65 elementos que pueden ser denominados de esa manera (Toral, 1996). Entre los efectos negativos de los metales pesados se encuentran daños a la salud, ya sea por exposición o por bioacumulación, impedimentos para riego e

industria, siendo un peligro para los ecosistemas y las cadenas tróficas atentando contra el equilibrio biológico de la tierra.

Es común la presencia de metales pesados en suelos o aguas de manera natural, por conformación de rocas del sustrato geológico que los presentan, la región de Metztlán, Hidalgo es uno de esos casos, su presencia en esta región se debe a la composición geoquímica constituida por rocas formadas en el Cenozoico Cuaternario (aluvión, suelos residuales y depósitos lacustres) y Mesozoico Cretácico (rocas sedimentarias marinas, calizas con pedernal, dolomitas, lutitas, margas, arcillas, areniscas y evaporitas) (Geyne *et al*, 1963).

Por consecuencia de actividades antropogénica, los metales pueden estar presentes en suelo y agua debido a las descargas industriales y residuales. En el agua, al ser contaminada provoca que organismos acuáticos, como los peces, bioacumulen estos metales produciendo daños toxicológicos en su metabolismo y, por ende, en los consumidores. En el suelo, provoca que vegetales que crecen en él absorban estos metales, ocasionando daños en la fisiología de la planta y pasen a la cadena trófica.

En los seres vivos se encuentran numerosos elementos químicos, al no tener una función biológica definida, no todos ellos son esenciales para la vida. Entre los elementos no esenciales se encuentra: Arsénico (As), Aluminio (Al), Antimonio (Sb), Bario (Ba), Berilio (Be), Bromo (Br), Boro (B), Cadmio (Cd), Cesio (Cs), Estroncio (Sr), Litio (Li), Mercurio (Hg), Platino (Pt), Plata (Ag), Plomo (Pb), Rubidio (Rb), Telurio (Te), Talio (Tl) y Titanio (Ti) (Bohinski, 1991). Algunos de los elementos no esenciales tales como el Plomo, Cadmio, Arsénico, etc., son tóxicos, pero a pesar de ello, las células vegetales y animales los almacenan sin conocer cual es su función o valor biológico. Entre los elementos esenciales se consideran: Calcio (Ca), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estaño (Sn), Hierro (Fe), Magnesio (Mg),

Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Potasio (K), Sodio (Na), Selenio (Se), Vanadio (V), Zinc (Zn), entre otros.

Sin el aporte de los elementos esenciales, la vida no es posible, ya que desempeñan funciones importantes como componentes de hormonas, enzimas, vitaminas en el metabolismo proteico, entre otros. Por ejemplo, el magnesio y el zinc son nutrientes, que en microcantidades son elementos esenciales para el metabolismo de los organismos. Si la concentración de estos, se incrementa, pueden producir daños toxicológicos a la salud. En los ecosistemas acuáticos, los metales pesados, pueden afectar a los peces y bioacumularse por tres posibles vías: a través de las branquias, considerada como la vía más directa e importante; a través de la ingestión de comida, y a través de la superficie corporal (Amundsen *et al*, 1997).

Considerando lo anterior, el escaso conocimiento de la presencia y las concentraciones de los contaminantes en el ambiente, despierta el interés de estudio. Por lo cual, el propósito del siguiente trabajo fue presentar los resultados de las concentraciones de metales en diferentes tejidos de *Cyprinus carpio* (carpa común) que habita en la Laguna de Metztitlán, Hidalgo, México, teniendo con esto, una idea sobre el potencial de riesgo asociado al consumo de los ejemplares. Despertando interés y cabida a posteriores estudios.

2. ANTECEDENTES

2.1 Características biogeográficas de la laguna de Metztitlán

La Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán perteneciente al Centro Este del estado de Hidalgo, Comprendida entre los paralelos 98°23'00" y 98°57'08" longitud Oeste y 20°14'15" y 20°45'26" latitud Norte, con elevaciones entre 1,000 y 2,000 msnm (CONANP, 2003), tiene una extensión de 96,643 hectáreas (**Fig.1**), la Laguna de Metztitlán, es de gran importancia económica y ecológicamente para la región, ya que representa un refugio para las aves migratorias y locales de la Barranca.

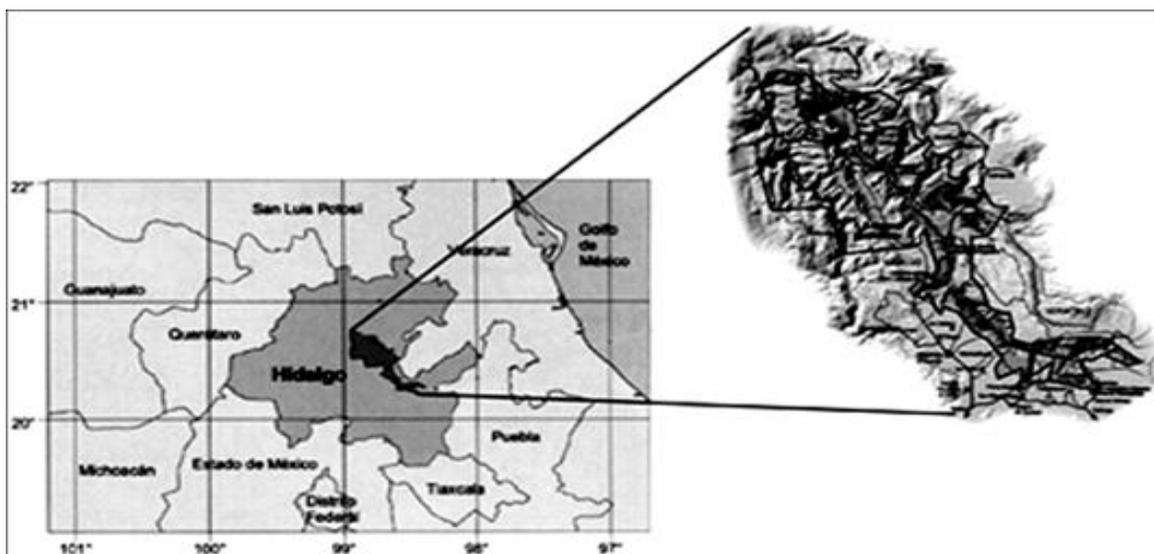


Fig. 1. Mapa de Hidalgo, localizando los límites de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, y dentro de la Reserva con un círculo rojo, situación de la Laguna de Metztitlán.

Para la población de la Vega de Metztitlán, la laguna representa una fuente de alimento y empleo, ya que de ella, varias familias de pescadores cultivan carpas y mojárras para su comercialización y consumo en la región. También, este cuerpo de agua es un regulador del clima local y proporciona condiciones favorables para la agricultura (CONANP, 2003).

El área de estudio está dentro de la zona núcleo 1, Cordón Cerro Alto (de amortiguamiento). Para esta zona se han establecido subzonas específicas con diferentes fines, fundamentadas en el Decreto de Creación del Área y el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2003), dichas subzonas son las siguientes: para uso tradicional, para aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, para aprovechamiento sustentable de agroecosistemas, para uso público, para asentamientos humanos y para recuperación.

El estudio se realizó en la subzona de aprovechamiento sustentable de agroecosistemas. Esta zona abarca el 20% de la superficie de la Reserva con 19,334 hectáreas e incluye las áreas dedicadas a la actividad agrícola, pecuaria y agroforestal en la cual se busca la compatibilidad de éstas actividades con la conservación de los recursos naturales, implementándose tecnologías de bajo impacto ambiental que disminuyan el deterioro del suelo y el agua (CONANP, 2003).

Los tipos de industrias presentes a lo largo del Río Grande de Tulancingo y del Río Metztitlán que se encuentra dentro de la subzona son: producción agropecuaria, producción de alimentos, producción de bebidas, manufactura de textiles, manufactura de productos de madera, manufactura de productos químicos industriales, manufactura de productos de caucho, industria de productos minerales no metálicos e industria metalmecánica.

Los efluentes de tipo industrial generados en el Río Grande de Tulancingo, parte del río Metztitlán y dentro de la región de Metztitlán, se estiman en 6, 375,000 m³/año, entre los que se encuentran disueltos o semidisueltos una variedad de residuos peligrosos, como los metales pesados. Tanto los efluentes de origen industrial como los de origen doméstico son vertidos prácticamente sin ningún tipo de tratamiento al cauce receptor (Río Grande de Tulancingo), el

cual continúa su trayectoria hasta llegar a la localidad de Metztlán, en donde se le denomina Río Metztlán, finalizando en Laguna de Metztlán, dándose por este hecho problemas de contaminación.

2.2 Contaminación por metales pesados

Por sus rutas metabólicas, los animales contienen mayores cantidades de minerales que las plantas. Éstos participan principalmente en el sistema óseo y otros tejidos, donde desempeñan funciones importantes y específicas que deben estar presentes en cantidades apropiadas para mantener las funciones vitales corporales (Stalling, 1986).

Los peces, al vivir en un medio acuático contaminado, se ven afectados de manera irremediable. Al tiempo, por la bioacumulación de dichos elementos, puede desencadenarse una serie de daños fisiológicos, causando el envenenamiento y por ende la muerte (Monks, *et al*, 2003).

La bioacumulación es la capacidad de ciertos compuestos químicos para acumularse durante años, e incluso decenios en los tejidos de plantas y animales, en niveles crecientemente mayores a los que se encuentran en el entorno, incrementando su potencial para el transporte a grandes distancias desde la fuente de emisión (Stalling, 1986). La bioacumulación en peces es mayor cuando el peso corporal es bajo, es decir en organismos jóvenes, durante los períodos de crecimiento, en aguas con una salinidad baja y en aguas con una temperatura más o menos alta (Stalling, 1986). La bioacumulación se ha estudiado en el cuerpo de peces y en diferentes tejidos. Las diferencias entre tejidos se han dado a conocer entre diversos órganos (Lozada, *et al*, 2006).

2.3 Tabla de concentraciones máximas de metales recomendadas en diferentes muestras.

Es de mención que la toxicología ambiental estudia los daños causados al organismo por la exposición a los tóxicos que se encuentran en el medio ambiente. La presencia de los elementos metálicos pueden ser causantes de problemas en la salud y la magnitud de la respuesta tóxica, en un organismo determinado depende de la exposición (dosis, tiempo, ruta y vía de exposición) y de factores relacionados con las características del organismo expuesto, del medio ambiente y de la sustancia misma. Sin embargo, todos son acumulados por los organismos, ya que difícilmente son eliminados en procesos fisiológicos y se puede considerar que no son biodegradables (Toral, 1996).

A continuación se muestran la concentración recomendada en diferentes muestras que no deben sobrepasar su límite, ya que de lo contrario podría exhibirse una elevada contaminación y por ende una fuerte toxicidad sobre los seres vivos, incluyendo al hombre:

Tabla I. Valores límites establecidos para aluminio.

Agua potable	0.2mg/l (OMS)
Alimentos	3 y 100mg/día (FAO)

Tabla II. Valores límites establecidos para cadmio.

Aire rural	0.001 – 0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Aire urbano	0.01 – 0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Suelo	1 mg/kg
Agua dulce	1 $\mu\text{g}/\text{l}$
Agua potable	5 $\mu\text{g}/\text{l}$ (OMS)
Alimentos	500ug/persona/semana (FAO/OMS)

Tabla III. Valores límites establecidos para calcio.

Agua potable	400 mg/l (OMS)
Agua dulce	500 mg/l (OMS)
Alimentos	1000 mg/persona (solo se absorbe 365mg en el duodeno)

Tabla IV. Valores límites establecidos para cromo.

Aire urbano	50 ng/m ³
Agua de ríos	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Agua de océanos	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Agua potable	0.05 mg/l (OMS)
Suelo	125 mg/kg en promedio, aunque puede aumentar hasta 250 mg/kg (no existe un límite preciso)
Alimentos	La ingesta diaria no debe exceder de 0.03 - 0.1mg/día

Tabla V. Valores límites establecidos para magnesio.

Agua potable	----- (EPA)
Alimentos	200 y 400 mg/día/persona (FAO/OMS)
Agua de riego	----- (NOM - 93)

Tabla VI. Valores límites establecidos para plomo.

Agua potable	0.05 mg/l (OMS, 1984)
Suelo	Hasta 35 mg/kg
Alimentos	3mg/persona adulta/semana (FAO/OMS, 1972, 1978) Se refiere a ingestión semanal tolerable. No se ha fijado un valor equivalente en niños.
Aire	2 μm^3 (concentración media anual) (CEE, 1987)
Aire	0.7 μm^3 (URSS, 1978)
Aire	2 μm^3 (EPA, EUA)

Tabla VII. Valores límites establecidos para potasio.

Alimentos	3000 mg/día (OMS)
Agua	----- (EPA)
Aire	----- (OSHA)

Tabla VIII. Valores límites establecidos para sodio.

Alimentos	1.600mg/día (FAO/OMS)
Agua potable	200mg/l (OMS, 1993)
Agua	----- (EPA)
Aire	----- (EPA)

Tabla IX. Valores límites establecidos para zinc.

Alimentos	10-15 mg/persona
Agua potable	5.0 mg/l (EPA)
Aire rural	1 mg/ m^3 (OSHA)
Aire urbano	5 mg/ m^3 (OSHA)
Agua potable	3 mg/l (OMS, 1993)

Tabla X. Valores límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-027SSA1-1993, Bienes y servicios. Productos de la pesca.

Cadmio	0.5
Mercurio	1.0
Hg como metil mercurio	0.5
Plomo	1.0

La toxicidad de los metales pesados es alta. Su acción directa sobre los seres vivos ocurre a través del bloqueo de las actividades biológicas, es decir, la inactivación enzimática por la formación de enlaces entre el metal y los grupos -SH (sulfhidrilos) de las proteínas, causando daños irreversibles en los diferentes organismos (Donat y Dryden, 2001). Éste mecanismo celular involucra un sistema de transporte de membrana que internaliza o bioacumula al metal pesado presente en el entorno celular, el consumo energético de esta reacción química se genera a través del sistema H^+ -ATPasa. Una vez el metal pesado esta incorporado al citoplasma, éste es atrapado por las proteínas ricas en grupos sulfhidrilos llamadas metalotioneínas, o bien, es compartimentalizado dentro de una vacuola, similar a lo que ocurre en hongos (Srinath *et al*, 2002).

2.4 Distribución y niveles de metales pesados en peces (estudios en México y otras partes del mundo)

Los metales pesados, son más afines a ciertos órganos que otros a la hora de bioacumularse, la mayoría de los autores coinciden en resultados parecidos de patrones de bioacumulación en vía acuática. Por ejemplo, el Zn se acumula principalmente en branquias, también se acumula en hígado y poco en riñón y músculo. En un estudio, después de exponer truchas arcoiris al Zn, durante 30 días en agua de río, se concluyó que el Zn se acumuló en branquias, hígado, riñón, hueso opercular y muy poco en músculo (Camusso *et al*, 1995).

