



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES PLANTEL
IZTACALA**

“Niveles de Cu y Pb en tejidos de *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) del sistema fluvial Jamapa-Atoyac, Veracruz.”

TESIS

Que para obtener el Grado de

Licenciado de Biología

Que Presenta

Christian Alfonso Martínez Ávila

Tutor

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.



Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

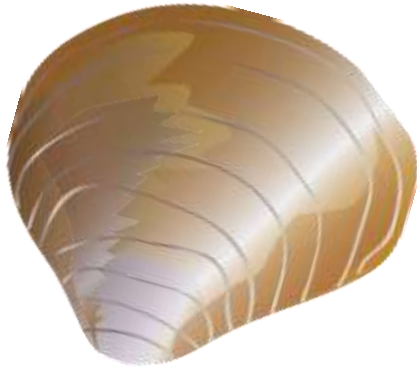


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Dedico este trabajo a mi madre,
mi abuela, mi familia, a Shiva (†) y a
mis alumnos

“No hay mejor educación que la impulsada por uno mismo.”

-Neil deGrasse Tyson



AGRADECIMIENTOS

- Gracias a la UNAM por permitirme forjarme a lo largo de mi trayecto académico *“Por mi raza hablara mi espíritu.”*
- A mi Madre Rosalba por ser la autora de mi vida que en su momento era los ojos de mi camino y que ahora es quien me guía a escribir mis propias historias para ser los ojos de su futuro, gracias por tus desvelos, tus cansancios, tus regaños, tu cariño y tu fortaleza frente a las adversidades, aprendiste tomar la rienda de padre y madre al mismo tiempo, me llenas los días de alegría y me enseñaste a apreciar la vida con el corazón, esos y más fueron los motivos para que yo pudiera salir adelante, te amo mucho y te adoro aunque a veces no lo demuestre, gracias por todo jefesita, tu eres el pilar principal de mi vida.
- A mi mamita María Cruz, por cultivar los valores de bondad, humildad, calidez, paz, alegría, familia y responsabilidad en mi desde pequeño, este trabajo está dedicado especialmente para ti, le debo demasiado y juro pagarle todo lo que hizo por mí, gracias por ser el pilar de mi hermosa familia, por ser la mujer que frente a cualquier problema sabe mostrar tranquilidad y paciencia, sabe contagiar sonrisas, alegrías y fuerza para no darse por vencido, gracias por todos los cafés con leche que me dio, los platos de comida que siempre hubo en la mesa a pesar de que la situaciones no nos favorecieran, gracias por todos los abrazos que me traen calma, gracias por todas las historias que me conto, por todas las experiencias de vida que me compartió, gracias por eso y por mucho más, usted es el motivo del quien soy y de quien quiero ser, la amo mucho mamita linda.
- A mi tía Lauris por ser la segunda madre que guio mis pasos a ser un mejor humano para la sociedad desde que tenía pañal, gracias a usted que me enseñó a querer de forma sincera y a vencer el miedo a tomar mis propias decisiones, gracias por ser un pilar fuerte en mi vida, la amo y la adoro como si fuera mi madre
- A mi tío Mario, por ser ese hermano mayor que nunca tuve, tus experiencias de vida son motivo de admiración para mí, eres un ser humano que sabe luchar por lo que quiere, contagias alegría y optimismo, eres fuerte y valiente, gracias a ti por enseñarme a usar mis puños, no solamente en el ring, sino en la vida al enfrentar de forma optimista los problemas, te quiero mucho robostron, muchas gracias.
- A mis hermanas (primas) Frida & Majo, son el motor del que yo siga adelante, quiero enseñarles a ser mejor día a día no solamente en la escuela ni en el conocimiento,

sino en la vida, quiero que el día de mañana lleguen a ser mejor de lo que yo fui, las amo mis niñas hermosas.

- Gracias mis tías Elena, Oliva, Norma, Laura, Maria y a mis tíos Pablo y Mario, a mis padrinos Manuel y Arturo, gracias a mis primas Diana, Karina, Susana, Frida, Majo y a mis primos David, Daniel, Pablito, Ruben, Arturito, Quiero agradecer a mi Familia en general, por apoyarme y contagiarme alegrías. Muchas gracias.
- También quiero agradecer a mi familia paterna que a pesar de no tener mucho contacto continuo con ellos, el amor siempre estará presente entre nosotros, siempre los llevo en el corazón.
- Quiero dedicar este trabajo especialmente a mi Abuela Graciela Mares, mi tía Beatriz Martinez M. y mi prima Jessica, que en paz descansen, siempre las recordare con una sonrisa y con motivo de alegría.
- Gracias a mi Padre Idelfonso Martinez Mares por ser el mejor ejemplo de optimismo y dedicación, a pesar de las circunstancias y obstáculos que la vida te ha puesto en el camino, sabes tomar las mejores decisiones para no dejarte vencer, viejón te amo. Siempre presente nuestro dicho de fortaleza en la *mente, alma y corazón*.
- A mis amigos y colegas de la carrera y de la bodeguita arrecifal por todas las aventuras y conocimientos aprendidos, Muchas gracias Carlos, Alex, Aurora y compañía.
- Al Staff de Terra Peninsular, maravillosa familia que me enseñó la importancia de la conservación ambiental y del cuidado de la naturaleza, Muchas gracias Cesar, Richi y compañía.
- A mis alumnos por motivarme a mejorar como docente.
- A mis maestros, por enseñarme a ser mejor tanto en el salón de clases como en la vida profesional.
- Al Biol. Luis Tello por los comentarios hacia este proyecto.
- A la M. en C. Aura Aletse por sus observaciones hacia este proyecto.
- Al M. en C. Francisco Galindo por sus observaciones y comentarios
- Al Dr. Horta Puga especialmente por sus enseñanzas, conocimiento y correcciones, paciencia que me tuvo durante la realización de este proyecto, gracias por ser un

ejemplo a seguir Doc, lo aprecio mucho y espero volver a colaborar con usted en el futuro. ¡Muchas gracias Doc!

- Gracias Especialmente al Dr. Rafael Cabral, gracias carnal por ser un ejemplo de vida y por estar al tanto de mi progreso, gracias por tus enseñanzas, correcciones y oportunidades que me brindaste para mejorar profesionalmente, gracias por dirigir mi proyecto y permitirme trabajar contigo, gracias por todo el apoyo que me brindaste aun en los momentos más gachos que estaba pasando, ¡mil gracias Rafa!
- Gracias a Shiva, por acompañarme en tus últimos días de vida a escribir mi tesis, siempre te llevare en el corazón chaparro.
- GRACIAS AL PROYECTO PAPIIT IN114616 POR PERMITIR LA REALIZACIÓN DE ESTE PROYECTO.

“Niveles de Cu y Pb en tejidos de *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) del sistema fluvial Jamapa-Atoyac, Veracruz.”

TESIS

Que para obtener el Grado de

Licenciado de Biología

Que Presenta

Christian Alfonso Martínez Ávila

Tutor

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Comité

Dr. Guillermo Javier Horta Puga

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

Biol. José Luis Tello Musi

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

M. en C. Francisco López Galindo

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

M en C. Aura Aletse Morales Aranda

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

Resumen

En este trabajo se consideró el uso de *Corbicula fluminea* presente en tres estaciones del Sistema Fluvial Jamapa-Atoyac (SFJA) durante dos temporadas (secas: Cuitláhuac-CT y lluvias: Mata Tambor-MT y Mata de Varas-MV) para analizar la biodisponibilidad de Pb y Cu en el sedimento del cauce y en relación con las proporciones acumuladas en los tejidos de los bivalvos (BAF: Factor de bioacumulación). Así mismo, se analizaron las características fisicoquímicas del sedimento superficial (granulometría, pH, CICT y contenido de materia orgánica) y la correlación existente entre la talla/biomasa de los pelecípodos en relación con los niveles acumulados en sus tejidos para determinar su riesgo de consumo. La extracción de elementos traza biodisponibles se realizó por el método de remoción y filtrado de HNO₃ 1M, la extracción de elementos traza acumulados en el tejido de los individuos de *C. fluminea* se realizó por digestión (cerrada) química del tejido blando seco. La determinación de Cu y Pb se analizó por atomización electrotérmica en un espectrofotómetro de absorción atómica. La concentración promedio de Cu detectado en el tejido de los bivalvos fue de 34.35 ± 25.22 µg/g durante la temporada de lluvias y de 34 ± 9.82 µg/g durante la temporada de secas, el valor más alto detectado fue de 89.01 µg/g en MT y de 44.92 µg/g en CT. El valor promedio de BAF resultó mayor durante la temporada de secas (861.03 ± 245.68) que en la temporada de lluvias (62.46 ± 45.85) debido a los niveles de Cu biodisponibles en el sedimento de cada estación (secas: 0.04 µg/g, lluvias: 1.73 ± 1.66 µg/g) sin embargo la correlación entre la biomasa de los pelecípodos y la concentración de Cu acumulada fue significativa durante la temporada de lluvias indicando que existe un carácter bioacumulativo ($\beta > 1$) de este elemento. Las características fisicoquímicas del sedimento y las condiciones ambientales durante la temporada de lluvias prolongan la exposición de Cu para ser asimilado por los pelecípodos. Las pruebas de *t* arrojaron diferencias significativas entre la biomasa ($p=0.00001$, $t=6.27$) y el BAF ($p=0.00000001$, $t=10.31$) de los bivalvos entre temporadas, sin embargo no presento un riesgo significativo a su consumo ($t_{exp}=3.756 > t_{crit}=1.734$) de acuerdo a los límites permisibles establecidos por la legislación brasileña. El Pb fue indetectable en los pelecípodos a pesar de encontrarse en forma biodisponible (secas: 1.64 µg/g, lluvias: 0.49 ± 0.3 µg/g) indicando que posiblemente existe dilución biológica de este elemento al no participar metabólicamente como el Cu.

Palabras clave: Bioacumulación, Biodisponible, *Corbicula fluminea*, elemento traza, sedimento.