El cadmio se bioacumula principalmente en riñón, seguido del hígado, branquia y finalmente en músculo (WHO, 1992). Los niveles relativos de Cd son mucho mayores en hígado que en todo el pez o músculo. El riñón tiende a acumular más Cd que el hígado (McCracken *et al*, 1987).

Hodson *et al*, (1978) mencionan que el Pb se acumula más en hígado, seguido de branquias (si la vía de absorción es acuática), en riñón y en menor cantidad en músculo. La

ingestión de Pb por los peces, alcanza el equilibrio sólo después de varias semanas de exposición. En otro estudio por la misma autoridad, mencionaron que tras la exposición crónica (21 días) en trucha arcoiris (*Salmo gairdneri*) con dosis subletales de Pb, la concentración más elevada la encontraron en hueso opercular, seguido de branquias y riñón, mientras que la acumulación en cerebro no se presentó

En México, Vázquez *et al*, (2005) con el fin de evaluar si el tratamiento terapéutico con sulfato de cobre producía estrés en juveniles de *Carassius auratus* (Linnaeus, 1758), mencionan que si no se tiene un uso adecuado sobre el empleo del sulfato de cobre (0.5 mg/l) como tratamiento, puede producir un excesivo estrés sobre los ejemplares, conllevando además a la bioacumulación del derivado de este metal en branquias, piel, hígado y músculo, provocando una fuerte toxicidad y por ende la muerte.

En Hidalgo, estudios recientes sobre endoparásitos de peces pertenecientes a la Laguna de Metztlán, indicaron que los helmintos intestinales sirven como bioindicadores de la calidad del agua, mediante el análisis de la biodiversidad local, estructura de las comunidades y etapas de desarrollo presentes (Monks *et al*, 2003)

En otras partes del mundo, como en el Perú, Vera *et al*, (2001) desarrollaron pruebas ecotoxicológicas usando organismos nativos (pejerrey), con el fin de evaluar la toxicidad de efluentes con metales pesados tales como el cadmio y cromo. Ellos mencionan que comparativamente, el cadmio es más tóxico que el cromo y la tolerancia del pejerrey a estos metales pesados sugiere su uso como organismo representativo del grupo de los vertebrados acuáticos en las pruebas ecotoxicológicas, ya que las postlarvas fueron expuestas a diferentes concentraciones de entre 0.142 a 1.208 mg/l de cadmio, y 0.53 a 33.74 mg/l de cromo.

En Islamabad, Pakistán, Shah, (2005) menciona que la acumulación de metales pesados en una especie de pez (*Tinca tinca*), de Plomo, Cadmio y Mercurio en el cuerpo es de 0.011, 0.32

y 1.59 mg/g, haciendo mención que la acumulación en su orden es: Hg< Cd< Pb, ya que utilizó una 96-h LC₅₀ de 1.0, 6.5 y 300.0, ppm, respectivamente. De acuerdo a la bioacumulación de metales pesados en los tejidos analizados (músculo, piel, testículos y ovarios), concluyó que el orden para el mercurio es: testículos> ovarios> piel> músculo> branquias, para cadmio es: testículos> branquias> músculo> ovarios>piel, y para plomo es: piel> branquias> músculo> ovarios> testículos.

Los datos de un estudio realizado por Farag *et al.*, (1998) en España, muestran que los metales son biodisponibles y que aunque no se biomagnifiquen a través de niveles tróficos, sí se bioacumulan a concentraciones que causan efectos fisiológicos en peces.

En general, el orden de bioacumulación de metales pesados en la cadena alimenticia (en ambientes acuáticos) es como sigue: capa biológica = sedimentos > invertebrados > peces > humano (Deacon y Driver, 1999).

2.5 Características generales de los metales en estudio

Los metales en este estudio se clasificaron en esenciales y no esenciales. A continuación, se recoge la información de manera específica de estos elementos, indicando sus propiedades, efectos ambientales que provocan y efectos sobre la salud humana.

2.5.1 Elementos esenciales

2.5.1.1 Calcio

Propiedades: El calcio (Ca) es un metal alcalinotérreo, trimorfo, más duro que el sodio, pero más blando que el aluminio. Al igual que el berilio y el aluminio, pero a diferencia de los metales alcalinos, no causa quemaduras sobre la piel. El calcio es el componente principal de la dureza del agua, se le encuentra como carbonato de calcio en un rango de 5–500 mg/L, y está presente en minerales como la piedra caliza y en el yeso.

Algunos organismos acuáticos, como los pólipos, utilizan el calcio del agua de mar para formar sus esqueletos (Kemmer y McCallion, 1997).

Contaminación ambiental: El metal producido en forma comercial reacciona fácilmente con el agua y los ácidos, produciendo hidrógeno que contiene cantidades notables de amoníaco e hidrocarburos como impurezas. El calcio es un constituyente invariable de todas las plantas, ya que es esencial para su crecimiento, lo contienen como constituyente estructural y como ión fisiológico. El calcio se encuentra en el tejido blando y en la estructura del esqueleto de todos los animales. Los huesos de los vertebrados contienen calcio en forma de fluoruro de calcio, carbonato de calcio y fosfato de calcio. El fosfato de calcio presente en los ecosistemas acuáticos es muy tóxico para la biota existente (Ortega *et al.*, 2000).

Efectos sobre la salud humana: El exceso de calcio durante un tiempo prolongado puede producir estreñimiento, aumentar el riesgo de formación de cálculos renales y alteraciones renales e interferir en la absorción de otros minerales como hierro y zinc (Ortega *et al.*, 2000).

2.5.1.2 Magnesio

Propiedades: El magnesio (Mg) es un metal alcalinotérreo, blanco plateado y muy ligero. Este metal constituye una tercera parte de la dureza total del agua, es el componente primordial de muchos minerales, como la dolomita, la magnesita y muchas variedades de arcilla (Kemmer y McCallion, 1997).

Contaminación ambiental: En un espectro del 0 al 3, los vapores de óxido de magnesio registran un 0.8 de peligrosidad para el medioambiente. Una puntuación de 3 representa un peligro muy alto para el medioambiente y una puntuación de 0 representa un peligro insignificante. Los factores tomados en cuenta para la obtención de este rango incluye el grado de persistencia del material y/o su carencia de toxicidad, la medida de su capacidad

de permanecer activo en el medioambiente y si se acumula o no en los organismos vivos. Si otros mamíferos inhalan vapores de óxido de magnesio, pueden sufrir efectos similares a los de los humanos (Holding, 2006).

Efectos sobre la salud humana: El magnesio no es sospechoso de ser cancerígeno o mutagénico. La exposición a los vapores de óxido de magnesio producidos por los trabajos de combustión, soldadura o fundición del metal pueden resultar en fiebres de vapores metálicos síntomas temporales de fiebre, escalofríos, náuseas, vómitos y dolores musculares. Estos se presentan normalmente de 4 a 12 horas después de la exposición y duran hasta 48 horas. Los vapores de óxido de magnesio son un subproducto de la combustión del magnesio (Holding, 2006).

2.5.1.3 Potasio

Propiedades: El potasio (K) es un metal alcalino, extremadamente blando y químicamente reactivo. Está relacionado con el Sodio, tanto que rara vez se analiza como un componente separado en el análisis del agua. Su ocurrencia es menor en la naturaleza y por esta razón se encuentra en concentraciones mas bajas que el sodio. No tiene importancia en las fuentes de agua para uso público o en el agua que se utiliza para la industria (Kemmer y McCallion, 1997).

Contaminación ambiental: Como tal, el potasio es requerido en proporciones relativamente elevadas por las plantas en desarrollo, pero elevados niveles de potasio soluble en el agua pueden causar daños a las semillas en germinación ya que inhiben la toma de otros minerales y reducen la calidad del cultivo (Holding, 2006).

Efectos sobre la salud humana: El potasio se encuentra en vegetales, frutas, papas, carne y productos elaborados. Juega un papel importante en los sistemas de fluidos físicos de los humanos y asiste en las funciones de los nervios. Cuando el sistema renal no funciona bien

se puede dar la acumulación de potasio. Esto puede llevar a cabo una perturbación en el ritmo cardíaco. Cuando existe una falta de potasio en el organismo se pueden originar alteraciones en la transmisión de los impulsos nerviosos y sobre el equilibrio osmótico (Holding, 2006).

2.5.1.4 Sodio

Propiedades: El sodio (Na) es un metal alcalino, suave, reactivo y de bajo punto de fusión. Desde el punto de vista comercial, el sodio es el más importante de los metales alcalinos. Todas las sales de sodio son muy solubles en el agua, aunque ciertos complejos con los minerales no lo son. El alto contenido de cloruros en el agua de mar generalmente está asociado con el ion Na^+ . Está presente en ciertos tipos de arcillas y feldespatos (Kemmer y McCallion, 1997).

Contaminación ambiental: Este compuesto químico no es móvil en su forma sólida, aunque absorbe la humedad muy fácilmente. Una vez líquido, el sodio se filtra rápidamente en el suelo, con la posibilidad de contaminar las reservas de agua (Holding, 2006).

Efectos sobre la salud humana: El sodio es un componente de muchas comidas, por ejemplo la sal común. Este elemento es necesario para los humanos para mantener el balance de los sistemas de fluidos físicos. El sodio es también requerido para el funcionamiento de nervios y músculos. Un exceso de sodio produce lesiones en riñones e incrementa las posibilidades de hipertensión (Ortega et al, 2000).

2.5.1.5 Zinc

Propiedades: El zinc (Símbolo atómico =Zn) en forma pura es un metal cristalino, insoluble en agua caliente y fría, pero soluble en alcohol, en los ácidos y en los álcalis. El metal es extremadamente frágil a temperaturas ordinarias, pero se vuelve maleable entre los 120°C y los 150°C y se lamina fácilmente al pasarlo entre rodillos calientes. El zinc es uno de los elementos menos comunes y se estima que forma parte de la corteza terrestre en un

0.0005-0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal forma mineral es la blenda y esfalerita de zinc (Kemmer y McCallion, 1997).

Contaminación ambiental: Por causas no naturales, la mayoría del zinc que se aporta al medio ecológico, se realiza a través actividades industriales, como es la minería, la combustión de carbón, residuos y procesado del acero, aumentando las concentraciones existentes de forma natural (Holding, 2006). El agua es contaminada debido a la presencia de grandes cantidades de zinc presentes en aguas residuales provenientes de plantas industriales. Las aguas residuales no son depuradas satisfactoriamente por lo que algunos organismos acuáticos, como los peces, pueden bioacumular zinc en sus cuerpos atentando con el transporte de este metal a través de la cadena alimenticia. El zinc puede interrumpir la actividad biológica en los suelos, con influencias negativas en la actividad de microorganismos y lombrices. La descomposición de la materia orgánica posiblemente sea más lenta debido a esto (Spear, 1981).

Efectos sobre la salud humana: El zinc es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Cuando los individuos absorben cantidades excesivas de zinc, estos pueden experimentar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, del sabor y del olor, provocando la aparición de pequeñas llagas y erupciones cutáneas. La acumulación del zinc puede incluso producir efectos genotóxicos o mutagénicos, arteriosclerosis, úlceras en estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas, anemia, daño en páncreas y perturbación del metabolismo de las proteínas (Holding, 2006).

2.5.2 Elementos no esenciales

2.5.2.1 Aluminio

Propiedades: El aluminio (Al) es uno de los metales más ampliamente usados y también uno de los más frecuentemente encontrados en los compuestos de la corteza terrestre

(Kemmer y McCallion, 1997). En su forma pura es blando y tiene poca resistencia mecánica, pero puede formar aleaciones con otros elementos para aumentar su resistencia y adquirir varias propiedades útiles. Las aleaciones de aluminio son ligeras, fuertes y de fácil formación para muchos procesos de metalistería. Son fáciles de ensamblar, fundir o maquinarse y aceptan gran variedad de acabados. Por sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas, el aluminio se ha convertido en el metal no ferroso de mayor uso (Kemmer y McCallion, 1997).

Contaminación ambiental: El aluminio puede acumularse en las plantas y causar problemas de salud a animales que consumen esas plantas. Las concentraciones de aluminio parecen ser muy altas en lagos acidificados. En estos lagos el número de peces y anfibios están disminuyendo debido a las reacciones de los iones de aluminio con las proteínas de las agallas de los peces y los embriones de las ranas. Elevadas concentraciones de aluminio no sólo causan efectos sobre los peces, si no también sobre los pájaros y otros animales que consumen peces contaminados e insectos. Las consecuencias para los pájaros que consumen peces contaminados es que la cáscara de los huevos es más delgada por lo que los polluelos nacen con bajo peso. Las consecuencias para los animales que respiran aluminio a través del aire son problemas de pulmones, pérdida de peso y declinación de la actividad (Holding, 2006).

Efectos sobre la salud humana: El aluminio es comúnmente conocido como un compuesto inocente pero cuando seres vivos son expuestos a altas concentraciones, este puede causar problemas de salud. La toma de aluminio puede tener lugar a través de la comida (quizá para el uso de sartenes y charolas del aluminio), a través de la respiración y por contacto en la piel. La toma de concentraciones altas de aluminio puede causar un efecto serio en la salud como daño al sistema nervioso central, demencia, pérdida de la memoria (mal de Alzheimer), apatía y temblores severos (Holding, 2006).

2.5.2.2 Cadmio

Propiedades: El cadmio (Cd) es un metal que posee unas características químicas parecidas a las del zinc. Se presenta en la naturaleza frecuentemente donde se encuentra el zinc y se origina como subproducto de la minería de este metal y del plomo. Se emplea para galvanizar otros metales y prevenir la herrumbre y en la fabricación de baterías y plásticos (Takayuki y Leonard, 1993).

Contaminación ambiental: De forma natural, grandes cantidades, sobre 25.000 toneladas al año, de cadmio son liberadas al ambiente. La mitad de este cadmio es liberado en los ríos a través de la descomposición de rocas, de fuegos forestales y volcanes. El resto del cadmio es liberado por las actividades humanas, como la manufacturación (Geyne *et al*, 1963). Otra fuente importante de emisión de cadmio es la producción de fertilizantes fosfatados artificiales. Parte de este elemento termina en el suelo después de que el fertilizante es aplicado en las granjas y el resto termina en las aguas superficiales cuando los residuos del fertilizante son vertidos por las compañías productoras (Holding, 2006). Las lombrices y otros animales esenciales para el suelo son extremadamente sensibles al envenenamiento por cadmio. Pueden morir a muy bajas concentraciones y esto tiene consecuencias en la estructura del suelo. Cuando las concentraciones de cadmio en el suelo son altas esto puede influir en los procesos del suelo de microorganismos y amenazar a todo el ecosistema del suelo. En ecosistemas acuáticos el cadmio puede bioacumularse en moluscos, crustáceos y peces. La susceptibilidad al cadmio puede variar ampliamente entre organismos acuáticos (Holding, 2006).