Índice

Resumen	7
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Elementos traza: problemática ambiental	10
1.2. Biodisponibilidad de Elementos Trazas	10
1.3. Bioacumulación; mecanismo de absorción de elementos traza.....	13
1.4. Pelecípodos; bioindicadores y bioremediadores de elementos traza.....	15
1.5. <i>Corbicula fluminea</i> (Muller, 1774)	15
1.6. Importancia ecológica de <i>Corbicula fluminea</i>	17
1.6. ¿Puede considerarse a <i>Corbicula fluminea</i> un bioindicador de elementos traza?	18
1.7. Distribución de <i>Corbicula fluminea</i> y su relación con los elementos traza	19
1.8. Sistema fluvial Jamapa-Atoyac: Fuente puntual de elementos traza	21
1.9. Justificación.....	22
1.10. Pregunta de Investigación	22
1.11. Hipótesis	23
1.12. Objetivos	23
2. Material y método.....	23
2.1. Fase de Campo: Área de estudio, Sistema fluvial Jamapa-Atoyac.	23
2.2. Fase de laboratorio.....	24
2.2.1. Procesamiento y extracción de elementos traza en tejidos de <i>Corbicula fluminea</i>	25
2.2.2. Procesamiento y extracción de elementos traza biodisponibles en sedimento superficial.....	25
2.2.3. Determinación de elementos traza: Pb y Cu	29
2.2.4. Factor de bioacumulación.....	29
3. Resultados.....	30
3.1. Contenido Biodisponible de elementos trazas: Características fisicoquímicas del sedimento.....	30
3.1.1. Contenido de Cu biodisponible.....	30
3.1.2. Contenido de Pb biodisponible.....	30
3.1.3. Características fisicoquímicas del sedimento.....	30
3.2. Contenido de elementos traza en <i>Corbicula fluminea</i> : Factor de bioacumulación.....	31
3.2.1. Contenido de Cu	31
3.2.2. Contenido de Pb	31
3.2.3. Factor de bioacumulación (BAF)	32

3.2.4. Modelos de regresión lineal y potencial entre el BAF y la talla de <i>Corbicula fluminea</i> .	33
3.2.5. Bioacumulación de Cu; Análisis comparativo de temporadas.....	34
4. Discusión	35
4.1. Análisis fisicoquímico del sedimento fluvial: concentración biodisponible de Cu y Pb.	35
4.2. Contenido de Cu y Pb en tejido blando de <i>Corbicula fluminea</i>	38
4.3. Factor de bioacumulación	41
4.4. Análisis comparativo entre estaciones: Características bioacumulativas de <i>C. fluminea</i> y riesgo de consumo.....	42
5.0. Conclusiones	44
6.0. Bibliografía.....	45
7.0. Anexos.....	53
7.1. Anexo 1: Sistemática de <i>C. fluminea</i>	53
7.2. Anexo 2: Morfología y alometría de <i>C. fluminea</i>	54
7.3. Anexo 3: Estaciones de muestreo.....	55
8.0. Glosario.....	58

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Elementos traza: problemática ambiental

Una de las características de los elementos traza (o metales pesados) es ser elementos potencialmente tóxicos para la biota, algunos son elementos esenciales para el metabolismo en bajas concentraciones y tóxicos a elevadas concentraciones mientras que otros elementos no son requeridos para el metabolismo y son tóxicos incluso en bajas concentraciones (Páez-Osuna, 2005).

En la naturaleza, los elementos traza se encuentran en forma sólida, disuelta o particulada, su transporte se da por medio de la erosión de las rocas, por distribución atmosférica de compuestos gaseosos o por medio de la advección del agua en sistemas acuáticos, uno de los principales procesos naturales que aportan elementos al medio es la meteorización de las rocas, por otro lado, la principal incorporación de elementos traza a ambientes acuáticos es debido a la actividad antrópica, como son la actividad industrial, la agrícola, la urbana y doméstica que en su conjunto representan el mayor aporte en sistemas loticos o lenticos a través del desagüe o por depósito directo de material industrial. (Schaule y Patterson, 1981; van, 1982; Ponce-Velez y Botello, 1992; Franco et al., 2002; Furhan et al., 2006).

Debido a la influencia antrópica, en los últimos años los sistemas fluviales han presentado una alta capacidad acumulativa de contaminantes en ríos y lagos por el material de descarga, que por factores abióticos y procesos fisicoquímicos el transporte del material influye en la adsorción y deposición de los elementos traza en el sedimento (Stumm y Morgan, 1984; Paez-Osuna et al, 2005).

1.2. Biodisponibilidad de Elementos Trazo

El análisis de elementos traza en sedimentos y en agua ha permitido conocer su fluctuación a largo o a mediano plazo a través de los años (Ahumada, 1994), esto permite conocer, además de su distribución en el ambiente, las formas en las que interactúan o se depositan en los ecosistemas, lo que genera la posibilidad de que los elementos puedan ser capturados e incorporados en sus tejidos por la biota. La asimilación de los elementos traza

por la biota está en función a la especiación química (tabla 1) y a la forma en la que son asimilados por los organismos.

TABLA 1: Factores que afectan la especiación química y que influyen en la toxicidad de los elementos traza en el ambiente (Stumm y Morgan, 1984).

Factores	Efectos
pH, alcalinidad, ligandos orgánicos e inorgánicos	- Cambios en la distribución de las especies que influyen en la formación de complejos y en la capacidad de adsorción.
Cantidad de partículas y coloides	- Secuestro de elementos traza por material particulado como óxidos de hierro, manganeso, aluminio y de arcillas.
Potencial redox	- Afecta la disponibilidad y distribución de ciertos elementos traza por medio de la oxidación o reducción de la materia.

La especie química en que se encuentran los elementos traza es fundamental para evaluar los efectos tóxicos hacia los seres vivos, ya que estos elementos en forma lábil o libre en el ambiente pueden interactuar fácilmente con la materia orgánica formando complejos materia-elemento traza, por lo tanto, se consideran biodisponibles en el medio y esto recae directamente en la cadena trófica (Hoz y Edwards, 2005). La biodisponibilidad es la forma libre o lábil de un elemento para ser asimilado por los organismos presentes en el medio (Hoz y Edwards et al., 2005, Wong et al., 2017) Las formas de asimilación pueden ser por bioconcentración (Intercambio gaseoso, adsorción dermal) y por rutas dietéticas.

Cuando los elementos traza son asimilados por los seres vivos, pueden seguir tres rutas (Figura 1): 1) Se pueden aislar dentro de las células por proteínas especializadas para neutralizar la concentración del elemento traza, por ejemplo, las metaltioneinas, 2) Se pueden excluir del organismo sin afectar los procesos metabólicos, 3) Se pueden acumular dentro de las células sin ser aisladas por proteínas especializadas, este último mecanismo puede generar una deficiencia metabólica y daño tisular en los organismos.

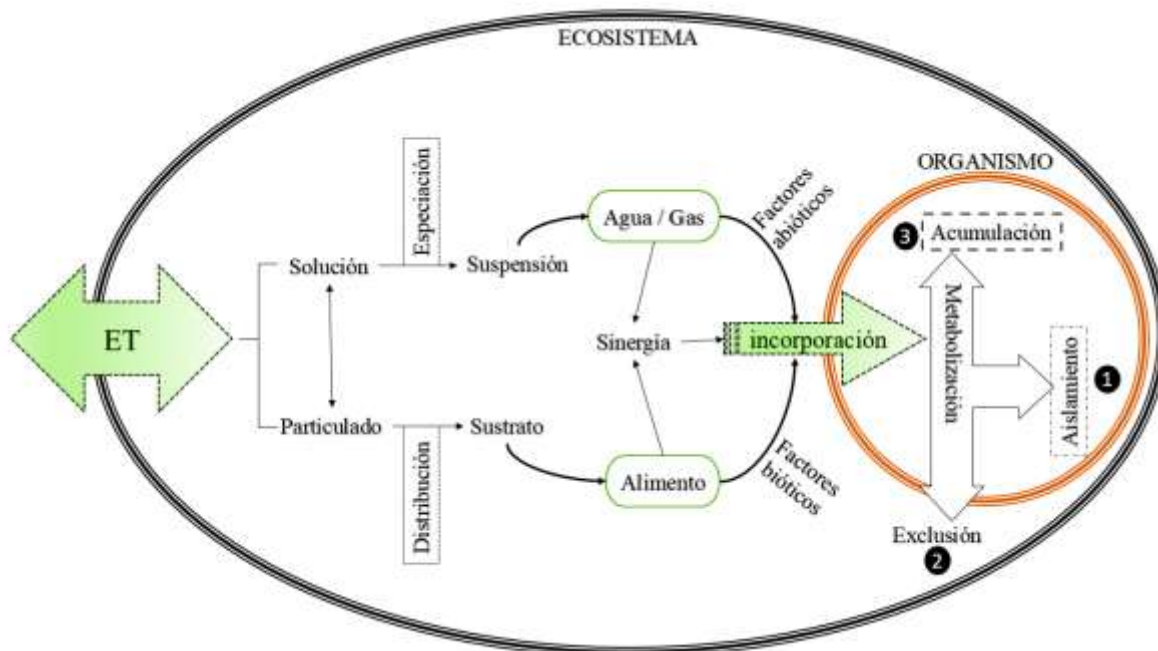


FIGURA 1: Ruta de los elementos traza dentro de un ecosistema hasta incorporarse dentro de los organismos al ser metabolizados, ET: elemento traza.

Campbell et al. (2008) describen cuatro tipos de transporte en el cual se pueden incorporar los elementos traza dentro de las células (Figura 2):

- A) Transporte por canales proteicos:** El elemento traza puede transportarse directamente a través de las proteínas que atraviesan la membrana celular hasta incorporarse dentro de la célula.
- B) Transporte por difusión pasiva:** Los elementos traza en forma liposoluble por especiación química pueden disolverse fácilmente por la membrana celular.
- C) Transporte mediado por un ligando:** El elemento traza puede formar complejos con proteínas para difundirse a través de la membrana celular hasta ser liberada al citoplasma
- D) Transporte por endocitosis:** El elemento traza acoplado a una partícula sólida puede ser invaginado por la membrana celular e incorporarse en forma de vesícula dentro de la célula.

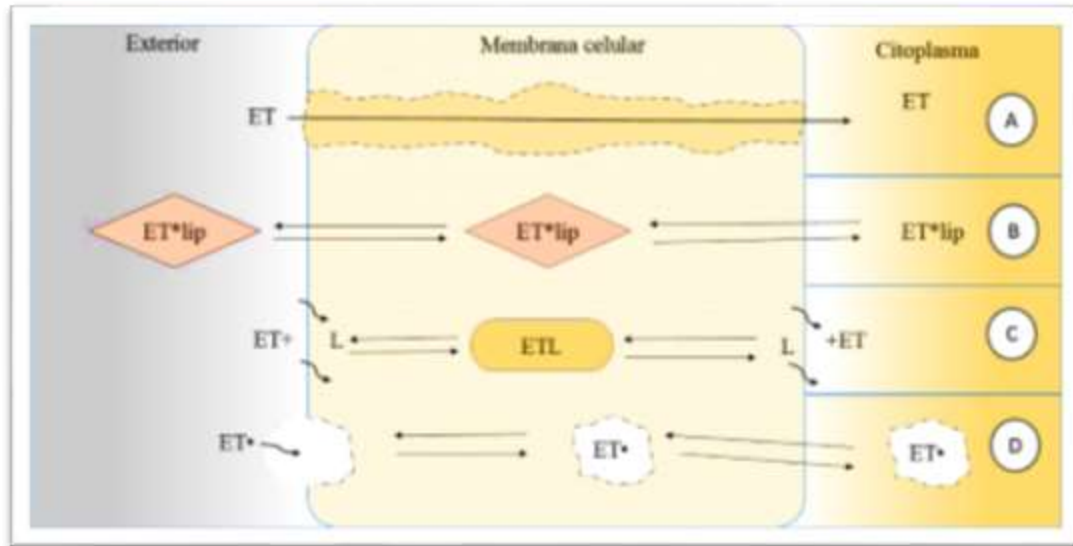


FIGURA 2: Tipos de transporte del elemento traza (ET) hacia la célula a través de la membrana plasmática A) difusión pasiva por medio de un canal proteico, B) Difusión pasiva por un elemento traza liposoluble (ET^*lip), C) transporte activo por medio de un ligando (L) formando un complejo liposoluble (ETL), D) transporte del elemento traza en complejo con material particulado ($ET\bullet$) es introducido hacia la célula por medio de una vesícula formada por la membrana celular.