Efectos sobre la salud humana: La exposición industrial del cadmio puede afectar las vías respiratorias a través de malos hábitos higiénicos que pueden llevar a la absorción gastrointestinal. La inhalación de gases o polvos que contienen cadmio afectan

fundamentalmente las vías respiratorias, pero tiene como consecuencia efectos en el sistema, con algunas horas en exposición, se seca la garganta se tiene una sensación de contracción y dificultad respiratoria, puede haber dolor de cabeza, vómito y calambres; en casos graves se presenta el edema pulmonar (Berman, 1980).

2.5.2.3 Cromo

Propiedades: El cromo (Cr) es un metal común y ocupa el lugar 21 en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre. Es de color blanco plateado y sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados (Kemmer y McCallion, 1997).

Contaminación ambiental: Hay varias clases diferentes de cromo que difieren de sus efectos sobre los organismos. El cromo entra en el aire, agua y suelo en forma de cromo (III) y a través de procesos naturales y actividades humanas como cromo (VI). Las mayores actividades humanas que incrementan las concentraciones de cromo (III) son el acero, curtido de pieles, industrias textiles, pintura eléctrica y otras aplicaciones industriales del cromo (VI). Estas aplicaciones incrementan las concentraciones del cromo en agua (Holding, 1998-2006). No es conocido que el cromo se acumule en los peces, pero altas concentraciones de cromo, debido a la disponibilidad de metales en las aguas superficiales, pueden dañar las agallas de los peces que nadan cerca del punto de vertido. En animales, el cromo puede causar problemas respiratorios, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores (Berman, 1980).

Efectos sobre la salud humana: El cromo (VI) es un peligro para la salud de los humanos, mayoritariamente para la gente que trabaja en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición al cromo. El cromo (VI) es conocido porque causa varios efectos sobre membranas, mucosas y piel. La

exposición a este compuesto induce a alergias y dermatitis; las lesiones en la mucosa nasal son gran problema ya que en algunos casos el septum es perforado y cuando se respira se produce un sonido característico, también provoca dificultad respiratoria. Se han reportado casos de bronquitis debido a los derivados del cromo (cromatos) (Berman, 1980).

2.5.2.4 Plomo

Propiedades: El plomo (Pb) es un metal blando, maleable y dúctil. Si se calienta lentamente puede hacerse pasar a través de agujeros anulares o troqueles. Se presenta una baja resistencia a la tracción y es un mal conductor de la electricidad. Al hacer un corte, su superficie presenta un lustre plateado brillante, que se vuelve rápidamente de color gris azulado y opaco característico de este metal (Takayuki y Leonard, 1993).

Contaminación ambiental: El plomo se da de forma natural en el ambiente, pero las mayores concentraciones encontradas en el ambiente son el resultado de las actividades humanas (Holding, 2006). La presencia de plomo en el agua dulce generalmente indica la contaminación con desechos metalúrgicos o con venenos industriales que contienen plomo, también puede aparecer en el agua como resultado de la corrosión de amalgamas que contienen plomo como las municiones y soldaduras (Kemmer y McCallion, 1997). Las principales causas de la contaminación ambiental con este metal son: el empleo para la fabricación de baterías y su utilización en los aditivos antidetonantes de la gasolina. También se han utilizado plaguicidas que contienen plomo (Takayuki y Leonard, 1993). El plomo es un elemento químico particularmente peligroso, y se puede acumular en organismos individuales, pero también entrar en las cadenas alimenticias (Holding, 2006).

Efectos sobre la salud humana: El plomo puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida, como frutas, vegetales, carnes, granos, mariscos, refrescos y vino pueden contener cantidades significantes de este metal. También puede entrar por agua y por aire. El

humo de los cigarros también contiene pequeñas cantidades de plomo (Holding, 2006). El plomo puede causar perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, incremento de la presión sanguínea, daño en riñones, abortos y abortos sutiles, perturbación del sistema nervioso, daño al cerebro, disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma y la disminución de las habilidades de aprendizaje y perturbación en el comportamiento de los niños, como es agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad. También, el metal puede entrar en el feto a través de la placenta de la madre y debido a esto puede causar serios daños al sistema nervioso y al cerebro del feto (Galvão y Corey, 1987).

2.6 Antecedentes técnicos: el uso de la espectroscopia atómica para la determinación de metales

La espectroscopia atómica se emplea para determinar de una forma cualitativa y cuantitativa aproximadamente de 70 a 80 elementos. Los límites de detección de los métodos atómicos se encuentran en límites de partes por millón a partes por billón. La determinación espectroscópica de especies atómicas solo se puede llevar a cabo dentro de un medio gaseoso, en el cual los átomos individuales (o en ocasiones los iones elementales, como Fe^{+3} , Mg^{+2} o Al^{+3}) están separados uno de los otros (William, 1979).

La técnica de absorción atómica se basa en la capacidad que tienen los átomos en estado fundamental de excitarse cuando se hace incidir radiación de una longitud de onda determinada (Rodier, 1990).

La espectroscopia de absorción atómica se puede clasificar de acuerdo al sistema de atomización que se utilice para producir átomos en estado libre, en:

- Absorción atómica con flama.
- Absorción atómica con horno de grafito.

- Absorción atómica con generador de hidruros.
- Absorción atómica con vapor frío.

La determinación de metales pesados puede realizarse por diversos métodos (espectrofotometría de absorción atómica de llama, electrotrémica de absorción molecular con cámara de grafito, ICP, voltamperometría, etc.). De estos métodos, el ICP es uno de los utilizados en la actualidad para muestras biológicas (Prichard *et al*, 1996).

Para la lectura de los metales pesados en el presente trabajo, se ha utilizado la **Espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP)** debido a la disponibilidad del equipamiento y las ventajas que suponen en cuanto a mantenimiento, pureza de la lectura, límite de detección y resultados óptimos con respecto a la técnica clásica de espectrofotometría de absorción atómica, en sus modalidades de llama o cámara de grafito.

ICP es una técnica analítica multielemental desarrollada al principio de los años ochenta, que ha revolucionado la analítica inorgánica y orgánica, fundamentalmente debido a la rapidez de analítica, los límites de detección, capacidad isotópica y versatilidad, lo que hace posible la determinación de prácticamente cualquier elemento químico presente a nivel de traza en todo tipo de muestra, en un rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud (ng/l a mg/l) (Prichard *et al*, 1996).

Esta técnica se basa en la generación de un gas (argón) de iones a partir de los elementos contenidos en la muestra y la posterior separación de los mismos en función de su relación masa/carga. Un detector cuantifica el número de iones presentes para cada relación masa/carga. Su principal característica es que posee unos límites de detección para la mayoría de los elementos de ppb que la hace ideal para el análisis de elementos traza. La técnica tiene una amplia aplicación en la determinación de elementos de interés medioambiental, tanto en

sólidos como en líquidos, pudiendo analizar más de 70 elementos de forma simultánea (Prichard *et al*, 1996).

2.7 Aspectos generales de la carpa común

La carpa común (*Cyprinus carpio*, Linnaeus 1758), es un pescado magro, presenta una carne blanca, de agradable sabor y de alto valor nutricional; pudiendo alcanzar una longitud de aproximadamente 130 cm y un peso total de hasta 60 Kg. El pez es de cuerpo robusto, pesado y comprimido lateralmente, con una boca pequeña, protráctil y presentan un par de barbillas cortas. Los dientes faríngeos molariformes están acomodados en tres filas. La aleta dorsal es larga y cóncava, como la anal, con espina aserrada. La aleta caudal tiene lóbulos redondeados. Las escamas son grandes y su coloración es pardo verdoso con reflejos dorados y azulados con un vientre blancuzco (Stansby, 1945). Es una especie que por su rusticidad y hábitos alimentarios proporciona buenos resultados en la acuicultura. Sin embargo, la especie proviene de China y es una especie exótica e introducida en México. Por ser muy prolífica requiere para su cultivo ambientes cerrados sin conexión con cuerpos de agua naturales a fin que no se disperse en el medio natural (Stansby, 1945).

3. JUSTIFICACIÓN

Los metales pesados constituyen un grupo de elementos traza de alto interés. A pesar que algunos resultan esenciales, determinados niveles en agua y suelo pueden resultar tóxicos para los seres vivos (organismos del suelo, plantas, animales acuáticos y sin excepción el humano). Desde el punto de vista ambiental, los metales pesados más interesantes por su toxicidad tanto para el medio ambiente como para los seres vivos, son el cadmio, cobre, níquel, plomo, cromo, zinc y mercurio (Kabata y Pendias, 2001).

Algunos procesos naturales como la pedogénesis y erupciones volcánicas, entre otros, constituyen una fuente relevante de metales existentes en el suelo, pero las aportaciones más importantes tienen lugar a través de la acción humana. La contaminación antropogénica de las masas de agua y de los suelos se hace a través del vaciamiento en ellos de las aguas domésticas, de los residuos industriales líquidos y sólidos, de los productos químicos aplicados a los suelos en la actividad agrícola y de los contaminantes atmosféricos arrastrados por las lluvias. Los metales afectan así la cadena alimenticia por su bioacumulación debido a su alta persistencia en el entorno ya que la mayoría de ellos no tienen una función biológica definida. (Tiller, 1989).

Dentro de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, estudios realizados por Monks *et al*, (2003) mencionan que los resultados con el uso de parásitos en la evaluación de la calidad del agua, se presentan como un método económico que indica el tipo de evaluación química necesaria en la detección de contaminantes acuáticos. Con base en la ecología de comunidades y a que son helmintos que explotan a los peces como hospederos definitivos, dicha relación indicó que los niveles de contaminación acuática son elevados.

Estudios sobre la evaluación de la calidad ambiental dentro de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, muestran que el agua está contaminada por metales que

sobrepasan lo permitido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-001.ECOL-1996), como son, por mencionar algunos, el aluminio, cadmio, calcio, cromo, plomo, magnesio, potasio, sodio y zinc (Pulido *et al*, 2005), dichos elementos se consideraron como objetivo de este estudio, para saber si son biodisponibles y por tanto si son bioacumulados por los peces, en particular por la carpa común.

En Metztlán, Hidalgo, la pesquería local es un recurso esencial para las comunidades que encuentran sustento económico y alimenticio. Además de la pesquería, la agricultura es la fuente económica más importante para los habitantes de la región, pero teniendo presente la contaminación por dichos metales en el agua, se crea un riesgo para el hombre ya que estos contaminantes se incorporan en los alimentos (entre ellos los peces) de allí a las cadenas alimenticias que culminan en el consumo humano, pudiendo traer como consecuencia la bioacumulación y por ende problemas de salud.

Considerando lo anterior, en términos generales los metales y sus compuestos derivados pueden considerarse de importancia ambiental prioritaria, el carecer de estudios detallados de contaminación en los organismos acuáticos, en particular con los peces de la especie *Cyprinus carpio* (carpa común) que se cultiva en la Laguna de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán para su venta y consumo local, fue el motivo del presente trabajo.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Determinar la presencia y concentración de metales bioacumulados en los tejidos de *Cyprinus carpio* que habita en la Laguna de Metztitlán, Hidalgo, México.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar si existe bioacumulación de Aluminio (Al), Cadmio (Cd), Calcio (Ca), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Magnesio (Mg), Potasio (K), Sodio (Na) y Zinc (Zn) en músculo, piel, hueso, branquias y vísceras de *Cyprinus carpio* (peces cultivados en la zona de estudio).
- Determinar si hay afinidad por los tejidos analizados del pez a acumular alguno de los elementos estudiados.
- Mencionar el posible potencial de riesgo asociado al consumo de los ejemplares estudiados.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 Zona de estudio (área de colecta)

La Laguna de Metztlán (**Fig. 2**), localizada en el estado de Hidalgo, México, a aproximadamente 15 Km. al noroeste de la cabecera municipal de Metztlán, está ubicada entre los paralelos 98°23'00' y 98°57'08'' longitud Oeste, y 20°14'15'' y 20°45'26'' latitud Norte, a una altitud de 1,300 msnm. Este cuerpo de agua es un almacenamiento natural que ocupa una superficie plana de 581 ha. Su volumen, estimado de 52 millones de metros cúbicos es aprovechado para la pesca, beneficiándose la venta y el consumo local (Cruz, 2000).



Fig. 2. Zona de estudio (Laguna de Metztlán).

5.2 Trabajo de campo

Para el presente trabajo se consideraron dos épocas del año; i) época de estiaje y ii) época de lluvias; la primera se extiende del mes de diciembre a junio y la segunda de julio a noviembre, donde se realizaron dos colectas, una en la primera época, el 27 de febrero del 2006 y otra en la segunda época, el 7 de septiembre del 2006 en la Laguna de Metztlán, Hidalgo, utilizando como muestra de estudio, un total de seis ejemplares de peces de la

especie introducida, *Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758 (carpa común) (tres por época, en las fechas antes ya mencionadas) y dos muestras de agua (una por época).

Los ejemplares utilizados se obtuvieron a través de la captura por los pescadores en la zona de cultivo de peces que se efectúa en la laguna, de una talla comercial de aproximadamente 25 a 30 cm de longitud y de 500 a 600 gr de peso (**Fig. 3**), durante el día. Se depositaron en bolsas de plástico, adecuadamente rotuladas para su identificación y se conservaron en hielo para su transporte hasta ser analizados.

Las muestras de agua se tomaron en el mismo lugar donde se obtuvieron los peces (la zona de cultivo), realizándolo con vasos de polietileno libres de contaminación, para su transporte hasta ser analizadas. En el momento de la toma de muestras, la botella se enjuagó dos veces con el agua de la laguna antes de tomar la muestra definitiva a unos 30 cm de profundidad.



Fig. 3. *Cyprinus carpio* (carpa común) que se utilizó en el presente estudio.

5.3 Trabajo de laboratorio

En el laboratorio de Morfología Animal del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, a cada pez se le realizó una incisión ventral en plano sagital para obtener las vísceras. Las branquias, piel, músculo y hueso (todo realizado

en una charola de plástico) fueron separados y colocados en refractarios de cristal (**Fig. 4**). Cada tejido se procesó por separado y fue secado en una estufa a 40 C hasta masa seca (constante). Se evaluó la cinética de secado para calcular la pérdida de humedad cada 24 horas, por un lapso de seis días. Los ejemplares por época se tomaron como una muestra, obteniendo así una muestra de agua y una muestra de pescado por época para el análisis.

Las muestras de agua (un litro por época) se filtraron y se nitrificaron con ácido nítrico concentrado, bajando así el PH a 2 (esto realizado con material de vidrio previamente lavado con ácido nítrico al diez por ciento y agua destilada), para su posterior análisis en el equipo ICP.