1.3. Bioacumulación; mecanismo de absorción de elementos traza

En las últimas décadas, se han implementado estrategias metodológicas que permitan evaluar la distribución de los elementos traza a través del tiempo y del espacio con uso de organismos centinelas o bioindicadores, en definición, un bioindicador es un organismo que indica las condiciones de un ecosistema debido a su tolerancia a la capacidad acumulativa de material en sus tejidos (Mackay y Fraser, 2000). Para considerar un organismo como un bioindicador de contaminantes se toman en cuenta los siguientes criterios:

- Tiene amplia distribución geográfica, es abundante y está presente a lo largo del año.
- Existe una correlación razonable entre el contaminante de algún factor del ecosistema (biótico o abiótico) y la concentración del mismo acumulado en los tejidos del organismo.
- Constituye gran parte de la diversidad de la comunidad.
- Es de fácil recolección e identificación.

- Su ciclo de vida es corto con etapas metamórficas lo que le permite una distribución eficaz que proporciona información viable de la calidad del ambiente tras su disposición y presencia frente a un evento contaminante.

El ciclo biogeoquímico de los elementos traza tiene riesgos ecológicos en los sistemas vivos, cuando un elemento traza se concentra en la materia orgánica generando complejos o se acumula dentro de los tejidos en un organismo se limita a expandir su ruta dentro de la cadena trófica en donde interactúe dicho organismo, este fenómeno se conoce como biomagnificación (Figura 3).

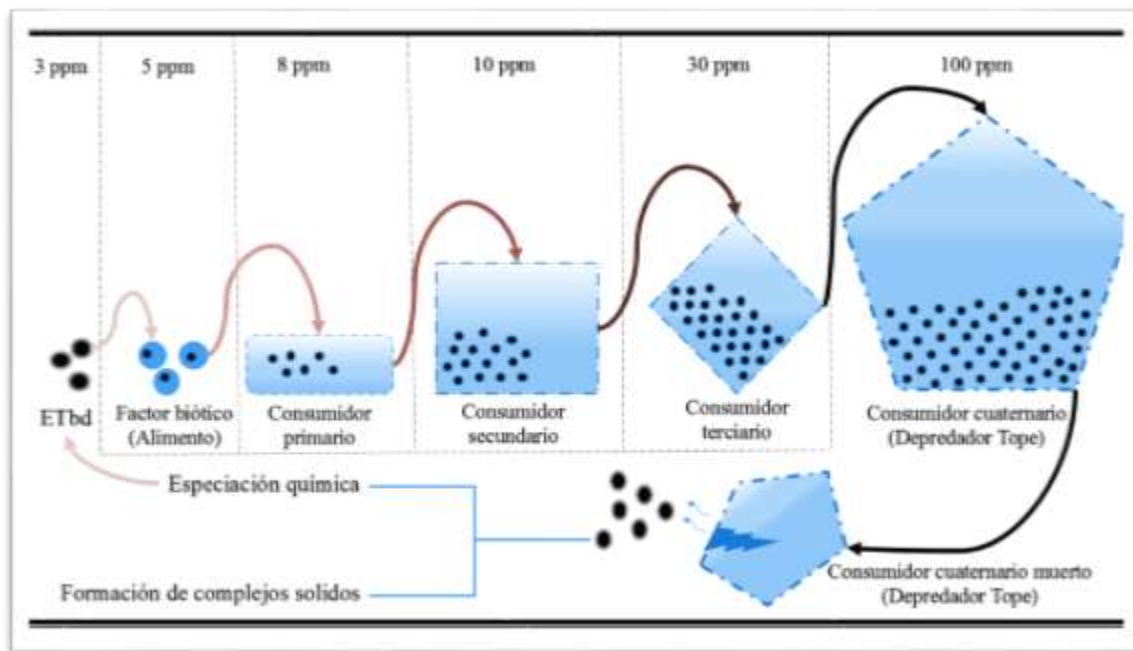


FIGURA 3: Esquema de la ruta de los elementos traza biodisponibles (*ETbd*) dentro de la cadena trófica, el modelo representa el efecto bioacumulador dentro de los consumidores, los *ETbd* pueden acumularse en bajas concentraciones en los factores bióticos disponibles como alimento, que aumentan la concentración [ppm] en relación con el tamaño de la comunidad donde participan distintos niveles de consumidores en la cadena trófica (Biomagnificación).

Algunos pelecípodos como *Corbicula fluminea* han desarrollado mecanismos de defensa contra algunos depredadores, se ha reportado un comportamiento dominante del pelecípodo al inducir un exceso de biomasa en época reproductiva que pueda ser aprovechado por los depredadores con la finalidad de atrofiar su ingesta, reduciendo el

riesgo de depredación y así poder expandir su distribución en los sistemas que habita (Sickel, 1998). Este tipo de comportamiento puede traer repercusiones atribuidas a la contaminación por elementos traza, magnificando la ruta los metales dentro de la cadena trófica. (Cohen et al., 1984; Phelps 1994)

1.4. Pelecípodos; bioindicadores y bioremediadores de elementos traza

Los organismos bentónicos como los moluscos de la clase pelecípoda son objeto de estudio en el análisis de contaminantes en sistemas acuáticos, debido a su forma de vida sésil y sus hábitos filtradores ya que retienen en sus tejidos concentraciones de contaminantes superiores a las del ambiente (Gundacker, 1994; Conti y Cecchetti, 2003). Debido a su carácter acumulador, los pelecípodos se han implementado en investigaciones exhaustivas de los sistemas dulceacuícolas como bioindicadores para monitorear los niveles de contaminación de elementos traza o como bioremediadores filtrando los niveles de estos. En las últimas décadas se han utilizado diversas especies como *Anodonta spp.*, *Dreissena polymorpha*, *Elliptio complanata*, *Polymesoda Caroliniana* y *Corbicula fluminea* (Manly y George, 1977; Kraak et al, 1991).

1.5. *Corbicula fluminea* (Muller, 1774)

Las características taxonómicas (Anexo 1) y diacríticas externas que definen a *C. fluminea* son: curvas de crecimiento de tipo redondas, una escultura definida del auge en las curvas de crecimiento ubicada en el umbo con carácter sencillo de crestas concéntricas de un solo lazo, internamente la valva presenta una coloración violeta, aledaño al ligamento del umbo en el margen lateral y pseudocardinal de ambas valvas se presentan 3 dientes y en comparación de otras especies de la familia cyrenidae el seno paleal de *C. fluminea* es reducido (De la Hoz, 2008; Thorp y Covich, 2009).

La temporada reproductiva de *C. fluminea* se extiende desde verano hasta finales de otoño, son hermafroditas sincronos, presentan fecundación interna y reproducción ovovivípara con cuidados parentales (Figura 4), después de la fecundación, tras la formación del cigoto, los huevos se incuban sobre las branquias, después de 14 hrs los huevos eclosionan en forma de larvas de tipo trocófora y en 4-5 días se liberan las larvas en etapa pediveliger,

cuando los individuos alcanzan entre 1.0 y 1.5 mm de longitud la concha, son capaces de fijarse a diversos sustratos con hilos basales (Hall, 1984; King et al., 1986).

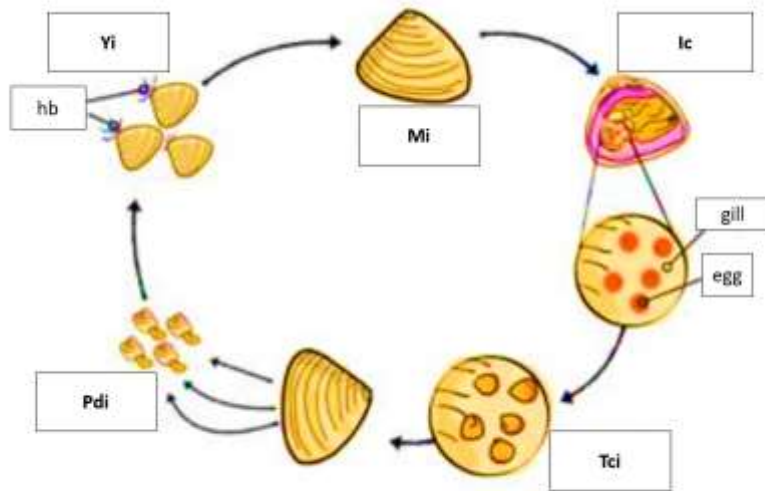


FIGURA 4. Ciclo de vida de *C. fluminea*, **Mi**: individuo maduro, **Yi**: individuo joven, **Ic**: incubación, **Tci**: individuos en fase larvaria de tipo trocófora, **Pdi**: individuos en fase larvaria pediveliger, **hb**: hilos basales.

Existen dos mecanismos de alimentación para *C. fluminea*: al igual que la mayoría de los pelecípodos dulceacuícolas, la filtración permite la captura de alimento suspendido en la columna de agua o en el sedimento, sin embargo, cuando las tallas de *C. fluminea* se encuentran por debajo de 5 mm, la captura de alimento se da por un fenómeno conocido como “*deposit feeding*” o “*pedal-feeding*” el cual consiste en capturar partículas orgánicas por medio del pie para introducirlo hacia dentro de las valvas, este fenómeno ocurre frecuentemente en organismos juveniles y en larvas tipo pediveliger, en organismos superiores a 5mm existe la combinación de ambos mecanismos de captura de alimento (Morton, 1973; Way et al., 1990).

Antiguamente, la distribución de *C. fluminea* se limitaba al continente asiático, actualmente, gracias a su alta tolerancia a diversas condiciones ambientales se distribuye en casi todo el mundo y es considerada una especie invasora (Ilarri y Sousa, 2014; Naranjo-García, 2014). *C. fluminea* habita sistemas loticos y lenticos, debido a su tipo de vida sésil, se caracteriza por depositarse en fondos arenosos o fangosos, se ha reportado que se

encuentran con mayor frecuencia en sedimentos con un tamaño de partícula mediano (entre 1mm y 5mm), los organismos juveniles (1.0-1.5 cm) suelen depositarse entre raíces de plantas acuáticas o fijados a rocas por hilos basales. Prefieren aguas con poca turbidez, elevado oxígeno disuelto y pHs neutros (6.5 y 8) soportan temperaturas por encima de 5°C y por debajo de 30°C.

1.6. Importancia ecológica de *Corbicula fluminea*

La almeja asiática *C. fluminea* es considerada una de las especies invasivas más peligrosas a nivel mundial en las últimas décadas pues se ha distribuido eficazmente a lo largo del planeta. *C. fluminea* se registró por primera vez en las costas del pacifico en América del norte en 1920 debido a la migración masiva de hombres orientales que utilizaban esta especie como un recurso alimenticio, 60 años más tarde, la distribución de *C. fluminea* se extendió a lo largo de Norteamérica en distintos ecosistemas dulceacuícolas (Counts, 1986).

Debido a su eficacia reproductiva y a su distribución extendida a nivel mundial, *C. fluminea* ha generado gran impacto ecológico tanto positivo como negativo en sistemas dulceacuícolas y someros, al igual que muchos bivalvos, este pelecípodo es participe del flujo de energía dentro de la cadena trófica y ha sido utilizado como un recurso alimenticio para diversas especies de aves y peces (Covich et al, 1981; Smith et al, 1986; Robinson y Wellborn, 1988).

En algunos países de Asia *C. fluminea* también es aprovechado como recurso alimenticio por el hombre, principalmente, en zonas rurales. No obstante, el consumo de este pelecípodo los ha representado un riesgo para la salud ya que ha provisto al hombre de numerosas infecciones pues algunos enteroparasitos han sido ingeridos en conjunto con la ingesta de *C. fluminea*; *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia* y algunos oligoquetos son especies que se hospedan en la cavidad del manto del pelecípodo y debido a esto *C. fluminea* también ha sido implementado como un bioindicador de parasitos dulceacuícolas (Anderson y Holm, 1987; Graczyk et al, 2003; Miller et al, 2005).

1.6. ¿Puede considerarse a *Corbicula fluminea* un bioindicador de elementos traza?

Los niveles de elementos traza presentes en tejidos de bivalvos refleja la concentración de estos en los ambientes que habitan, lo cual sirve para estimar la calidad del agua (Kraak et al., 1991). La proporción en la que los elementos traza están presentes en el tejido de un bivalvo, con respecto al ambiente depende de las respuestas fisiológicas de los organismos, y pueden variar por procesos fisiológicos, por ejemplo, la temporada reproductiva o la talla de los pelecípodos (Dare y Edwards, 1975).

El tamaño corporal es un factor que determina la capacidad bioacumulativa de los elementos traza en pelecípodos, si bien, las concentraciones de elementos traza dependen de diferentes rangos de talla o biomasa debido a la demanda fisiológica particular de cada organismo (Phillips y Rainbow, 1993), para interpretar la actividad acumulativa de los organismos, se relaciona la talla o la biomasa con el contenido de elementos traza, la relación puede ser negativa o positiva y es representada por una correlación: líneal, exponencial, cuadrática, etc (Yap et al., 2010).

Las respuestas fisiológicas de *C. fluminea* y su tolerancia a los ambientes contaminados a nivel global ha ayudado en el análisis de elementos traza en ambientes dulceacuícolas, al tener un hábitat óptimo con textura arenosa en el bentos de sistemas loticos y lenticos, este bivalvo es participe del ciclo geoquímico de los elementos traza (Neck, 1986). Desde un punto de vista ecotoxicológico, *C. fluminea* por sus características fisiológicas ha sido implementado en esta área de investigación para el análisis de la calidad de los ambientes, algunos atributos que puede considerar a este organismo un buen bioindicador de contaminantes son:

- Componer la mayor parte de la fauna bentónica en sistemas loticos y lenticos (Naranjo-García, 2010).
- Puede encontrarse en ambientes prístinos y contaminados (Ilarri y Sousa, 2014).
- Presenta una dinámica invasiva muy fuerte en sistemas loticos y lenticos donde incrementa su abundancia (Sousa et al., 2008).

- El bivalvo es de fácil estudio tanto en condiciones de laboratorio y en campo (Graczyk et al., 2003).

A diferencia de otros pelecípodos, *C. fluminea* puede asimilar los elementos traza de tres maneras, (1) por captura de alimento, ya sea por filtración de materia en la columna de agua o “deposit feeding”: captación de material del sedimento, (2) por medio del intercambio gaseoso con el medio y (3) por contacto directo con el material particulado en el flujo de agua. Así mismo, *C. fluminea* al igual que otros organismos sésiles ha funcionado como un indicador de elementos traza en los sistemas dulceacuícolas desde una perspectiva espacial y temporal (Uno et al, 2001).

1.7. Distribución de *Corbicula fluminea* y su relación con los elementos traza

La distribución de *C. fluminea* en los últimos años está asociada a las actividades antropogénicas (como recurso alimenticio, uso como carnada para pesca, exhibición o uso ornamental en acuarios o transportados por los botes donde se depositan con sus hilos basales), además, su dispersión natural es eficaz debido a que en etapas larvianas pediveliger y juvenil se transportan gracias a las corrientes acuáticas de los ríos o se anclan a las plumas, escamas o articulaciones de diferentes aves, peces o anfibios (McMahon, 2000). Se sabe que las características fisiológicas de *C. fluminea* han permitido extender la distribución de este organismo, ya que es capaz de resistir gradientes de contaminación amplios en los ambientes que habita pues la demanda de nutrientes y elementos esenciales para su organismo difiere con la edad y por ende del tamaño del bivalvo (Crooks, 2002; Sousa et al, 2008).

En el Delta del río, Panamá, se han registrado densidades de 10,000 individuos por m² en lugares con contaminación cerca de zonas urbanas y centros industriales, donde los sistemas presentan niveles elevados de Cu, Pb, Cd y Zn (Cataldo et al, 2001). En 2002 se midió concentración de Ar, Se, Cd, y Hg en tejidos de individuos de *C. fluminea* colocados a lo largo de un sistema lotico: Savannah river, aldeaño a una planta eléctrica que funciona por combustión de carbono, los niveles más altos de elementos traza fueron registrados en los individuos cercanos a la industria eléctrica, los cuales además de presentar las

concentraciones más elevadas de elementos traza (superior a 100 µg/g), incrementaron su talla, así mismo, se concluyó que la exposición a elementos traza puede promover el aumento del tamaño corporal de *C. fluminea* (Peltier et al, 2009).

La resistencia fisiológica de *C. fluminea* ante la exposición de elementos traza han favorecido su persistencia, distribución y dispersión de los sistemas dulceacuícolas del continente americano, por ejemplo, en un estuario del Río La Plata, Argentina, aledaño a una zona industrial, se analizaron los niveles de Cu, Cr, Mn, Zn, Ni y Cd en sedimento superficial, en material particulado suspendido en la columna de agua y en tejidos de *C. fluminea*, las concentraciones de Cu (28-89 µg/g) Cr (1.3-11 µg/g) Mn (15-85 µg/g) Zn (118-316 µg/g) Ni (1.3-6.4 µg/g) y Cd (0.5-1.9 µg/g) en *C. fluminea* variaron por factores relacionados con el tamaño de los bivalvos, así mismo, los niveles de Cu y Zn fueron superiores en los tejidos del pelecípodo que en el material particulado suspendido indicando un factor de biocumulación (BAF) positivo (2.1 ± 3.1 para Cu; 4.6 ± 1.7 para Zn), los autores concluyen que este resultado de BAF por Cu y Zn se debe a que son elementos indispensable para el requerimiento fisiológico de los pelecípodos (Bilos et al, 1998). Un estudio encontró resultados similares en Old River de la Península Liberiana (Bonnail et al, 2016), donde analizaron la concentración de elementos traza en sedimento fluvial a lo largo de 3 gradientes del río exponiendo a *C. fluminea* en cada estación, los resultados mostraron un comportamiento positivo en el factor de bioacumulación en correlación con el tiempo de exposición (21 días) para Cu y Pb en la zona más contaminada del río ($r^2=0.585$ BAF=5.84 para Cu; $r^2=0.633$ BAF=2.37 para Pb), los autores concluyen que *C. fluminea* responde de manera sensitiva a estos elementos para acumularlos fácilmente en zonas con altos gradientes de contaminación.

En un estuario de Coatzacoalcos, Veracruz, México, se determinó la concentración de Pb, Cd, Cu y Zn en dos especies del género *Corbicula* en relación con la fracción biodisponible del sedimento durante tres temporadas (secas, lluvias y vientos), los niveles de metales acumulados en los bivalvos fueron superiores que los niveles biodisponibles en el sedimento (BAF>1) en todos los casos (Ruelas-Inzunza, 2009). En el valle agrícola de Mexicali se midió la concentración de Zn, Cu, Mn, Cd, Cr y Ag en *C. fluminea* para comparar

las biodisponibilidad de los elementos traza geográfica y temporalmente, en agosto de 1985, la concentración de elementos traza siguió el siguiente orden Zn >Mn >Cu y en febrero de 1986: Zn >Mn >Cu >Cr y Ag, las concentraciones de elementos traza detectados en los tejidos de *C. fluminea* fueron superiores a 34 µg/g mientras que el Cd resulto indetectable en ambas temporadas, los autores concluyen que existe un requerimiento fisiológico de elementos traza esenciales sin importar la temporada mientras el metal se encuentre biodisponible (Gutierrez-Galindo et al., 1990).

Se ha demostrado bajo condiciones de laboratorio que el Selenio (Se), un elemento esencial para el metabolismo y tóxico a elevadas concentraciones en un alga dulceacuícola: *Chlamydomonas reinhartii*, se encontró posteriormente acumulado en *C. fluminea* tras ingerir a *C. reinhartii*, la concentración de Se absorbida por el alga fue equivalente a los niveles encontrados en el bivalvo (2,000 µg/L) a pesar de la especiación química del Se (selenita, selenato y selenometionina) al ser tomada por *C. reinhartii* (Fournier et al, 2006). Esto puede representar riesgos a nivel ecológico pues al participar como consumidor primario dentro de la cadena trófica, *C. fluminea* acumula elementos traza en sus tejidos, mismos que serán ingeridos por los niveles superiores de la cadena trófica que lo consumen (Achard et al, 2004).

En las últimas décadas se ha obtenido información de la distribución de *C. fluminea* dentro de la República mexicana, se han colectado varios ejemplares en el acervo de la Colección Nacional de Moluscos (CNM) registrados en el río Huaynamota de Nayarit, en el río Cuitzmala, río Ameca, Ayuquila y lago de Chapal en Jalisco, en el río Cuchujachi de Sonora, la cañada Cuicatlán en Oaxaca, en Huapoca, Chihuahua, río Juchipila de Zacatecas, río Axtla de San Luis potosí, río El tunal, río Mezquital y río Durango, Durango, río Lacantún, Chiapas, río Coatzacoalcos y en el Nacimiento del río Atoyac, perteneciente al sistema fluvial Jamapa-Atoyac, Veracruz (Naranjo-García, 2014).