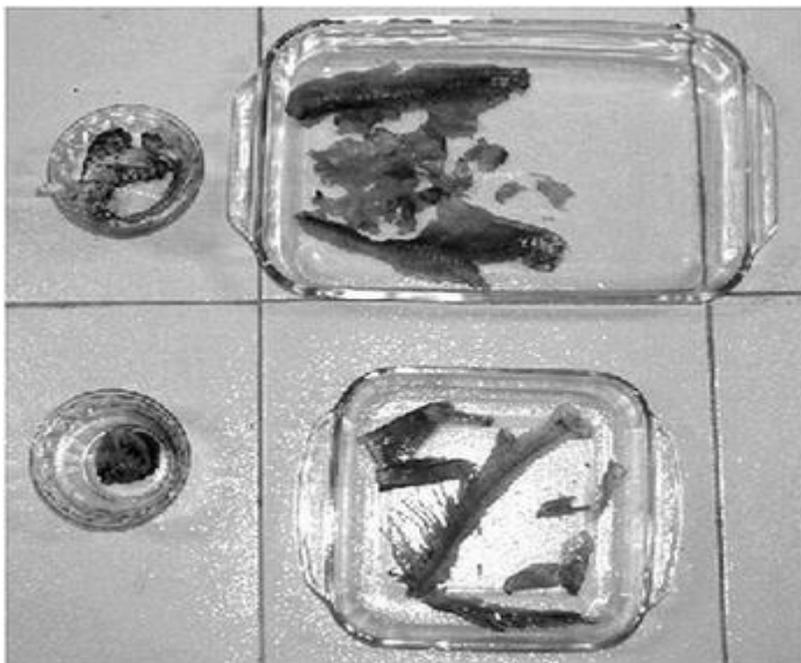


Fig. 4. Separación del pescado en sus partes: branquias, piel, músculo, tracto digestivo con órganos asociados y esqueleto.

5.4 Análisis

El análisis de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio de Pruebas del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, y la lectura de los metales por ICP se realizó en el laboratorio de Absorción Atómica, del laboratorio Central de la misma Universidad.

5.4.1 Digestión de la muestra por microondas

La digestión de los tejidos se llevó a cabo en un equipo de microondas (MAR-X5), con 1200 W de potencia y con carrusel para 14 vasos de teflón (**Fig. 5**). La muestra de cada una de las partes u órganos del pescado se digirió en ácido nítrico (0.5 gr de muestra + 5.0 ml de ácido nítrico [HNO₃] concentrado) en los vasos de teflón. Cada vaso se tapó y se mantuvo dentro del equipo por 20 minutos para la digestión, 10 minutos para mantener constante presión y temperatura, y 5 minutos de enfriamiento, tiempos señalados en el equipo para la técnica (EPA, 1995). Posteriormente, cada muestra digerida se filtró y se aforó a 50 ml con agua destilada.

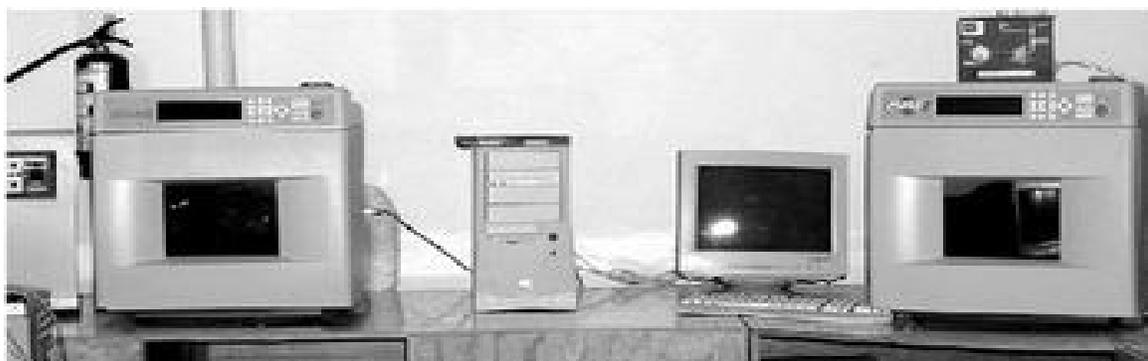


Fig. 5. Equipo de microondas que se utilizó para digerir los tejidos de la carpa.

5.4.2. Preparación de estándares para la lectura de los elementos en estudio

En la preparación de estándares se adicionó 0.1, 0.25, 0.4, 0.6, 0.7 y 1.0 ml de cada estándar original (Cd, Ca, Cr, Pb, Mg, K, Na y Zn) que contiene 1000 ppm del elemento puro,

y 2.0 ml de HNO_3 , en un matraz aforado de 50 ml. Estas cantidades se mezclaron y se aforaron a los 50 ml con agua destilada. Posteriormente, cada estándar se transfirió a un vaso de plástico previamente lavado y etiquetado para su análisis. Los estándares, son requeridos por el equipo para emitir las curvas de calibración (concentración de los patrones estándares) útiles para cada elemento que se analizó. Todos los estándares se prepararon en matriz nítrica al 5%.

5.4.3 Preparación de muestras para la determinación de los elementos en emisión atómica
Las muestras de agua y tejidos que se digitaron, filtraron y aforaron (a 50 ml con agua destilada) se pasaron a vasos de plástico previamente lavados con agua destilada y etiquetados (**Fig.6**). Se almacenaron en un refrigerador a una temperatura de 15 C para el análisis en ICP.



Fig. 6. Muestras que se digirieron, filtraron y aforaron para su análisis en el equipo.

5.4.4 Lectura de los metales de estudio por medio del equipo de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP)

Se utilizó el equipo de emisión atómica con plasma (Perkin Hellmer, mod. Optimus 3000, **Fig. 7**). Para determinar la concentración de metales presentes en la carpa y el agua, se

determinó la concentración de los patrones estándares antes ya mencionados, donde la muestra se atomizó en la llama de plasma del equipo registrándose la emisión del metal (curva de calibración) objeto de análisis a la longitud de onda del elemento en cuestión (EPA, 1996).



Fig. 7. Equipo de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente que se utilizó para la lectura de metales.

6. RESULTADOS

Para las concentraciones de los metales en estudio en el agua de la laguna (en época de estiaje y época de lluvia), se les determinó el Logaritmo natural (Log_n) de cada concentración mas uno, para así de manera gráfica, tener una mayor visualización sobre la concentración presente de cada metal.

6.1 Época de estiaje

Para la humedad perdida de cada tejido, se obtuvieron los porcentajes de humedades durante seis días a una temperatura de 40°C (**Tabla XI**), obteniéndose a partir de ellas la humedad final en cada tejido del pescado. Este proceso se requiere para la determinación de los elementos en estudio, en base seca.

Tabla XI. Determinaciones de las humedades en el tiempo.

Tejidos	% HUMEDAD PERDIDA (m/m)						% Humedad final
	1	2	3	4	5	6	
MÚSCULO	36.54	60.69	80.30	80.42	80.42	80.42	80.42
PIEL	29.98	45.66	54.97	54.97	54.97	54.97	54.97
HUESO	6.41	11.84	19.83	23.11	23.11	23.11	23.11
BRANQUIAS	44.31	60.86	70.40	70.40	70.40	70.40	70.40
VÍSCERAS	41.05	52.14	58.03	58.44	58.44	58.44	58.44

A partir del día 4 las pesadas permanecieron invariables prácticamente, por lo que se consideró que seis días eran suficientes para evaluar resultados en base seca. Con los datos de la tabla I se evaluó la cinética de secado de las muestras y los resultados se aprecian en la **Fig. 8.**

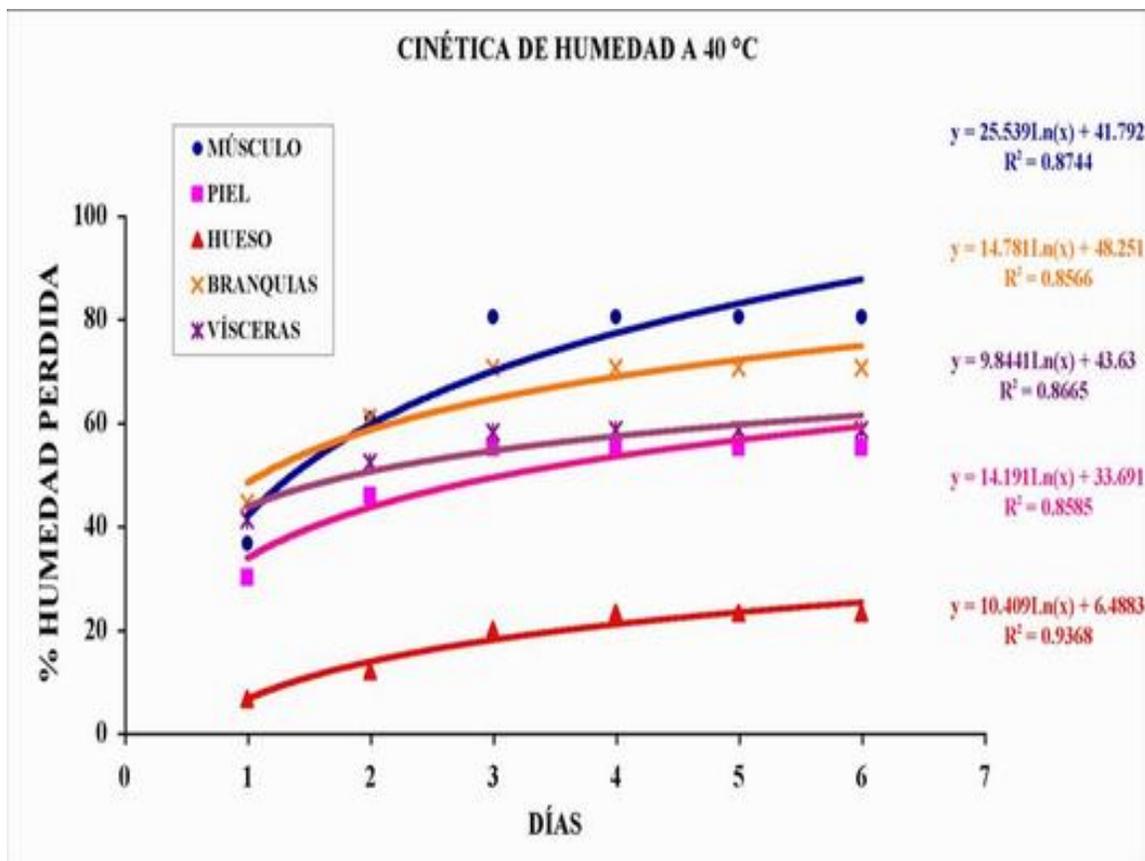


Fig. 8. Cinética de pérdida de humedad de cada tejido del pescado durante seis días.

Presentó una función logarítmica con regresiones (r^2) mayores de 0.85, en orden, los mayores valores de humedades corresponden para el músculo, seguido de las branquias, vísceras, piel y hueso.

En la **Tabla XII** se presentan las concentraciones de los metales evaluados en los tejidos del pescado, calculados en base seca. De forma gráfica, en la **Fig. 9a** se presentan los niveles de bioacumulación de los metales tóxicos (Cd, Cr y Pb), en valores menores de 10 mg/100g en los tejidos del pescado, donde la concentración para cadmio y cromo no se detectaron ya que están por debajo del límite de detección del equipo. Esto sugiere que para estos metales, en época de estiaje, no están presentes en concentraciones altas para que el metabolismo de la carpa los bioacumule.

Tabla XII. Concentraciones de metales bioacumulados en cada tejido, evaluados en base seca.

	mg/100g base seca								
	Al	Cd	Ca	Cr	Pb	Mg	K	Na	Zn
Piel	9.9	< 0.0026	247	<0.005	0.9	78.1	47	386.3	28.1
Músculo	8.3	<0.0026	42.6	<0.005	<0.006	301.5	161.1	336.6	2.6
Branquias	10.4	<0.0026	740.7	<0.005	<0.006	396.5	71.2	780.7	138.4
Vísceras	9.6	<0.0026	23.9	<0.005	<0.006	153.7	80.4	595.9	159.8
Hueso	8.2	<0.0026	2395.6	<0.005	1.4	609.5	56.4	692.3	35.3

El plomo, no se detectó en músculo, branquias y vísceras, únicamente se registró en piel y en huesos, siendo en este tejido el que presenta mayor concentración. Por ello, surge la hipótesis de que el plomo presente en el agua de la laguna puede penetrar a través de piel (donde es bioacumulable), y a través de las branquias (ambos tejidos en contacto directo con el agua). Sin embargo, esta posible ruta de incorporación del elemento debe ser evaluada ya que no se registró plomo en branquias, posiblemente porque el metal puede estar pasando directamente a la sangre con rapidez, de donde es transportado a los huesos.

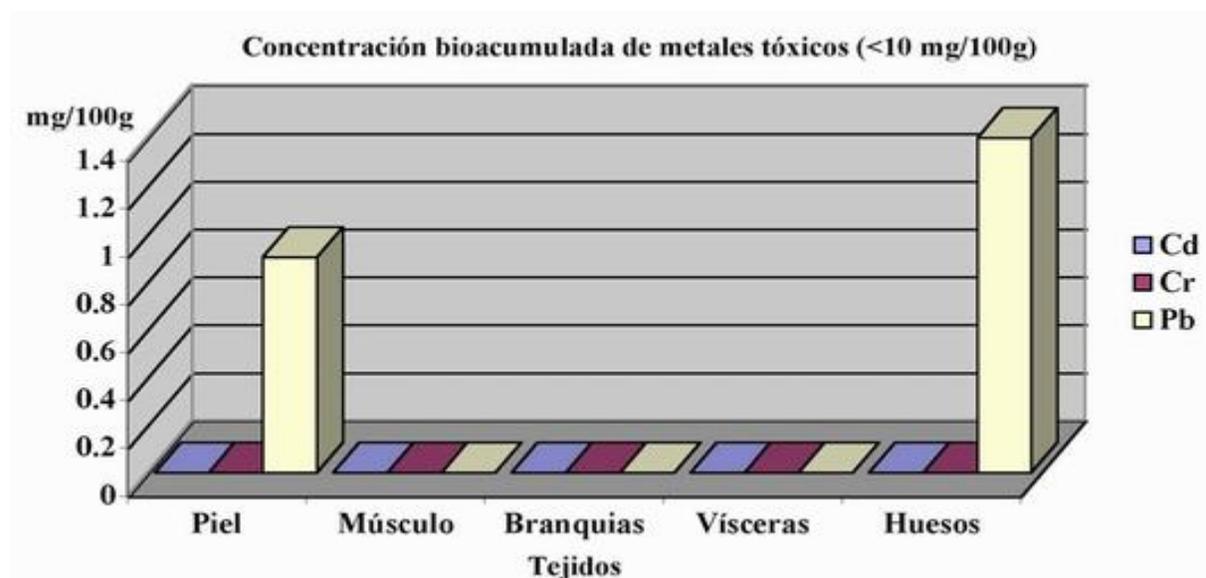


Fig. 9a. Concentración bioacumulada en mg/100g de Cd, Cr y Pb por cada tejido del pescado.

En la **Fig. 9b** se presentan los niveles de bioacumulación de metales oligoelementos (Al, K y Zn), en valores de entre 10 y 200 mg/100g en los tejidos del pescado, donde la concentración del aluminio, es entre 8 y 10 mg/ 100 g, correspondiendo a las branquias y a la piel los más altos valores. Esto sugiere que el aluminio en época de estiaje se encuentra concentrado en el agua de la laguna donde al parecer es biodisponible para la bioacumulación de la carpa.

Los niveles de potasio y zinc, se presentan en concentraciones de entre 2 y 160 mg/ 100 g, en el músculo, se bioacumulan los máximos de potasio y los mínimos de zinc en branquias y vísceras. De manera inversa se dan mayores niveles de zinc que de potasio. En piel y huesos, cantidades relativamente más bajas.

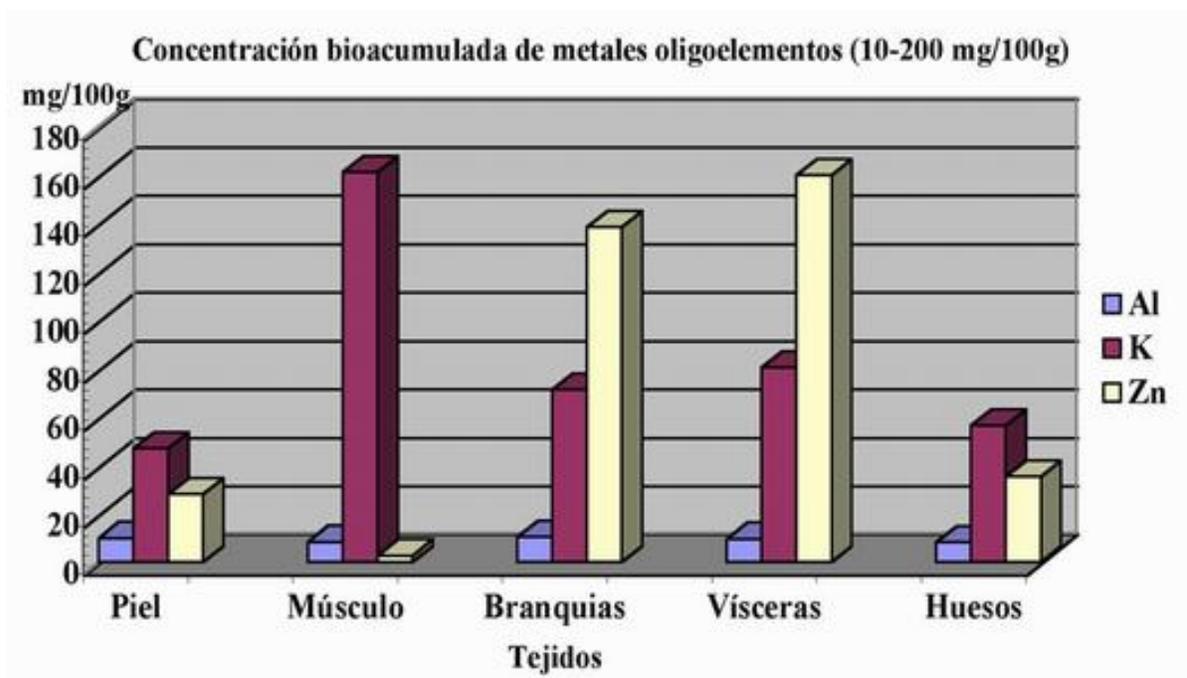


Fig. 9b. Concentración bioacumulada en mg/100g de Al, K y Zn por cada tejido del pescado.

En la **Fig. 9c** se presentan los niveles de bioacumulación de metales esenciales (Ca, Mg y Na), en valores superiores a 200 mg/100g en los tejidos del pescado, donde las concentraciones del calcio, el magnesio y el sodio se dan entre 23 y 2300 mg/ 100 g. El

magnesio y sodio se bioacumulan prácticamente en iguales proporciones, en tanto la diferencia la hace el calcio, con los niveles más altos en huesos y branquias.

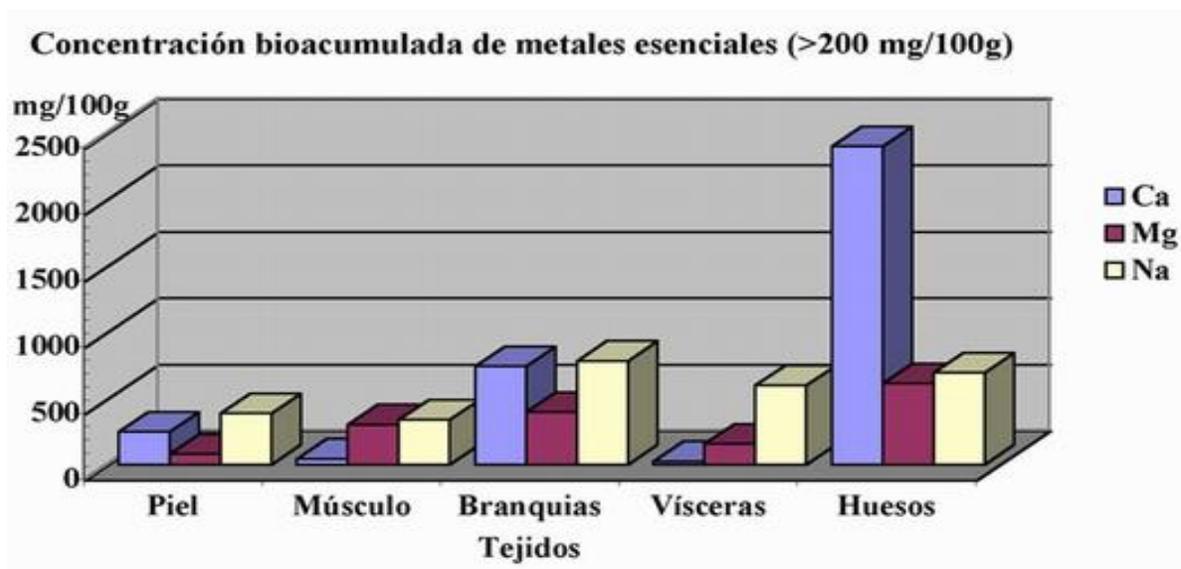


Fig. 9c. Concentración bioacumulada en mg/100g de Ca, Mg y Na por cada tejido del pescado.

En la **Tabla XIII** y **Fig. 10**, se pueden observar los niveles de concentración de metales pesados presentes en el agua de la laguna, indicando la clara relación sobre la concentración bioacumulada de cada metal en los tejidos del pescado.

Tabla XIII. Concentración de metales pesados presentes en el agua de la Laguna de Metztlán.

Metales	mg/l	Log _n (conc + 1)
Al	21.03	3.09
Cd	0.11	0.1
Ca	5560	8.62
Cr	1.21	0.79
Pb	11.34	2.51
Mg	2600	7.86
K	1440	7.27
Na	2640	7.88
Zn	8.97	2.3

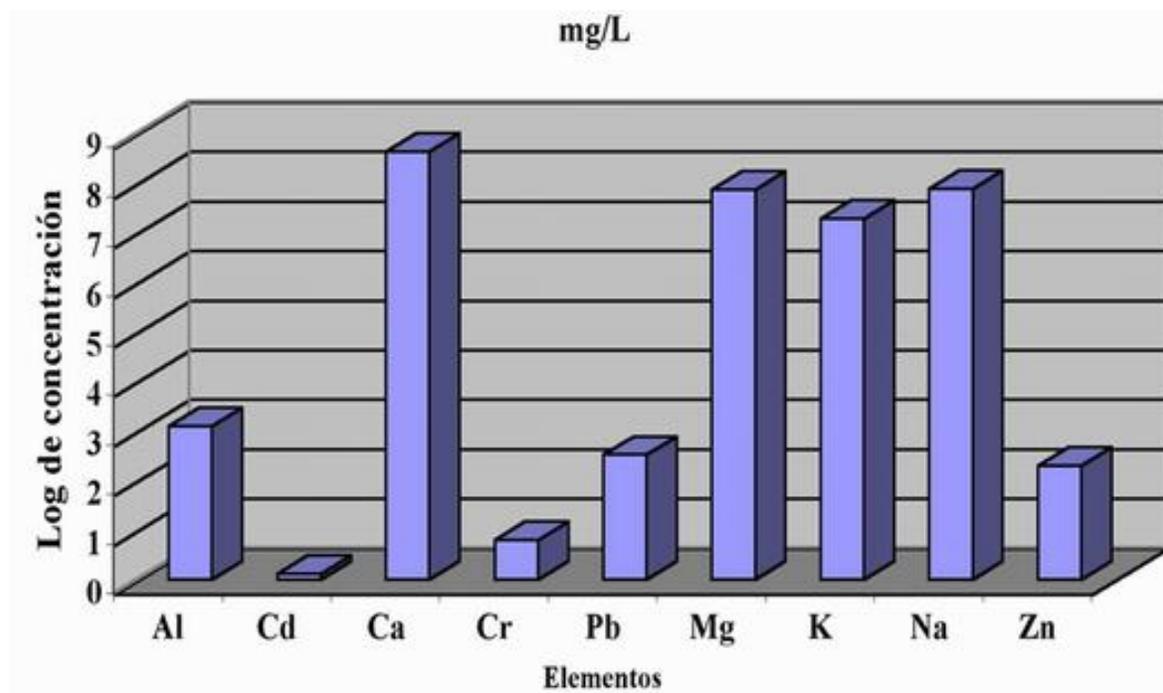


Fig. 10. Niveles de concentración de metales presentes en el agua de la Laguna de Metztlán.

6.2 Época de lluvia

Para la humedad perdida de cada tejido, se obtuvieron los porcentajes de humedades durante seis días a una temperatura de 40°C (**Tabla XIV**), obteniéndose a partir de ellas la humedad final en cada tejido del pescado. Este proceso se requiere para la determinación de los elementos en estudio, en base seca.

Tabla XIV. Concentraciones de metales bioacumulados en cada tejido, evaluados en base seca.

TEJIDOS	% HUMEDAD PERDIDA (m/m)						DÍAS	% humedad final
	1	2	3	4	5	6		
MÚSCULO	31,43	57,45	67,62	80,27	80,27	80,27	80,27	80,27
PIEL	30,38	40,23	53,22	53,64	53,71	53,71	53,71	53,71
HUESO	7,48	17,09	25,18	25,36	25,37	25,37	25,37	25,37
BRANQUIAS	39,46	54,12	71,51	71,61	71,67	71,67	71,67	71,67
VÍSCERAS	38,52	55,73	68,41	68,46	68,50	68,50	68,50	68,50

A partir del día 4 las pesadas permanecen invariables prácticamente por lo que se consideró que seis días eran suficientes para evaluar resultados en base seca. Con los datos de la tabla IV se evaluó la cinética de secado de las muestras y los resultados se aprecian en la

Fig. 11.

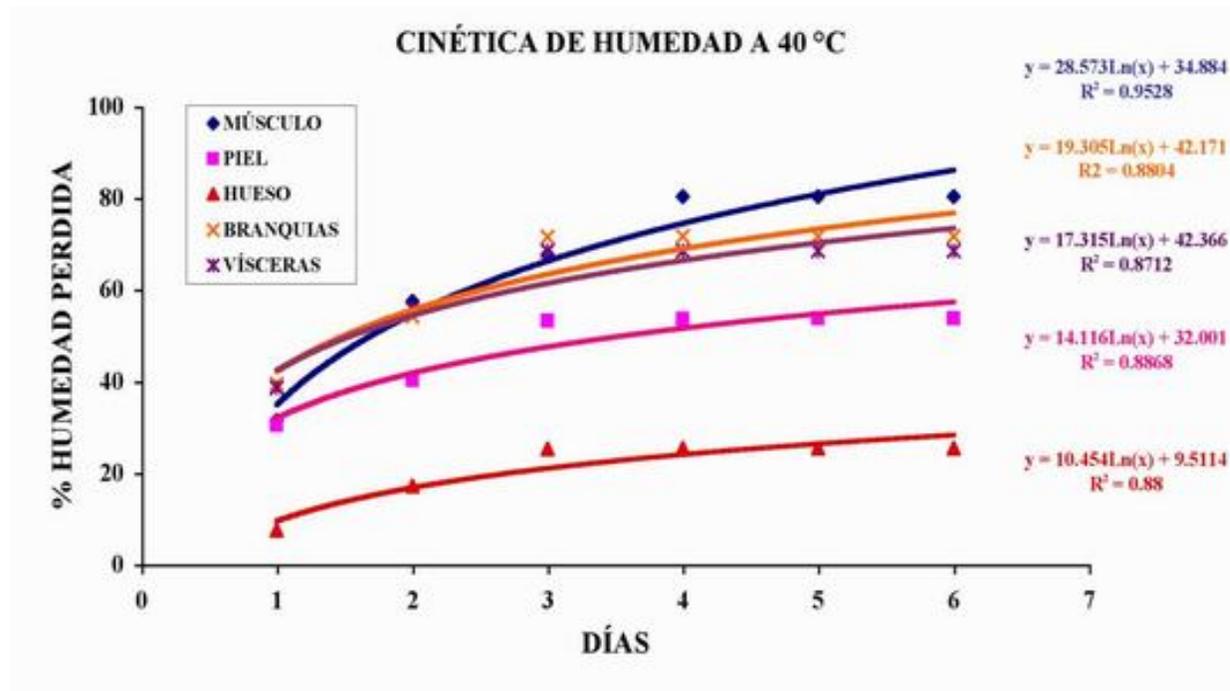


Fig. 11. Cinética de pérdida de humedad de cada tejido del pescado durante seis días.

Presentó una función logarítmica con regresiones (r^2) mayores de 0.85, en orden, los mayores valores de humedades corresponden para el músculo, seguido de las branquias, vísceras, piel y hueso.