1.8. Sistema fluvial Jamapa-Atoyac: Fuente puntual de elementos traza

La cuenca del río Jamapa ubicada entre los 18°45' y 19°14' latitud norte y entre 95°56' y 97°17' longitud oeste se encuentra formada por dos corrientes muy importantes que en su

confluencia se conocen como el río Jamapa y Cotaxtla, que en conjunto con el río Atoyac que afluye por el margen izquierdo antes del poblado de Boca del Río forman el sistema fluvial Jamapa-Atoyac (SFJA) (Pereyra, 2012).

El SFJA se localiza al sur del Golfo de México, la cuenca Jamapa se origina desde el pico de Orizaba y el río Atoyac tiene su origen al norte de la ciudad de Córdoba, Ver., en el cerro de Loma Grande, ambos en confluencia desembocan a la altura de Boca de Río, Ver., el SFJA tiene una extensión de 3900km² en la parte central de Veracruz, el río pertenece a la región hidrológica del Papaloapan no. 28, se caracteriza por tener una vegetación de selva caducifolia en la parte baja de la cuenca y bosque templado en la zona alta, la cual ha sido perturbada para la implementación de campos agrícolas, mismos que son hidratados por el agua del cauce (Pereyra et al., 2010). Anualmente el SFJA tiene 570 km³ de carga residual tratada y no tratada que acarrearán sólidos y material particulado que llevan consigo metales pesados a lo largo del río, lo que ha causado que diversos autores cataloguen al SFJA como una fuente puntual de elementos traza que enriquece los niveles de metales a las costas de Veracruz, generando problemas ambientales en los ecosistemas acuáticos y marinos (Morlán-Cahue y Opengo-Piña, 2005; Horta-Puga et al, 2016). Sin embargo no hay estudios recientes que justifiquen la biodisponibilidad de elementos traza en el SFJA y de organismos bioacumuladores de metales que habitan este sistema.

1.9. Justificación

Debido a que *C. fluminea* tiene una distribución extendida tanto a nivel global como en México y a su tolerancia a altas concentraciones de metales pesados, ya que suele acumular gran cantidad de elementos traza en relación con su tamaño y que la biodisponibilidad de metales se desconoce en el SFJA, el propósito de este trabajo es analizar la concentración de metales pesados acumulados en tejidos de *C. fluminea* en relación a su tamaño y a los niveles de metales biodisponibles en sedimento superficial del SFJA.

1.10. Pregunta de Investigación

¿Existe una relación entre la concentración de Cu y Pb en tejidos de *C. fluminea* respecto a su tamaño corporal?

1.11. Hipótesis

La almeja asiática *Corbicula fluminea* actúa como un bioacumulador de Cu y Pb en el sistema fluvial Jamapa-Atoyac.

1.12. Objetivos

- General:

Determinar si existe una relación significativa entre la biomasa de *C. fluminea* y la concentración de Pb y Cu en sus tejidos.

- Particulares

Determinar la concentración de Cu y Pb en los tejidos de *C. fluminea* y su relación con los niveles biodisponibles de Cu y Pb en sedimento superficial del SFJA.

Analizar la relación entre el factor de bioacumulación y la talla de *C. fluminea*

Comparar los niveles de Cu y Pb en tejido de *C. fluminea* entre los individuos de diferente tamaño y por estaciones.

2. Material y método

2.1. Fase de Campo: Área de estudio, Sistema fluvial Jamapa-Atoyac.

La selección de los puntos de muestreo en el SFJA (figura 6) se realizó recorriendo los puntos previamente seleccionados por el proyecto PAPIIT IN114616 “Fuentes puntuales y no puntuales de metales pesados en la zona costera y en el sistema arrecifal frente al puerto de Veracruz, Sur del Golfo de México” en las estaciones donde abundaba *Corbicula fluminea*, en dos temporadas, secas (Febrero-Marzo) y lluvias (Septiembre-October) del año 2016.

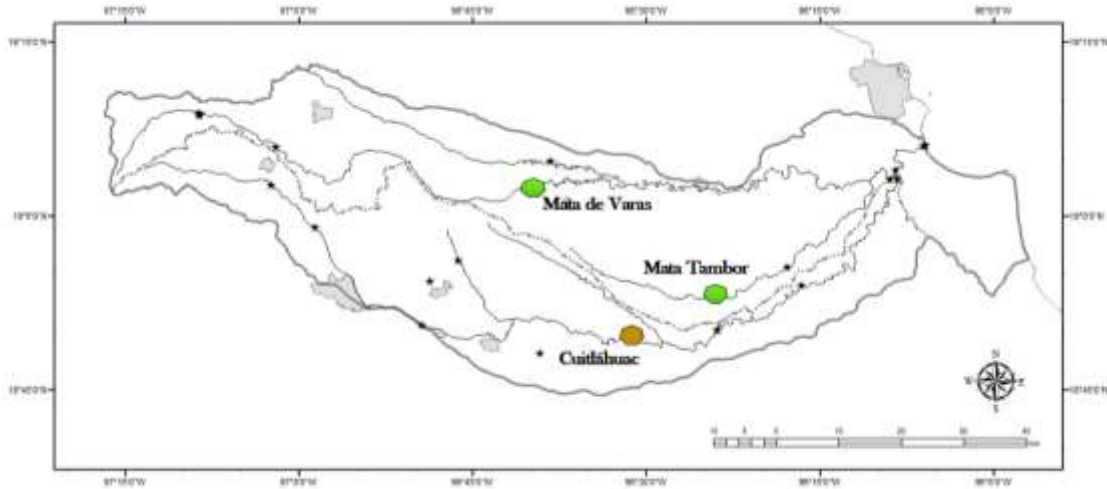


FIGURA 5: Mapa del SFJA con las estaciones de muestreo señaladas, Cuitláhuac: región perteneciente a la cuenca Atoyac y Mata Tambor: región perteneciente a la cuenca Jamapa.

En cada punto de muestreo (Tabla 2) se colectaron los bivalvos de manera manual que se encontraban enterradas en el sedimento superficial del cual se recolectó aproximadamente 500 g colocándose en bolsas de plástico previamente etiquetadas, todo el material se mantuvo congelado hasta su análisis en laboratorio.

TABLA 2: Estaciones de muestreo con sus respectivas coordenadas donde abundaba *Corbicula fluminea* en distintas temporadas.

Estación	Cuenca	Latitud	Longitud	Temporada	No. De bivalvos colectados
Cuitláhuac	Atoyac	18°48'12.26" N	96°39'14.87" W	Secas	10
Mata Tambor	Jamapa	18°52'44.98" N	96°23'57.83" W	Lluvias	10
Mata de Varas	Jamapa	19°02'30.84" N	96°39'48.59" W	Lluvias	3

2.2. Fase de laboratorio

Todo el material de vidrio y plástico utilizado se lavó previamente con agua y jabón, se descontaminó con HCl/HNO₃ al 10% y se enjuagó con agua deionizada (DI) antes de su uso para evitar contaminación externa de elementos traza siguiendo las indicaciones de Mester y Sturgeon (2003).

2.2.1. Procesamiento y extracción de elementos traza en tejidos de *Corbicula fluminea*.

Los pelecípodos colectados se identificaron siguiendo las claves de Britton y Morton (1982) y De la Hoz (2008).

Los organismos colectados se descongelaron a temperatura ambiente y se enjuagaron con DI para remover partículas de sedimento y evitar contaminación en el análisis de elementos traza, posteriormente se removió el tejido de las conchas utilizando una espátula de plástico. De cada una de las conchas se tomaron las siguientes medidas: dorsoventral, anteroposterior y lateral (véase Anexo 2). Se obtuvo el peso húmedo del tejido de cada individuo utilizando una balanza analítica, para su secado, cada muestra de tejido se introdujo en un horno de muffle el tiempo necesario hasta obtener un peso constante. Una vez seco el material tisular, cada muestra se homogenizó en un mortero de porcelana previamente lavado con HNO₃ al 10% hasta obtener un polvo fino de cada muestra. Cada muestra seca de material tisular fue pesada y se depositó en vasos de teflón para su digestión, la cual consistió en dos pasos: (1) digestión abierta, a cada vaso de teflón se le agregaron 3 mL de DI y 5 mL de HNO₃ concentrado durante 24 horas a temperatura ambiente en una campana de flujo laminar. (2) digestión cerrada, a cada vaso con la muestra pre-digerida se le agregaron 2 mL de H₂O₂ al 30% y se colocaron en un horno de microondas CEM modelo *MDS 2100* a una temperatura de 150°C y una rampa de presión de 10 minutos para alcanzar 80 Psi, posteriormente las condiciones de presión y temperatura se mantuvieron por 10 minutos más. Una vez finalizada la digestión, cada muestra se llevó a un volumen final de 25 ml con HNO₃ al 2%.

2.2.2. Procesamiento y extracción de elementos traza biodisponibles en sedimento superficial.

Las muestras de sedimento superficial se descongelaron a temperatura ambiente y se homogenizaron 10 g de cada una, posteriormente, para la eliminación de sales, a cada muestra se le agregaron 15 ml de DI y fue agitada durante 15 minutos a 140 rpm en un agitador orbital modelo "Orbit Shaker". Posteriormente las muestras fueron centrifugadas por 45 minutos a 10,000 rpm en una centrifuga modelo *Avanti™J25*, el sobrenadante fue

desechado al final del proceso, al final se repitió todo el proceso de lavado para asegurar la eliminación de sales. Posteriormente las muestras se secaron a 60°C por 48 hrs hasta eliminar cualquier rastro de humedad.

Para la extracción de elementos traza en la fracción biodisponible de los sedimentos, se colocaron 3 g de cada muestra de sedimento en tubos de polietileno, se les agregó 30 ml de HNO₃, 1M, se agitaron a 120 rpm durante dos horas, posteriormente se filtraron con ayuda de embudos de plástico y papel Whatman 42 hasta que el filtrado era totalmente transparente y sin partículas. Por último, todas las muestras se llevaron a un peso final de 25 g con HNO₃ al 2%.

Se determinó la granulometría de cada muestra de sedimento utilizando el método de Bouyoucus, el cual se basa en la velocidad de sedimentación de partículas para la clasificación de su tamaño utilizando el principio de la ley de Stocks: mezclando durante 10 minutos 50g de sedimento libre de materia orgánica y carbonatos con 10 ml de Calgón aforado a un determinado volumen previamente a su colocación en una probeta con un volumen final de 1L, la cual se agito durante 1 minuto y se dejó reposar durante 40 segundos para tomar la primera lectura de temperatura y sedimentación con ayuda de un hidrómetro, una segunda lectura de los mismos parámetros fue tomada posteriormente tras haber transcurrido dos horas de reposo. De acuerdo a los valores registrados de temperatura, se agregó 0.2 a las lecturas del hidrómetro por cada grado centígrado que pase 25°C o se restó en caso contrario.