En la **Tabla XV** se presentan las concentraciones de los metales evaluados en los tejidos del pez, calculados en base seca. Los niveles de bioacumulación de los metales tóxicos (Cd, Cr y Pb) en los tejidos del pescado, se observó que para cadmio y cromo tampoco se detectaron en los tejidos ya que están por debajo del límite de detección del equipo. Esto sugiere que el cadmio y cromo, en época de lluvia, tampoco están presentes en concentraciones altas para que el metabolismo de la carpa los bioacumule, o bien, ya sea que

el PH y temperatura (factores que no se midieron), influyan en bajar o cambiar la concentración de estos metales, haciéndolos no biodisponibles para la carpa

Tabla XV. Concentraciones de metales bioacumulados en cada tejido, evaluados en base seca.

	mg/100g base seca								
	Al	Cd	Ca	Cr	Pb	Mg	K	Na	Zn
Piel	11.2	<0.0026	270.2	<0.005	<0.006	123.2	725.0	729.3	102.1
Músculo	11.2	<0.0026	58.0	<0.005	<0.006	351.4	1845.4	366.3	16.8
Branquias	9.4	<0.0026	2253.9	<0.005	<0.006	620.1	943.3	1609.1	111.3
Vísceras	1.4	<0.0026	89.3	<0.005	<0.006	208.8	1332.0	985.5	432.8
Hueso	11.2	<0.0026	3481.6	<0.005	<0.006	617.8	622.4	861.7	55.0

El plomo, para época de lluvia, no se detectó en ninguno de los tejidos. Esto sugiere que este metal se encuentra disuelto en el agua, lo que hace que la biodisponibilidad para la carpa sea menor y la bioacumulación en cualquier tejido esté presente en concentraciones por debajo del límite de detección del equipo. Sin embargo, la bioacumulación es un proceso de largo plazo (Stalling, 1986), Por lo que, no es posible interpretar ésta diferencia con exactitud, sin la toma de muestras por un periodo de varios años y posiblemente realizándolas por cada mes en lugar de ser por cada época, estableciendo así con modelos matemáticos los niveles de movilidad ambiente de los metales en general.

De forma gráfica, en la **Fig. 12b** se presentan los niveles de bioacumulación de metales oligoelementos (Al, K y Zn), en valores de entre 1 y 1900 mg/100g en los tejidos del pescado, donde la concentración del aluminio, se presenta de igual manera en todos los tejidos (excluyendo vísceras por presentar una menor concentración), con un aumento de concentración de 9 a 11 mg/ 100 g de tejido. Esto sugiere que en época de lluvias incrementa la concentración de este metal en el agua de la Laguna, que puede ser debido al arrastre de pesticidas y plaguicidas que contienen este elemento, ya que son utilizados para la agricultura

que se emplea alrededor de la laguna. Otra posibilidad es el arrastre de agentes químicos desechados por industrias a lo largo del Río Grande de Tulancingo y el Río de Metztlán, posiblemente desechados en el suelo y arrastrados al río por la lluvia. La concentración menor en vísceras podría indicar que el aluminio en época de lluvias no es tan disponible por la presencia de otros compuestos debido al arrastre, ya que podría interactuar bloqueando la entrada al tejido de las vísceras. Finalmente, diferencias en el estado del aluminio podría ser responsable de la absorción y/o bioacumulación diferencial del metal en cada época, lo cual es necesaria la realización de más estudios a futuro.

Los niveles de potasio y zinc se presentan en concentraciones de entre 16 y 1800 mg/ 100 g en los tejidos, bioacumulando en músculo y vísceras los máximos de potasio, en tanto que los mínimos de zinc en músculo y hueso. De manera inversa se dan mayores niveles de zinc en piel y branquias que de potasio. Esto sugiere que en época de lluvia, los niveles de zinc y potasio presentes en el agua de la laguna aumentan su concentración debido al arrastre de pesticidas y otros compuestos químicos, ya que estos elementos se emplean y desechan por industrias, así mismo por la población, sin mencionar la presencia de estos metales de manera natural.

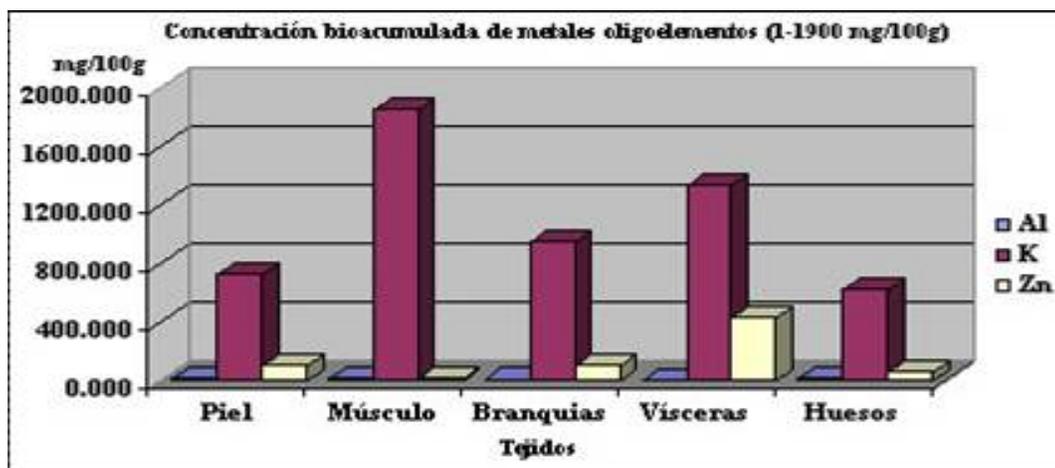


Fig. 12b. Concentración bioacumulada en mg/100g de Al, K y Zn por cada tejido del pescado.

En la **Fig. 12c** se presentan los niveles de bioacumulación de metales esenciales (Ca, Mg y Na), en valores de entre 50 y 3500 mg/100g en los tejidos del pescado, donde el calcio, el magnesio y el sodio, se bioacumulan de manera similar al primer muestreo, pero las concentraciones de estos metales son más altas. Esto puede ser originado por las altas concentraciones arrastradas por las lluvias, también de manera natural, por su composición geoquímica del suelo, el cual está constituido principalmente por rocas formadas en el Mesozoico Cretácico (rocas sedimentarias marinas, calizas con pedernal, dolomitas, lutitas, margas, arcillas, areniscas y evaporitas). Debido a la lluvia la gran parte de estos metales son concentrados en la laguna.

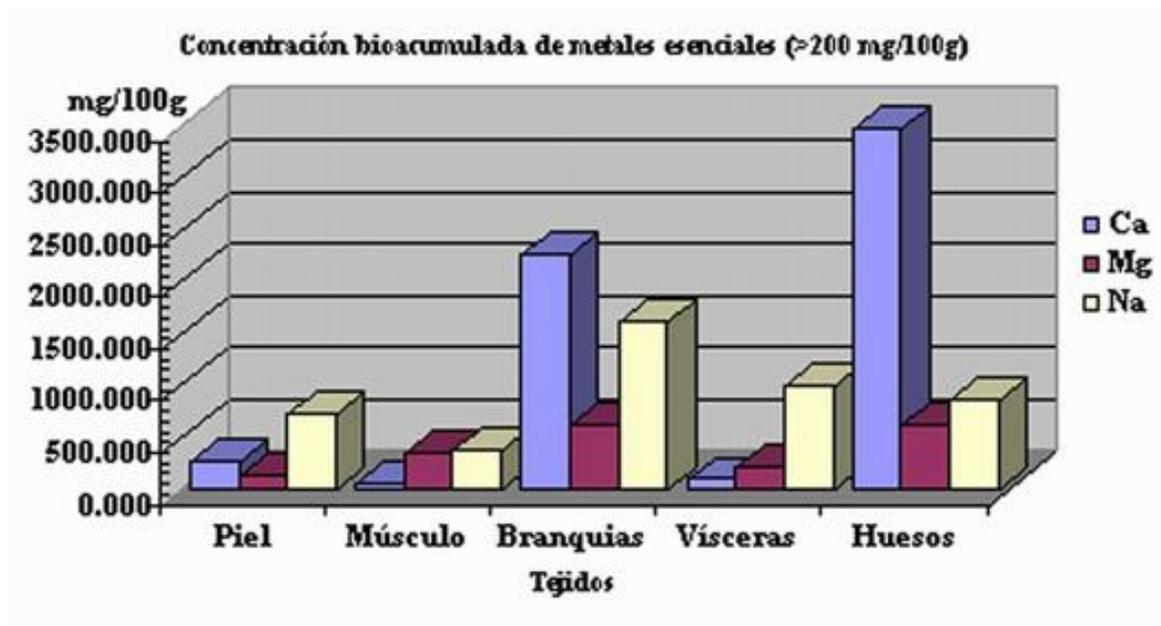


Fig.12c. Concentración bioacumulada en mg/100g de Ca, Mg y Na por cada tejido del pescado.

En la **Tabla XVI** y **Fig. 13**, se pueden observar los niveles de concentración de metales pesados presentes en el agua de la laguna, indicando la clara relación sobre la concentración bioacumulada de cada metal en los tejidos del pescado. Esto sugiere que al estar presentes estos metales en el agua de la Laguna de Metztitlán en ambas épocas, .son

biodisponibles por las carpas que habitan en ella, bioacumulando estos metales a lo largo del año.

Tabla XVI. Concentración de metales pesados presentes en el agua de la Laguna de Metztitlán.

Metales	mg/L	$\log_n(\text{conc}+1)$
Al	72,42	4,30
Cd	0,15	0,14
Ca	5621,5	8,63
Cr	2,46	1,24
Pb	3,45	1,49
Mg	3276,6	8,09
K	1362,3	7,22
Na	2708	7,90
Zn	4,87	1,77

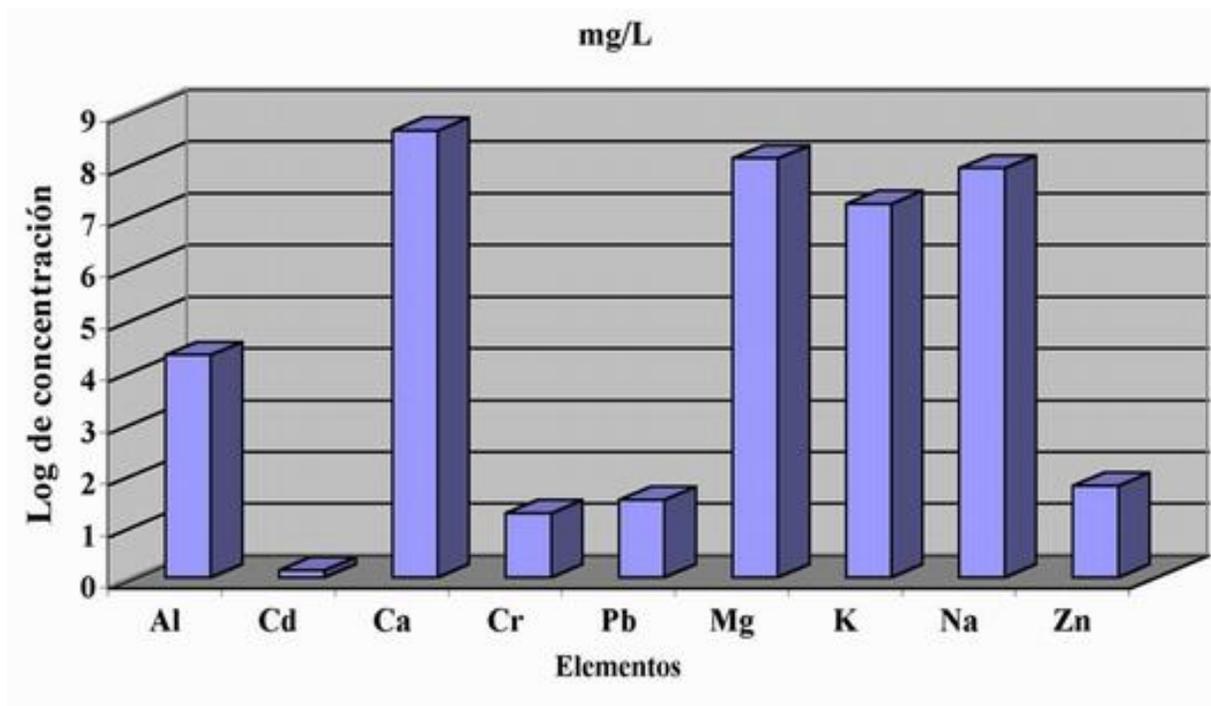


Fig. 13. Niveles de concentración de metales presentes en el agua de la Laguna de Metztitlán.

7. DISCUSION

7.1. Concentración bioacumulada de metales en *Cyprinus carpio* (en época de estiaje y de lluvia)

La concentración que se encontró de los elementos tóxicos (Pb, Cd y Cr) en los tejidos de la carpa en ambas épocas, siguieron un igual orden de concentración en los tejidos: Pb>Cr>Cd, donde en época de estiaje la mayor afinidad a bioacumular este metal fue en hueso y como segundo lugar la piel, mientras que en época de lluvia no se presentó en ninguno de los tejidos, esto sugiere que este metal es menos biodisponible debido al constante movimiento y a la alta dilución por el efecto de las lluvias, ya que el Pb es un metal pesado que muestra gran absorción a través de las branquias y la piel.

Este metal se encontró bioacumulado en la piel en una concentración de 0.9 mg/100, posiblemente por ser un tejido que en toda la vida de la carpa, está en contacto directo con el agua. Tao *et al*, (1999) realizaron un estudio profundo en época de sequía sobre la ingestión de Pb a través de branquias y piel en el pez *Carassius auratus*, llegando a la conclusión de que el Pb es disponible en forma de ión libre cuando no hay movimiento por corrientes y cuando está adherido a pequeñas partículas, siendo más biodisponible que otros metales. Estos autores encontraron en las branquias del pez niveles de entre 4.07-56.5 ppm. En el caso de las carpas del presente estudio, los niveles en branquias se mostraron relativamente bajos (< 0.006 mg/100g), quizás se deba a que este metal pase directamente a la sangre, donde es transportado a los huesos con rapidez. En músculo y vísceras no se concentró plomo de manera significativa en ambas épocas, ya que hay menos afinidad de acumulación por estos tejidos, esto no significa que el plomo está ausente, si no que las concentraciones están por debajo del límite de detección del equipo. De acuerdo a la literatura, el Pb se acumula más en hígado, branquias, hueso, poco en riñón y en músculo.

Hodson *et al*, (1978) mencionan que en la época donde se escasea la lluvia, el Pb se acumula mayormente en piel, branquias, hígado, riñón y huesos. Lo que corrobora en el presente trabajo, con la afinidad de bioacumular plomo en piel y en hueso (en época de estiaje).

Para cadmio y cromo, las concentraciones bioacumuladas están por debajo del límite de detección del equipo en ambas épocas, donde la concentración del Cd se presentó en <0.0026 mg/100g y del Cr en <0.005 mg/100g, de acuerdo a la literatura, tanto el Cd como el Cr eligen como órgano de concentración mayor al riñón, pero también en menor cantidad al hígado, piel, branquia y como último el músculo, cuestión que se observó en el presente trabajo. Esto sugiere que la concentración del Cd y Cr presente en agua dulce sea de menor biodisponibilidad para la acumulación de los tejidos estudiados, ya que de acuerdo a la World Health Organization (1992), menciona que los organismos marinos tienden a bioacumular concentraciones más elevadas de Cd y Cr que sus congéneres de agua dulce u organismos terrestres.

McCracken, (1987) menciona que los niveles relativos de Cd son mucho mayores en hígado que en todo el pez o músculo, pero el riñón tiende a acumular más Cd que el hígado.

Para los oligoelementos (Al, K y Zn) en época de estiaje, el patrón de bioacumulación del aluminio fue: branquias>vísceras>músculo>hueso>piel. En época de lluvia el patrón fue: hueso>piel>músculo>branquias>vísceras. Un estudio realizado por Heinen, (1995) en Virginia, menciona que en temporada de sequía, la concentración de aluminio en agua de lago, se presenta en niveles altos, teniendo por ello una alta biodisponibilidad para la acumulación en organismos acuáticos. Ésta autoridad realizó pruebas sobre la acumulación de aluminio en peces, teniendo como resultado que la mayor acumulación se presentó en branquias, seguido del riñón, hígado, piel, músculo y hueso. Éste estudio comparado con el

presente, en época de estiaje, muestra una clara similitud sobre el patrón de bioacumulación en los tejidos, en época de lluvia, el patrón de bioacumulación se presentó de manera inversa, esto puede deberse al movimiento producido por la lluvia, aire y por las fuertes corrientes que lleva el río que alimenta a la laguna, dicho proceso tiende a producir una alta dilución de éste y varios metales, cambiando el pH, temperatura y el estado químico del aluminio, haciéndolo más afín a acumularse en hueso, piel y músculo, y menos afín para branquias y vísceras.

Para potasio en época de estiaje el patrón de bioacumulación fue: músculo>vísceras>branquias>hueso>piel. En época de lluvia, se comporto prácticamente de igual manera, haciendo la diferencia el hueso, el cual la concentración presente fue menos que en piel. El patrón de bioacumulación fue el siguiente: músculo >vísceras >branquias >piel >hueso. Esto sugiere, que este metal en ambas épocas es muy persistente, incrementando su concentración en época de lluvia y bioacumulando de una manera muy significativa, ya que alcanzó una concentración de 1845.39 mg/100g en músculo. Para zinc en época de estiaje, el patrón de bioacumulación fue: vísceras>branquias>hueso>piel >músculo. En época de lluvia, se comporto de igual manera, haciendo la diferencia el hueso, el cual la concentración presente fue menos que en piel. El patrón de bioacumulación fue el siguiente: vísceras>branquias>piel>hueso>músculo. De igual manera que el potasio, es un metal muy persistente que incrementa su concentración debido al arrastre por la lluvia, por la gran cantidad que se acarrea por los ríos desde la fuente de emisión, por la presencia de manera natural, etc. Camusso *et al*, (1995) menciona que el Zn se acumula principalmente en branquias si la vía de absorción es acuática, también se acumula en hígado, riñón y poco en músculo.

En España, algunos autores como Anadon *et al*, (1984) observaron también que la distribución de Zn alcanzaba los mayores niveles en branquias, seguido de hígado, gónadas y

músculo. En el presente estudio, la afinidad de acumulación de este metal en los tejidos estudiados, siguió el mismo patrón que el de los anteriores autores.

En el caso de las vísceras y branquias por presentarse mayor concentración, puede estar relacionado con el hecho de que las branquias son la vía principal de entrada de contaminantes, ya que son la primera barrera a penetrar por los metales, y en el momento que cesa la exposición, el metal se pasa a las vísceras redistribuyéndose por los diferentes tejidos.

También se han visto elevadas concentraciones de Zn en huesos, ya que este metal está involucrado en su formación. En el tejido esquelético, la deposición de Zn se hace en la matriz de fosfato cálcico insoluble por lo que no es fácilmente movilizado, lo que contribuye al reforzamiento de la utilidad de medir Zn en huesos como indicador de contaminación a largo plazo (Camusso *et al*, 1995), en el presente estudio se encontró una concentración de 55.041mg/100g en época de lluvia.

Para los elementos esenciales (calcio, magnesio y sodio), el patrón de bioacumulación en ambas épocas se presentó de manera similar, existiendo ligeras variaciones sobre las concentraciones presentes de un tejido a otro, dichas variaciones y patrones de bioacumulación en época de estiaje son: para calcio; hueso >branquias >piel >músculo >vísceras, para magnesio; hueso >branquias >músculo >vísceras >piel y para sodio; branquias >hueso >vísceras >piel >músculo. En época de lluvia: para calcio; hueso >branquias >piel >vísceras >músculo, para magnesio; branquias>hueso>músculo>vísceras>piel y para sodio; branquias >vísceras >hueso >piel > músculo, esto nos indica la afinidad que tienen estos metales a acumularse en cierto tejido dependiendo de la época en que se presente, teniendo con esto una idea sobre el grado de contaminación presente en dicha área. Son pocos los autores que estudian la acumulación de metales esenciales en peces y si lo hacen es porque, en realidad, sus estudios versan sobre toxicocinética de estos elementos. Un estudio realizado por

Dan, (1997), sobre la concentración de elementos (aluminio, arsénico, cadmio, calcio, cobre, cromo, hierro, plomo, potasio, magnesio, manganeso, mercurio, níquel, selenio, sodio y zinc) en el Río Kiamichi en Oklahoma, menciona que cuando el río se encuentra en su mínimo nivel de agua, las concentraciones de estos elementos tienden a presentarse en valores altos, ya sea en sedimentos, adheridos a partículas suspendidas y en el agua como tal, siendo elementos biodisponibles para la biota acuática.

La concentración de dichos metales en aguas superficiales contribuye a la acumulación en branquias, hueso, riñón, hígado y músculo de peces. Las branquias se exponen a metales a través del contacto con el agua ya que están constantemente circulando alrededor de ellas. Los riñones están expuestos a dichos metales por la sangre que fluye desde las branquias a la arteria carótida que aporta sangre al riñón (Farrell, 1993).

7.2. Concentración de metales en agua (época de estiaje y de lluvia)

De los elementos estudiados, en época de estiaje, el orden que siguieron de acuerdo al nivel de concentración encontrada de los metales tóxicos fue: $Pb > Cr > Cd$, para los metales oligoelementos el orden fue: $K > Al > Zn$ y para los metales esenciales fue: $Ca > Na > Mg$. En época de lluvia, el orden que siguieron los metales tóxicos fue: $Pb > Cr > Cd$, los metales oligoelementos fue: $K > Al > Zn$ y los metales esenciales fue: $Ca > Mg > Na$. Se puede notar que tanto para los metales tóxicos como para los oligoelementos en ambos muestreos, el orden fue el mismo pero con una mayor concentración en época de lluvia. Para los elementos esenciales, la diferencia la hace el Mg en época de lluvia, ya que este metal se encontró mayor concentrado que el Na, esto sugiere que en época de lluvia la concentración de los iones libres del Na varía con el pH, temperatura y las sustancias orgánicas (Bohinski, 1991), más sin embargo podría suponerse que para los demás metales en ambas épocas, el efecto por el factor

pH, temperatura, entre otros, es mínimo, debido a ello se concibe una alta concentración de metales en el agua de la laguna.

De acuerdo a Deacon y Driver, (1999), el muestreo de sedimentos de una cuenca se puede usar para definir el incremento de metales por cualquier contaminación exógena (como minera e industrial). Los metales pesados son ingeridos con las partículas de materia orgánica por los organismos bénticos, por lo que se pueden acumular y mover a lo largo de la cadena trófica, por ende, la concentración detectada en los sedimentos se puede utilizar para evaluar su toxicidad potencial para la vida que lo circunda

Deacon y Driver, (1999) realizaron un estudio de los niveles de Cu, Zn, Pb y Cd en los sedimentos y su distribución, ellos mencionaron que a medida que disminuye el tamaño de la partícula en los sedimentos, la concentración de estos metales aumenta. De acuerdo a esto, es claro pensar que la concentración alta de metales encontrados en el agua de la Laguna de Metztitlán, se debe por este mismo suceso, sin olvidar que la presencia de estos metales es en gran parte por la actividad antropogénica.

Es evidente que existiendo estos metales en altas concentraciones en el agua en ambas épocas y siendo estos elementos biodisponibles, la carpa común (ejemplar de estudio) está expuesta continuamente a dichos metales, bioacumulándolos a lo largo del año de una forma más o menos constante.

Millar *et al*, (1992) estudiaron la relación que existía entre el Cu y Zn del agua con los sedimentos, invertebrados bénticos y los tejidos de una especie de carpa chupadora (*Catostomus commersoni*) en zonas contaminadas. Las concentraciones de Cu en invertebrados se correlacionaron con las de agua ($r=0,857$) pero no con el sedimento ($r=0,595$), sugiriendo así que el agua juega un importante papel en la acumulación de metales en invertebrados. Por el contrario, las concentraciones de Zn en invertebrados se

correlacionaron con sedimentos ($r=0,786$), pero no con las concentraciones en agua ($r=0,548$), sugiriendo por tanto que los sedimentos son la principal fuente de contaminación de Zn para invertebrados. Para ambos metales, la concentración en agua fue la que mejor se correlacionó con la contaminación en tejido de peces, mientras que pobremente lo hizo la concentración en sedimentos o invertebrados. Estos estudios refuerzan la evidente concentración de los metales presentes en el agua de la laguna que se encontraron en el presente estudio, con relación a la bioacumulación de los mismos en los tejidos estudiados de *Cyprinus carpio*.

Pardo *et al*, (1989) analizaron Zn, Cd, Pb y Cu en aguas de diferentes ríos de la provincia de España (Valladolid), con el fin de monitorizar la carga de metales pesados y la forma en la que estos metales estaban en el agua. El Zn se distribuyó entre el estado disuelto y unido a la materia suspendida. En el estado disuelto, la cantidad principal corresponde a la categoría de lábil y especie intercambiable con H^+ . Este comportamiento está de acuerdo con la tendencia usual del Zn, ya que tiene poca afinidad por la materia orgánica disuelta, principal agente que forma especies inertes en las aguas fluviales. El Cd apareció mayormente en estado de disolución en especie lábil, pero no siguió un patrón definido en cada río. El Pb se encontró principalmente unido a la materia suspendida. El Cu siguió una tendencia parecida al Pb, ya que se presentó en la materia suspendida y unido a la materia orgánica disuelta como especie fuertemente inerte.

Con los resultados de Pardo *et al*, (1989), en comparación con los resultados obtenidos por Pulido *et al*, (2005), sobre las concentraciones de metales en el Río Metztitlán, de la reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México, es probable que los metales que analizaron se comportaron de igual manera a los de Pardo, por ende la alta concentración encontrada. En el presente estudio como ya anteriormente se mencionó, la concentración de metales también se encontró alta en el agua de la laguna, por tal motivo es necesario el

realizar un estudio que indique la forma en la que se encuentran presentes y monitorizar de manera mas detallada la carga o concentración de ellos.

7.3. Potencial de riesgo asociado al consumo de los ejemplares estudiados.

La medida de la concentración de los metales pesados en agua, aporta información sobre la contaminación del medio que puede o no originar trastornos en los peces estudiados o al consumir el hombre directamente estos organismos.

Otros estudios han realizado medidas de letalidad de los metales pesados. Aunque siempre se realizan en condiciones de laboratorio, que no son iguales a las condiciones naturales, siempre nos orientan sobre los valores de metales que pueden causar daño al ecosistema y más concretamente a la ictiofauna.

Las concentraciones de metales señaladas por diversas legislaciones, que se pueden consultar en antecedentes del capítulo **2.3** de esta tesis de licenciatura (tablas I-X), se muestran muy inferiores a las encontradas en el agua de la Laguna de Metztitlán, por lo que la concentración de estos metales, podría representar un problema para la salud de los peces, pero no para la población que los consume ya que los metales tóxicos estudiados con excepción del plomo en época de estiaje, que es en donde se presentó en piel, se encontraron por debajo de las concentraciones permitidas por la Norma Oficial Mexicana (NOM-027-SSA1-1993, Bienes y servicios) de productos de la pesca, más sin embargo para los elementos esenciales y los oligoelementos, es necesario un estudio más detallado sobre la toxicología de cada metal, mencionando la cinética de estos contaminantes y estableciendo así modelos dinámicos o estáticos para simular los procesos reales de dispersión, transporte y transferencia de estos metales.

Se sabe que ciertos metales sólo son imprescindibles en dosis prácticamente despreciables. Curiosamente otros metales los bioacumula el organismo humano sin saber

cual es su cometido, como ocurre con el aluminio, aunque en los últimos años los neurobiólogos sospechan que este metal está implicado en la aparición de determinados procesos degenerativos del cerebro, como el mal de Alzheimer, un tipo de demencia senil incurable que afecta a más de 20 millones de adultos en todo el mundo (Jansson, 2001).

Determinados metales como el plomo, el cadmio y el cromo, son claramente tóxicos, pero a pesar de ello nuestras células los almacenan en cantidades que pueden llegar a desencadenar serios problemas de salud. Por ejemplo la intoxicación de plomo, que se manifiesta cuando su concentración supera los 70 microgramos por decilitro de sangre, puede provocar daños crónicos irreversibles: retrasos cognoscitivos en los niños y lesiones renales en los adultos (Galvão y Corey, 1987). Para el cadmio, que se manifiesta cuando su concentración supera los 500 microgramos por persona, puede provocar daños en los túbulos renales en adultos, efectos como anemia, alteraciones hepáticas y cambios en el metabolismo de los minerales. La ingestión prolongada del cadmio, aunque no es muy frecuente se puede presentar en la población general. El ejemplo más conocido es el de Japón, donde se observó una grave enfermedad ósea, problemas gastrointestinales, anemia, daño renal y trastornos hepáticos (enfermedad itai-itai) (Galvão y Corey, 1987). Para el cromo, que se manifiesta cuando su concentración supera los 0.03-0.1 mg/ día, puede provocar daños gastrointestinales agudos con vómitos sanguinolentos y diarrea abundante, conduciendo a la muerte por uremia. La dosis letal para el hombre es de 6 a 8 gramos (Galvão y Corey, 1987).

El calcio, el magnesio, el potasio, el sodio y el zinc, son absorbidos en diferentes regiones del tracto digestivo y mediante unos mecanismos tremendamente sofisticados que impiden que reaccionen entre sí, éstos metales juegan un papel insustituible en los procesos fisiológicos. Muchos de ellos catalizan infinidad de reacciones químicas, intervienen en la síntesis de vitaminas y forman parte de la organización estructural de las proteínas y otros

compuestos. El calcio si excede los 1000mg por persona, puede producir estreñimiento, aumentar el riesgo de formación de cálculos renales y alteraciones renales e interferir en la absorción de otros minerales como hierro y zinc (Ortega *et al*, 2000). El magnesio si sobrepasa los 400mg por persona, puede producir escalofríos, náuseas, vómitos y dolores musculares (Holding, 2006). El potasio si sobrepasa los 3000mg por persona, puede producir un mal funcionamiento en el sistema renal (Holding, 2006). El sodio si sobrepasa los 1600mg por persona, puede producir lesiones en riñones e incrementar las posibilidades de hipertensión (Ortega *et al*, 2000). El zinc si sobrepasa los 15 mg por persona, puede producir efectos genotóxicos o mutagénicos, arteriosclerosis, úlceras en estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas, anemia, daño en páncreas y perturbación del metabolismo de las proteínas (Holding, 2006).