Para el cálculo de porcentaje de limos (L), arenas (A) y arcillas (R) se utilizaron las siguientes formulas:

$$\%L + \%R = \frac{\text{primer lectura}}{\text{g de sedimento}} \times 100$$

$$\%A = 100 - (\%L + \%R)$$

$$\%R = \frac{\text{segunda lectura}}{\text{g de sedimento}} \times 100$$

$$\%L = (\%L + \%R) - \%R$$

El pH de los sedimentos fue determinado con ayuda de un potenciómetro utilizando un buffer de referencia de pH 7.0, el porcentaje de materia orgánica (MO) fue calculado por el método de Walkley y Black (1947) oxidando la MO por medio del calor utilizando 0.2 g de sedimento en un matraz Erlenmeyer con 5 mL de solución de dicromato de sodio, posteriormente se agregaron 10 mL de H₂SO₄ generando una reacción exotérmica, se agito durante un minuto y se dejó reposar 30 minutos, se agregó 100 mL de agua destilada, 5 mL de H₃PO₄ y 3 gotas de indicador de difenilamina para titular con FeSO₄ hasta obtener una coloración verde esmeralda, un blanco se realizó para verificar la normalidad del FeSO₄.

El porcentaje de MO se calculó de la siguiente manera:

$$MO(\%) = \frac{5 - (mL \text{ de } FeSO_4 * N * FC)}{g \text{ de sedimento}} * 0.69$$

Donde **N**=normalidad del FeSO₄, **5**= mL de dicromato de potasio, **FC**= factor de corrección y **0.69**= constante

El factor de corrección se calculó de la siguiente manera:

$$FC = \frac{10}{mL \text{ de } FeSO_4 \text{ gastados en el blanco}}$$

Para evaluar el porcentaje de la materia orgánica (Tabla 3) se emplearon los criterios de valoración de Aguilera (1989) y modificado por Muñoz et al (2001).

TABLA 3: Criterios de valoración de MO (tomados de Aguilera, 1989)

Categoría	Valor (%)
Extremadamente pobre	< 0.6
Pobre	0.6-1.2
Moderadamente pobre	1.3-1.8
Medio	1.9-2.4
Moderadamente rico	2.5-5.0

Rico	5.1-10.0
Extremadamente rico	>10.0

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se calculó por el método de Schollenberger y Simon (1945) desplazando los cationes conocidos en el sedimento por acción de masas con cationes de mayor carga filtrando 5 g de sedimento con 10 mL de cloruro de calcio (5 veces) y 10 mL de alcohol etílico (5 veces) retirando el filtrado en ambos casos, posteriormente se filtró con 10 mL de cloruro de sodio (5 veces) guardando el filtrado y aforándolo a 50 mL de la misma solución (NaCl) agregando 10 mL de solución buffer pH 10, 5 gotas de solución de cianuro de potasio, 5 gotas de solución de clorhidrato de hidroxalamina y 5 gotas de solución indicadora de negro de ericromo T para titular con versenato (EDTA) hasta virar de color púrpura a azul. Para verificar la normalidad del EDTA y el factor de corrección del EDTA se prepararon 2 blancos.

La CIC se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$CIC(\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}) = \frac{\text{mL de EDTA} * N * FC}{\text{g de sedimento}} * 100$$

Donde **N**= normalidad de EDTA y **FC**= factor de corrección del EDTA, para calcular el Factor de corrección se utilizó la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{10}{\text{Gasto promedio de EDTA en los blancos}}$$

Donde **10**= mL de cloruro de calcio 0.02 N.

Para valorar la evaluación de CIC (Tabla 4) se tomaron en cuenta los criterios propuesto por Muñoz et al. (2001)

TABLA 4: Criterios de valoración para evaluar la capacidad de intercambio catiónico.

Categoría	Valor (cmol(+))kg ⁻¹
Muy bajo	<10
Bajo	11-20
Medio	21-35
Alto	35-60
Muy Alto	>60

2.2.3. Determinación de elementos traza: Pb y Cu

Se determinó la concentración Pb y Cu de las muestras procesadas de tejido y sedimento en un espectrofotómetro de absorción atómica modelo *Varian SpectrAA* por atomización electrotérmica con un coeficiente de variación de 4.4% para Cu y 4.3% para Pb, el límite de cuantificación fue de 10 ng/g para ambos elementos, para estimar la exactitud del análisis se utilizó un material de referencia (NCR, MESS-2), los porcentajes de recuperación fueron de 96.7% para Cu y 97.6% para Pb.

Se realizó una prueba de t de student con el propósito de identificar estadísticamente si existen diferencias significativas con los límites permisibles de Cu y Pb con una $t_{crit(95\%)}$ utilizando la siguiente formula:

$$T_{exp} = \frac{X - \mu}{\sqrt{\frac{n}{SD}}}$$

Donde X = promedio de la concentración acumulada en tejido de *C. fluminea*, μ = limite permisible, n = número de individuos de una población y SD = desviación estándar, considerando que si $T_{exp} < T_{crit(95\%)}$ los niveles de Cu y Pb [$\mu\text{g/g}$] son superiores a los límites permisibles.

2.2.4. Factor de bioacumulación.

Para estimar la proporción que existe entre los elementos biodisponibles en el sedimento y los presentes en el tejido de *C. fluminea*, se calculó el factor de bioacumulación (BAF) propuesto por Mackay et al. (2000) en cada individuo dividiendo la concentración de elementos traza en tejido blando de *C. fluminea* entre la concentración de elementos traza biodisponibles en sedimento:

$$BAF = \frac{\text{elementos traza en tejidos } (\mu\text{g/g})}{\text{elementos traza biodisponibles en sedimento } (\mu\text{g/g})}$$

Para determinar la relación que existe entre la talla de los individuos de *C. fluminea* y la cantidad de elementos traza que acumulan en sus tejidos, el BAF de cada individuo y su talla fueron ajustados en una serie de modelos de regresión lineal y potencial. De igual modo se

realizó una prueba *de t* para verificar si existen diferencias significativas entre las poblaciones de *C. fluminea* analizadas en cuanto a los niveles de Cu y Pb acumulados en tejido, en biomasa y en BAF.

3. Resultados

3.1. Contenido Biodisponible de elementos trazas: Características fisicoquímicas del sedimento.

3.1.1. Contenido de Cu biodisponible.

La concentración de Cu biodisponible en sedimento fue de 2.91 $\mu\text{g/g}$ y 0.55 $\mu\text{g/g}$ para Mata de varas (MV) y Mata Tambor (MT) respectivamente. En la estación de Cuitláhuac (CT) se registraron los niveles más bajos de Cu biodisponible con un valor de 0.04 $\mu\text{g/g}$ (Tabla 5).

3.1.2. Contenido de Pb biodisponible

La concentración más alta de Pb biodisponible detectado en el sedimento de las tres estaciones muestreadas fue en CT con un valor de 1.64 $\mu\text{g/g}$. La concentración de Pb biodisponible en sedimento de MV y MT fue de 0.72 $\mu\text{g/g}$ y 0.27 $\mu\text{g/g}$ respectivamente (Tabla 5).

3.1.3. Características fisicoquímicas del sedimento

La granulometría de los sedimentos recolectados fue similar en ambas estaciones de muestreo de la temporada de lluvias (MT y MV), con un porcentaje de arenas superior al 85% (MT: 85% y MV: 95%) y de lodos (% de limos + arcillas) inferior al 10% (MT: 9%-L, 6%-R y MV: 3%-L, 3%-R). La clase textural es arenosa y franca-arenosa para MV y MT respectivamente. El pH fue de 7.33 para MV y 7.41 para MT. El porcentaje de materia orgánica fue moderadamente pobre en ambas estaciones con un valor superior al 0.6% (MT: 0.87% y MV: 0.69%). La capacidad de intercambio catiónico fue considerada baja con valores inferiores a 15 cmol (+)/ kg^{-1} (Tabla 5).

En la estación de Cuitláhuac la clase textural fue catalogada como arcillosa con un porcentaje de arcillas (42%) superior al porcentaje de arenas (30%), un pH de 6.8, un

porcentaje de materia orgánica catalogado extremadamente pobre (0.19%) y una capacidad de intercambio catiónico medio (28.08 cmol(+)/kg⁻¹; Tabla 5).

TABLA 5: Concentración (µg/g) de Cu y Pb biodisponibles y características fisicoquímicas del sedimento superficial del SFJA.

Temporada	Estación	A	L	R	Clase T	MO	pH	CICT	Cu	Pb
Secas	Cuitláhuac	30	28	42	Arcilla	0.19	6.83	28.08	0.04	1.64
Lluvias	Mata de Varas	95	3	2	Arena	0.69	7.33	11.84	2.91	0.72
Lluvias	Mata Tambor	85	9	6	Arena francosa	0.87	7.41	13	0.55	0.27

A: %arenas **L:** %limos **R:** %arcillas **Clase T:** clase textural **MO:** % materia orgánica **CICT:** capacidad de intercambio catiónico (cmol (+)/kg⁻¹).

3.2. Contenido de elementos traza en *Corbicula fluminea*: Factor de bioacumulación.

3.2.1. Contenido de Cu

La concentración promedio de Cu detectado en tejido de *C. fluminea* en MT fue de 34.35 ± 25.22 µg/g en individuos con un rango de tamaño (Anteroposterior) de entre 1.76 cm y 3.26 cm, la concentración detectada más alta fue de 89.01 µg/g y la más baja fue de 11.86 µg/g (Tabla6). Por otro lado, en MV, la concentración de Cu detectado fue de 22.26 µg/g en un solo individuo de los 3 organismos colectados, en el caso de los otros dos, el contenido fue indetectable (Tabla 6).

La concentración promedio de Cu detectado en los organismos de CT fue de 34 ± 9.82 µg/g en individuos con un rango de tamaño (Anteroposterior) entre 2.4 cm y 3.25 cm, la concentración más alta detectada de Cu fue de 44.92 µg/g y la más baja fue de 19.19 µg/g (Tabla 6).

3.2.2. Contenido de Pb

El contenido de Pb en los tejidos de *C. fluminea* fue indetectable en todos los organismos, estaciones y temporadas de muestreo.