Esta situación aparentemente contradictoria tiene su explicación en la extraordinaria capacidad y avidez que posee nuestro cuerpo para captar las minúsculas cantidades de minerales existentes en los alimentos y para retenerlas durante el mayor tiempo posible. Es por esta actividad acaparadora, a veces poco selectiva, por lo que en ocasiones se cuelean minerales indeseables.

8. CONCLUSIONES

Una vez discutidos los resultados obtenidos en este estudio sobre el estado de la contaminación por metales en la carpa común y en el medio acuático (Laguna de Metztitlán) se llegaron a establecer las siguientes conclusiones:

1. Para los metales tóxicos en la época de estiaje, el plomo se encontró más biodisponible en el agua por lo que únicamente se da la presencia en la piel y la mayor bioacumulación en los huesos de la carpa, mientras que el Cd y Cr no se presentaron.
2. En la época de lluvia, los resultados de este estudio no mostraron la bioacumulación de dichos metales tóxicos (Cd, Cr y Pb) en la carpa.
3. Para los oligoelementos y los metales esenciales, en los diferentes órganos del pescado se manifestaron con altos contenidos de aluminio en ambos muestreos. En la época de estiaje, en el músculo se da la mayor concentración de potasio y en vísceras la mayor de zinc. En la época de lluvia, en los mismos tejidos, la bioacumulación se da de manera similar, pero con concentraciones que están casi por el doble. Para el calcio, magnesio y sodio las concentraciones bioacumuladas presentes en los tejidos de estudio del pescado, marcan la diferencia entre una época y otra, ya que en la época de lluvia estos metales aumentan su concentración en el agua de la laguna siendo más biodisponibles para la carpa.
4. Es evidente que existiendo estos metales en el agua y siendo estos elementos biodisponibles, las branquias, la piel, las vísceras, el músculo y el hueso están expuestos continuamente a esta contaminación, por lo que son ingeridos y bioacumulados de forma más o menos constante dependiendo de la época.
5. Se concluye que las branquias son un tejido de acumulación de metales, dichos metales por pasar directamente, las vísceras y hueso también los retienen, la piel al

igual que las branquias es la primera barrera defensiva y al estar expuesta directamente con el agua, tiende a bioacumular metales.

6. Los valores encontrados de metales en músculo (en ambas épocas) son prácticamente los más bajos de todos los tejidos estudiados con excepción del K, por lo que el músculo juega un papel menor en la acumulación de estos elementos. Así se ha podido comprobar por todos los autores que estudian la bioacumulación de metales en peces.
7. Con el fin de preservar la salud pública, la NOM-027SSA1-1993 con respecto al contenido máximo de determinados contaminantes en los productos de la pesca, en ella se contemplan como sustancias necesarias de controlar el plomo y el cadmio. En el presente estudio, los valores encontrados de Pb y Cd en la musculatura están por debajo de los referidos en esta legislación, por lo que, atendiendo a estos valores de referencia, el consumo de estos peces no representaría ningún riesgo para la salud.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Amundsen PA, Staldvik FJ, Ludin AA, Kashulin NA, Popova OA, y Reshetniko JL, (1997). *Heavy metal contamination in freshwater fish from the border region between Norway and Russia*. Science of the Total Environment **201**:211-224.
- Anadon A, Muñoz MJ, Ortiz JA, (1984). *Acumulación tisular de Zinc, Plomo, Cobre, Hierro y Cromo en Truchas de Río, Salmo trutta fario*. Acción ecotoxicológica. An. INIA/Service. Ganadera n°19.
- Berman E, (1980). *Toxic metals and their analysis*. Heyden International Topics in Science. Londres, Gran Bretaña, 243 p.
- Bohinski RC, (1991). *Bioquímica*. Pearson Educación. D.F, México, 289 p.
- Camusso ML, Vigano, y Balestrini R, (1995). *Bioconcentration of trace metals in rainbow trout. A field study*. Ecotoxicology and environmental safety **31**:133-141.
- CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, (2003). Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán. Dirección General de Manejo para la Conservación, D. F, México, 202 p.
- Cruz CT, (2000). *Inventario de aguas superficiales del Estado de Hidalgo*. Amalgama Arte Editorial, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, 87 p.
- Dan BM, (1997). *Concentrations of selected elements in the Kiamichi River above Hugo reservoir*. Environmental Quality Program. Tulsa, Oklahoma. 20 p.
- Deacon JR y Driver NE, (1999). *Distribution of trace elements in streambed Sediment associated with mining activities in the upper Colorado River Basin, Colorado, USA*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology **37**:7-18.
- Donat J y Dryden C, (2001). *Transition metals and heavy metal speciation*. Academic Press. Londres, Gran Bretaña, 159 p.

- EPA. United States Environmental Protection Agency, (1995). *SW-846 EPA Method 3051: Microwave assisted acid digestion of aqueous sample and extracts*. En Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods. Washington, D. C.
- EPA. United States Environmental Protection Agency, (1996). *SW-846 EPA Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices*. En Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods. Washington, D. C.
- Farag AM, Woodward DF, Goldstein JN, Brumbaugh W y Meyer JS, (1998). *Concentrations of metals associated with mining waste in sediments, biofilm, Benthic Macroinvertebrates, and fish from the Coeur d'Alene River Basin, Idaho*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology **34**:119-127.
- Farrell AP, (1993). *The physiology of fishes*. En Evans, D. H. (ed.). CRC Press, 219-250.
- Galvão LAC y Corey G, (1987). *Plomo*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, 64 p.
- Galvão LAC y Corey G, (1987). *Cadmio*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, 69 p.
- Galvão LAC y Corey G, (1987). *Cromo*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, 66 p.
- Geyne AR, Fries CJ, Segerstrom K, Black RF y Wilson Y. F, (1963). *Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte*. Consejo de Recursos Naturales no Renovables, Hidalgo, México, 115 p.
- Heinen JM, (1995). *Water quality criteria, uptake, bioaccumulation, and public health considerations for chemicals of possible concern in west Virginia mine waters used for culture of rainbow trout*. The Conservation Fund Freshwater Institute **59**(1):1-59.

- Hodson PV, Blunt BR y Spry DJ, (1978). *Chronic toxicity of water-borne and dietary lead to rainbow trout (Salmo gairdneri) in Lake Ontario water*. *Aquatic Toxicology* **12**:869-878.
- Holding BV, (2006). *Agua residual y purificación del aire*, <http://www.lenntech.com/index.htm>, Holanda.
- Jansson TE, (2001). *Aluminium exposure and Alzheimer's disease*. *Journal of Alzheimer's Disease* **3**(1): 541-549.
- Kabata PA y Pendias H, (2001). *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Florida, 413p.
- Kemmer NF y McCallion J, (1997). *Manual del agua*. Mc Graw-Hill, D. F, México, 565p.
- Lozada ZEJ, Monks S, Pulido FG, Gordillo MAJ y Prieto GF, (2006). *Determinación de metales pesados en Cyprinus carpio en la Laguna de Metztlán, Hidalgo, México*. En V Congreso Internacional y el XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, Centro Vacacional IMSS, Oaxtepec, Morelos, México, p. 1-9.
- McCracken MS, Kanerva RL y Alden L C, (1987). *Development of a short-term model of decalin inhalation nephrotoxicity in the male rat*. *Food Chemical Toxicology* **25**:35-42.
- McCracken IR, (1987). *In Cadmium in the Aquatic Environment*. Ed. NY, NY: Wiley, 116p.
- Miller PA, Munkittrick KR, Dixon DG, (1992). *Relationship between concentrations of copper and zinc in water, sediment, benthic invertebrates, and tissues of white sucker (Catostomous commersoni) at metal-contaminated sites*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **49**: 978-984.
- Monks SS, Ramírez ZVR y Moreno FS, (2003). *Helminthos bioindicadores de la calidad del agua en la Reserva de Barranca de Metztlán*. *Memorias del Foro Sobre la Problemática del Agua: un Desafío para las IES en la Región Centro-Sur de la*

República Mexicana, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, A.C. y la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES), A.C. **CL-10:1-10.**

NOM. Norma Oficial Mexicana, (1996). *NOM-001.ECOL-1996 (Corregida en el DOF el 3 de Abril de 1997). Comisión Nacional de Aguas.* Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales.

NOM. Norma Oficial Mexicana, (1993). *NOM -027-SSA1-1993. Bienes y servicios (Especificaciones sanitarias, publicada el 3 de marzo de 1995) Pescados frescos-refrigerados y congelados.* Establece los límites máximos permisibles de metales pesados en pescado.

Ortega LM, Siebe C, Bécard G, Méndez I y Webster R, (2000). *Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soil of the Mezquital Valley of México.* Applied Soil Ecology **16**:149-157.

Pardo R, Barrado E, Arranz A, Pérez JM, Vega M, (1989). *Levels and speciation of heavy metals in waters of Valladolid.* International Journal of Environmental Analysis Chemicals **37**: 117-123.

Peña CE, Carter DE, y Fierro FA, (2001). *Evaluación de riesgos y restauración ambiental,* <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/> Arizona.

Prichard E, Mackay GM y Points J, (1996). *Trace analysis: A structured approach to obtaining reliable results.* Royal Society of Chemistry, Londres, Gran Bretaña, 223 p.

Pulido FG, Monks S y Gordillo MAJ, (2005). *Monitoreo de bajo costo en la evaluación de la calidad ambiental.* Revista Internacional de Ciencias Ambientales **21**(supl. 1):578-583.

- Rodier J, (1990). *Análisis de las aguas (Aguas naturales, residuales, agua de mar)*. Ediciones Omega, Barcelona España, 156-158 pp.
- Shah SL, (2005). *Effects of Heavy Metal Accumulation on the 96-h LC50 Values in Tench Tinca tinca L., 1758*. *Tubitak* **29** (205) 139-144.
- Srinath TT, Verma W, Ramteke P y Garg KS, (2002). *Chromium (VI) biosorption and bioaccumulation by chromate resistant bacteria*. *Chemosphere* **48**: 427-435.
- Spear PA, (1981). *Zinc in the aquatic environment: chemistry, distribution and toxicology*. Environmental Quality Publication **35**:1-145.
- Stalling C, (1986). *Reto a la contaminación*. Pax – México, D.F, México, 247 p.
- Stansby ME, (1945). *Composition of certain species of freshwater fish. I. Introduction the determination of the variation of composition of fish*. *Food Research* **19**:231–234.
- Takayuki S y Leonard BF, (1993). *Introducción a la toxicología de los alimentos*. Acirbia, S. A., San Diego, California, 237 p.
- Tao S, Liu C, Dawson R, Cao J, Li B, (1999). *Uptake of particulate lead via the gills of fish (Carassius auratus)*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **37**: 352-357.
- Tiller KG, (1989). *Heavy metals in soils and their environmental significance*. *Advances in Soil Science* **9**:113-142.
- Toral YF, (1996). *Estudio comparativo de especiación en muestras sólidas de interés medioambiental*. Tesis de Licenciatura en Química. Universidad de Valladolid, España, 113 p.
- Vazquez T, (2005). *Estrés producido por concentraciones terapéuticas de sulfato de cobre en Carassius auratus*. *Hidrobiologica* **15**(1): 35-42.

- Vera G, (2001). *Pruebas ecotoxicológicas con cadmio y cromo usando postlarvas delpejerrey Odontesthes (austromenidia) regia regia hildebrand*. Facultad de Ciencias Biologicas UNMSM **8**(2): 1-9.
- Viessman WJ y Hammer MJ, (1993). *Water supply and pollution control*. Harper Collins Collage, USA, 256 p.
- WHO. World Health Organization, (1992). *Environmental Health Criteria: Cadmium*. Environmental Aspects **135**: 25-30.
- Wiliam BB, (1979). *Instrumental analysis*. Collegium Book, New York, 195 p.

10. ANEXOS

10.1 Siglas usadas

CEE	: Comunidad Económica Europea
EPA	: Environmental Protection Agency (EUA)
FAO	: Food and Agriculture Organization (Organización para la Alimentación y la Agricultura.
NOM	: Norma Oficial Mexicana
OMS	: Organización Mundial de la Salud
OSHA	: Administración de Salud y Seguridad Ocupacional
$\mu\text{g}/\text{m}^3$: Microgramos por metro cúbico
$\mu\text{g}/\text{l}$: Microgramos por litro
g/kg	: Gramos por kilogramo
$\text{Log}_n(\text{conc}+1)$: Logaritmo natural por la concentración mas uno
$\text{m}^3/\text{año}$: Metro cúbico por año
mg/kg	: Miligramo por kilogramo
mg/l	: Miligramo por litro
$\text{mg}/100\text{g}$: Miligramo por cada cien gramos
ng/l	: Nanogramo por litro
msnm.	: Metros sobre el nivel del mar
ppm.	: Partes por millón
ppb	: Partes por billón

10.2 Material y reactivos utilizados

Material

Cuchillo, tijeras y pinzas de plástico para técnica de disección de peces para la obtención de muestras para determinación de metales pesados.

Papel de laboratorio para pesar las muestras.

Material de vidrio para muestra de músculo: refractario de 32 X 25 cm.

Material de vidrio para muestra de hueso: refractario de 25 X18 cm.

Material de vidrio para muestra de piel: refractario flanero chico.

Material de vidrio para muestra de branquia: refractario flanero chico.

Material de vidrio para muestra de vísceras: caja de petri chica.

Balanza granataria de 2000g.

Balanza analítica de 1000g.

Mortero de cristal para triturar las muestras de pescado.

Espátulas de plástico.

Matraces aforados de 50ml.

Vasos de precipitados de 25, 50 y 100ml.

Embudos chicos para filtrar las muestras.

Papel filtro.

Vasos de plástico de 25ml para las muestras digestadas de pescado.

Vasos de plástico de 1000ml para las muestras de agua.

Papel parafilm, para el tapado de muestras.

Vasos de plástico de 50ml con tapón de rosca para la fabricación de patrones. Matraces aforados de 50ml.

Micropipetas de 0.5 a 100µl para la fabricación de patrones.

Pipetas aforadas y milimétricas de 0.5, 1, 2 y 5 ml.

Perilla succionadora para pipeta.

Reactivos

Agua destilada

Ácido nítrico 75% puro de 100 ml

Patrones de Aluminio (Al), Cadmio (Cd), Calcio (Ca), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Magnesio (Mg), Potasio (K), Sodio (Na) y Zinc (Zn).