TABLA 6: Características alométricas y concentración ($\mu\text{g/g}$ peso seco) de los individuos de *C. fluminea* del SFJA,

ESTACIÓN	ID	AP (cm)	LT (cm)	DV (cm)	Peso Concha	Peso bivalvo g	Peso húmedo g	Peso seco g	Cu $\mu\text{g/g}$	BAF
MATA TAMBOR	MT1	3.26	1.59	2.89	3.6616	4.231	0.5937	0.0632	68.93	125.32
	MT2	2.48	1.44	2.2	2.6432	3.267	0.596	0.0826	89.01	161.83
	MT3	2.16	1.32	1.9	2.4617	2.95	0.5137	0.0672	14.07	25.58
	MT4	2.17	1.36	1.92	2.1608	2.5524	0.447	0.0539	36.65	66.63
	MT5	2.07	1.24	1.77	1.844	2.2145	0.394	0.0443	27.03	49.14
	MT6	1.98	1.26	1.81	1.7903	2.0769	0.3283	0.0411	26.98	49.04
	MT7	1.9	1.21	1.6	1.7285	2.009	0.3218	0.0306	14.88	27.04
	MT8	1.88	1.16	1.7	1.5464	1.8508	0.3284	0.0373	23.46	42.65
	MT9	1.78	1.08	1.51	1.1892	1.426	0.2971	0.0288	30.67	55.77
	MT10	1.76	1.05	1.52	1.2552	1.4848	0.2858	0.0312	11.86	21.55
PROM\pmSD								0.048 \pm 0.018	34.35 \pm 25.22	62.46 \pm 45.85
MATA DE VARAS	MV1	0.95	0.59	0.82	0.1472	0.1932	0.0606	0.0045	22.26	7.64
	MV2	0.96	0.62	0.84	0.2007	0.2173	0.0295	0.0027	ND	--
	MV3	1.17	0.75	1.01	0.3031	0.3787	0.1046	0.0093	ND	--
PROM\pmSD								0.0055 \pm 0.003	--	--
CUITLÁHUAC	CT1	2.62	1.73	2.5	4.249	5.5974	1.1116	0.1337	ND	--
	CT2	2.93	1.57	2.65	4.2073	6.5111	1.339	0.1538	43.60	1089.99
	CT3	2.4	1.53	2.29	2.542	3.5248	0.8813	0.1202	43.12	1078.02
	CT4	3.25	1.92	2.87	3.6777	8.003	1.4466	0.1919	22.90	572.49
	CT5	2.73	1.75	2.51	4.8511	6.4161	1.0814	0.1501	38.96	974.07
	CT6	2.56	1.46	2.25	2.6395	4.41	0.5912	0.0714	32.57	814.13
	CT7	2.77	1.68	2.49	4.9755	6.0444	0.8543	0.107	30.28	756.88
	CT8	2.8	1.72	2.51	5.3396	6.543	0.9441	0.1215	44.92	1122.9
	CT9	2.55	1.61	2.29	3.5512	4.879	0.7504	0.1126	19.19	479.78
	CT10	2.81	1.69	2.48	4.5016	5.606	0.9433	0.1258	ND	--
PROM\pmSD								0.1288 \pm 0.032	34.44 \pm 9.82	861.03 \pm 245.6

AP: medida anteroposterior, LT: medida lateral, DV: medida dorso-ventral. **Temporada de lluvias:** Mata tambor y Mata de varas, **Temporada de secas:** Cuitláhuac. **BAF:** factor de bioacumulación **ND:** no detectable.

3.2.3. Factor de bioacumulación (BAF)

En MT, el valor promedio de BAF fue de 62.46 ± 45.85 , el valor máximo calculado fue de 161.83 en un individuo con una talla anteroposterior de 2.48 cm mientras que el valor más bajo fue de 21.55 en un individuo con una talla anteroposterior de 1.76 cm (Tabla 6).

En MV el valor calculado fue de 7.64 en un individuo con una talla anteroposterior de 0.95 cm (Tabla 6). En CT, el valor promedio de BAF calculado fue de 861.03 ± 245.68 , el valor

máximo calculado de 1122.9 en un individuo de talla anteroposterior de 2.8 cm mientras que el valor mínimo fue de 479.7 en un individuo de talla anteroposterior de 2.55 cm (Tabla 6).

3.2.4. Modelos de regresión lineal y potencial entre el BAF y la talla de *Corbicula fluminea*.

El análisis de regresión lineal entre la talla (anteroposterior) y el contenido de Cu en tejidos de *C. fluminea* fue significativo ($p < 0.05$) al utilizar los datos correspondientes a la estación de MT, por otro lado, el modelo de regresión lineal en los datos de la estación de CT no fue significativo ($p > 0.05$) (Figura 6).

TABLA 7: Resultados del modelo de regresión lineal entre la talla (anteroposterior) y el contenido de Cu en *C. fluminea* durante ambas temporadas de muestreo/ Resultados del modelo de regresión potencial entre el factor de bioacumulación (BAF) y el peso seco de todos los individuos analizados en este estudio.

Estación	β	r^2	n	p
Mata Tambor	2.6049	0.5609	10	0.0126
Cuitláhuac	0.555	0.0354	8	0.6555
BAF	1.6267	0.7952	19	0.00004

β : pendiente, r^2 : coeficiente de determinación, n: número de individuos, p: probabilidad de que las variables no estén relacionadas de manera lineal/potencial.

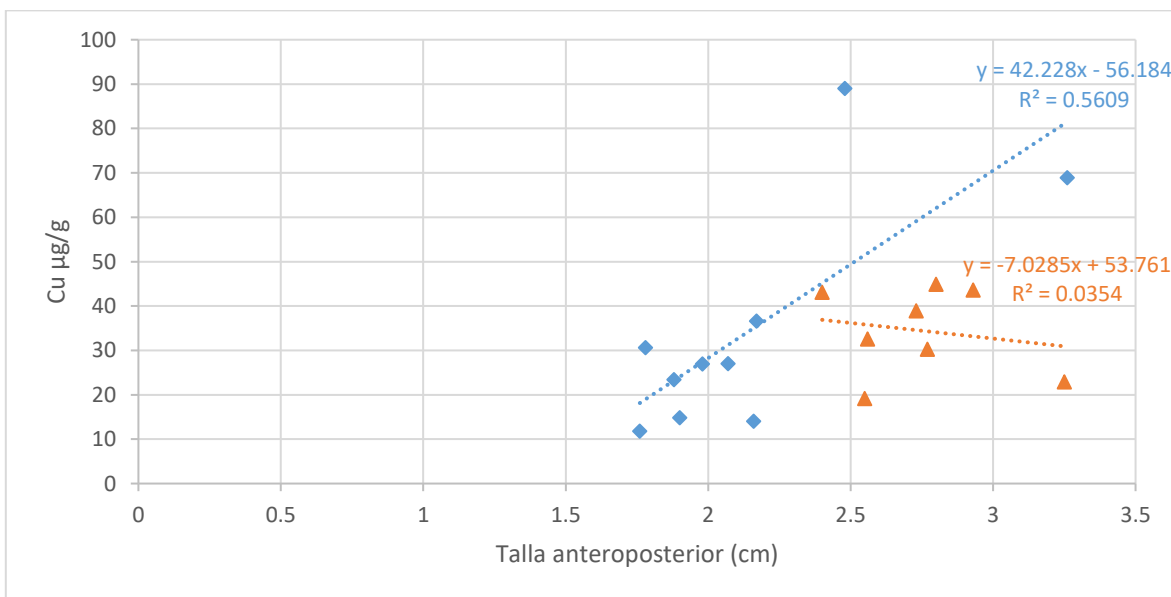


FIGURA 6: Modelo de regresión lineal entre la talla anteroposterior y el contenido de Cu ($\mu\text{g/g}$) en tejido blando de *C. fluminea*. (\blacktriangle : Cuitláhuac / \blacklozenge : Mata Tambor)

El modelo de regresión potencial (Figura 7) que relaciona el peso seco y el BAF de Cu utilizando los datos de ambas temporadas de las tres estaciones muestreadas fue significativo ($p < 0.01$) con un $r^2 = 0.7393$ y una relación positiva ($\beta = 1.6267$).

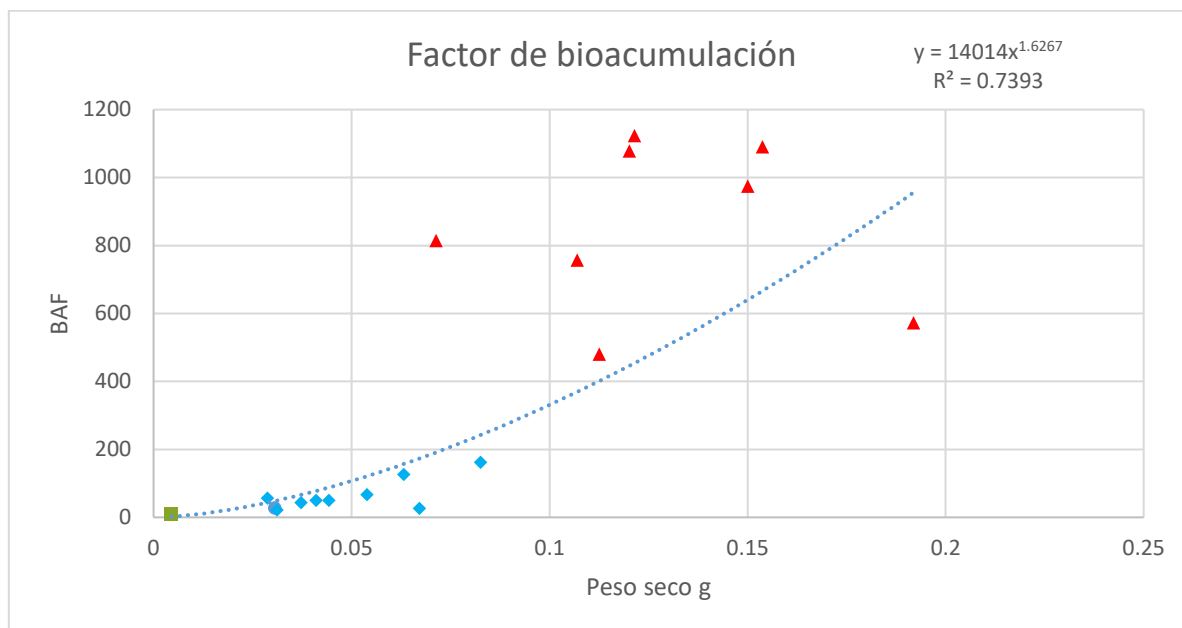


FIGURA 7: Modelo de regresión potencial entre el peso seco de *C. fluminea* y el factor de bioacumulación (BAF) de Cu en los individuos de las 3 estaciones / \blacktriangle : Cuitláhuac / \blacklozenge : Mata Tambor / \blacksquare : Mata de Varas.

3.2.5. Bioacumulación de Cu; Análisis comparativo de temporadas.

La prueba de t realizada para analizar si existe diferencias entre la estación de MT y la estación de CT fue significativo ($p < 0.05$) para los datos de biomasa/peso seco ($p = 0.00001$) y para los datos de BAF ($p = 0.00000001$) (Tabla 8).

TABLA 8: pruebas de T de student muestra-población para los datos de ambas estaciones / contraste de significancia del promedio de Cu acumulado en *C. fluminea* vs el límite permisible de Cu [$\mu\text{g/g}$] de acuerdo a la legislación brasileña.

Datos	t value	g.l	p
Peso seco	6.27	17	$1.11e^{-05}$
BAF	10.31	17	$1.78e^{-08}$
Sitio	$T_{crit}(95\%)$	T_{exp}	Límite permisible de Cu
Cuitláhuac	1.894	4.919	30.00
Mata Tambor	1.833	6.908	
SFJA	1.734	3.756	

t = valor de t (Welch) $g.l$ = grados de libertad ($n-2$) p = probabilidad de que las variables no estén relacionadas T_{exp} = valor de T calculada T_{crit} = valor de T crítica bajo un nivel del 95% de confiabilidad

Los niveles de Cu no son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) al límite permisible de Cu para bivalvos de acuerdo a la legislación brasileña ($30 \mu\text{g/g}$) (valor proporcionado por la unión europea; Tabla 8).

4. Discusión

4.1. Análisis fisicoquímico del sedimento fluvial: concentración biodisponible de Cu y Pb.

Cuitláhuac

El contenido biodisponible de Pb detectado en sedimento fluvial durante la temporada de secas en la estación de CT fue de $1.64 \mu\text{g/g}$, el cual es el valor más alto detectado al comparar ambas temporadas. Por otro lado, la concentración de Cu biodisponible registrada en CT durante la temporada de secas, es la menor al comparar ambas temporadas de muestreo ($0.04 \mu\text{g/g}$), estas concentraciones tan contrastes se pueden deber a los factores fisicoquímicos del ambiente y del sedimento los cuales interactúan con el ciclo biogeoquímico de los minerales y el transporte de los elementos traza en el ambiente (Páez-Osuna, 2005b).

El nivel bajo de Cu biodisponible detectado en CT ($0.04 \mu\text{g/g}$) puede deberse a factores físicos del ambiente, como la deficiente hidrodinámica del cauce y la baja precipitación pluvial, ya que son considerados factores que erosionan los suelos adyacentes al río y meteorizan las rocas, donde se origina el Cu (Arévalo et al., 2002; Mormoli et al., 2007) .

El análisis edafológico de CT indica que los sedimentos tienen una clase textural arcillosa (30%A, 28%L, 42%R), un nivel pobre de materia orgánica (0.19%) un pH de 6.83 y una capacidad de intercambio catiónico medio de $28.08 \text{ cmol (+)}/\text{kg-1}$. Estos factores son determinantes en la presencia de elementos traza en el sedimento (Ahumada, 1989; Páez-Osuna, 2005^a).

Se ha reportado que la presencia abundante de arcilla en sedimentos y en superficies edáficas son ricas en elementos traza , ya que las partículas finas ($< 0.02 \text{ mm}$) del sedimento,

se caracterizan por tener actividad coloidal en comparación con los limos y las arenas (Martínez, 2002), al igual que los ácidos húmicos: producto de la materia orgánica que al descomponerse entre el sedimento incrementan la capacidad de intercambio catiónico en el mismo (Martínez y Bocanegra, 2002), lo cual puede explicar la concentración detectada de Pb (1.64 µg/g) biodisponible en el sedimento.

Otro factor que influye en la disponibilidad del Pb en el material particulado depositado sobre el sedimento es el pH, cuando este se encuentra por debajo del valor neutro (7), ocasiona la liberación de carbonatos al disolver los metales precipitados como los aluminosilicatos, generando espacio entre las partículas de arcilla lo que le permite secuestrar al Pb presente en el medio (Vaněk et al., 2005). Otra característica que puede determinar la biodisponibilidad de Pb en el sedimento es la temperatura, cuando la temperatura es elevada (>24°C) el Pb se absorbe fácilmente sobre la superficie terrestre generando complejos con la materia en diferentes fracciones del sedimento (principalmente en la fracción mineral: óxidos de Fe/Mg y en la fracción del contenido de material orgánico) (Driscoll et al., 1994; Dong et al., 2000).

Cabe mencionar que CT es un sitio que se encuentra al Sureste de Córdoba el cual se encuentra en confluencia con la sub-cuenca de Atoyac, este factor puede indicar que parte de los niveles de Pb biodisponible detectados en el sedimento sean de origen no residual (Por actividad antropogénica, transportados desde afuera del ambiente por el lavado de químicos o introducidos directamente por medio del desagüe en el cauce) y movilizados en solución o en forma particulada por la hidrodinámica del río a la zona.

Mata de Varas y Mata Tambor

Durante la temporada de lluvias, el contenido de Pb biodisponible en sedimento fue similar en ambas estaciones de muestreo analizadas con niveles inferiores a 1 µg/g (MT= 0.27 µg/g y MV= 0.72 µg/g). A diferencia de CT (Temporada de secas) la clase textural del sedimento fluvial en MT y MV fue más gruesa, p. e. Arena francosa (85%A, 9%L, 6%R) y Arenosa (95%A, 3%L, 2%R) respectivamente, lo que influye en la baja capacidad de intercambio catiónico (MT= 13 cmol(+)/kg-1 y MV= 11.84 cmol(+)/kg-1) al no presentar suficiente contenido de

arcilla en el sedimento para secuestrar el Pb del medio (Vaněk et. al, 2005). Por otro lado los factores ambientales también son partícipe del flujo de Pb en el medio, por ejemplo, la precipitación pluvial durante la temporada de lluvias es superior que en temporada de secas nivelando la temperatura del ambiente en la zona lo que no permite la adsorción de Pb en la superficie terrestre, además la constante hidrodinámica que fluye en la cuenca genera que la pobre concentración de Pb presente en el sedimento genere complejos con la fracción mineral del mismo al ser transportada por el flujo del agua, evitando que se encuentre biodisponible para la biota. (Weiss et al., 1999; Dong et al., 2000).

Durante la temporada de lluvias el contenido de Cu fue 13 veces mayor (0.55 µg/g) en MT y 75 veces mayor (2.91 µg/g) en MV en comparación con CT (temporada de secas). Uno de los principales factores que influyen en el contenido de Cu biodisponible en sedimento fluvial es su origen de tipo residual, ya que la mayoría del Cu proviene de la erosión de los suelos y la meteorización de la roca parental por la dinámica activa que ocasiona la precipitación pluvial al lavar la superficie terrestre por la escorrentía de la lluvia que recae directamente en los cauces, lo que puede explicar un mayor contenido de Cu durante la temporada de lluvias (Caille et al., 2003; Eggleton y Thomas, 2004; Páez-Ozuna, 2005).

Algunas fuentes consideradas como secundarias que contribuyen al incremento de Pb y Cu en el SFJA son los campos agrícolas aledaños a la zona como las cafeteras y cultivos de frutos (Mangifera sp., Carica papaya sp. Sechium edule sp.; Anexo 3) que son tratados con químicos anti-fúngicos o plaguicidas que contienen agentes tóxicos compuestos de diversos metales pesados que participan en las fracciones del sedimento al depositarse sobre la superficie terrestre y ser transportados a través de la cuenca por medio de la erosión y el flujo del río. Considerando las actividades antropogénicas, los factores fisicoquímicos del sedimento y del ambiente, se puede asumir que los niveles de elementos traza en el SFJA sean de origen residual para los elementos esenciales (p. e. Cu, Zn, Se) y no residual para los elementos no esenciales (p. e. Pb, Cd, Hg) generando que el SFJA pueda ser considerado como una fuente puntual de elementos traza para las costas del sur del Golfo de México (Horta-Puga et al., 2013).

4.2. Contenido de Cu y Pb en tejido blando de *Corbicula fluminea*.

Cuitláhuac

Durante la temporada de secas, en CT, el valor promedio de concentración de Cu detectado en tejido blando de *C. fluminea* fue de $34 \pm 9.82 \mu\text{g/g}$ en los individuos con un rango homogéneo de talla anteroposterior que oscilaba entre 2.4 cm y 3.25 cm, el valor más alto detectado fue de $44.92 \mu\text{g/g}$ en un individuo con un tamaño anteroposterior de 2.8 cm, el valor promedio registrado en este estudio fue más alto que lo detectado en el estudio de Ruelas-Inzunza et. al (2009), donde el valor promedio fue de $9 \mu\text{g/g}$ para *C. fluminea* y $9.32 \mu\text{g/g}$ para *Polymesoda caroliniana* durante todas las temporadas muestreadas (secas, lluvias y vientos) en un estuario de Coatzacoalcos, Veracruz, así mismo también resulto ser más elevado que lo registrado en Anzali wetland, Iran donde registraron una concentración promedio de $24.8 \pm 8.9 \mu\text{g/g}$ de Cu en tejido de *Corbicula fluminallis* (Pourang, 1996). La diferencia de concentraciones halladas en este estudio con otros ya realizados previamente en organismos de la familia cyrenidae se puede inferir principalmente por las condiciones del hábitat en que se encuentran los bivalvos, por ejemplo, *P. caroliniana* y *C. fluminallis* son pelecipodos que sobrepasan los 2.0 cm de tamaño para alcanzar la madurez sexual (etapa en la que se requiere mayor concentración de elementos esenciales) y que habitan sistemas estuarinos (donde los niveles de elementos traza biodisponibles se encuentran altamente demandados por la biota; algas, crustáceos, moluscos y peces) (Sousa et al., 2008). Algunos autores como Dare y Edwards (1975), Hall (1984), King et al. (1986), Neson y Cox (2002) mencionan que los bivalvos tienen la capacidad de seleccionar las partículas que ingieren en el medio, así mismo como tienen la capacidad de desechar los elementos que no son requeridos en su metabolismo, esto puede explicar la ausencia de Pb en el tejido de *C. fluminea* en este estudio a pesar de que el contenido biodisponible de Pb fuera superior a $1 \mu\text{g/g}$ durante esta temporada; no obstante, cabe mencionar que *C. fluminea* presenta otro mecanismo de ingesta de alimento que se conoce como “pedal-feeding” el cual consiste en capturar material particulado con ayuda del pie en el sedimento, durante la temporada de secas el sedimento fluvial de CT presentó una textura arcillosa (Tabla 5), las arcillas funcionan como reservorios de nutrientes y minerales en los sistemas edáficos

de la superficie terrestre (Vaněk et. al, 2005) lo cual puede explicar que la concentración de Cu acumulado por *C. fluminea* durante esta temporada en este estudio difiera de otros no solo se debe por ser un elemento requerido para su metabolismo, sino que también proviene por ser un metal que se podía encontrarse abundante en el contenido neto de las arcillas en el sedimento.

La correlación entre la talla anteroposterior y el contenido neto de Cu acumulado en el tejido de *C. fluminea* no fue significativa ($p=0.6555$) durante esta temporada, indicando que no existe relación entre el tamaño anteroposterior y el contenido de Cu en los bivalvos de CT, sin embargo, la pendiente de la curva ($\beta < 1.0$) tiende a mostrar que los organismos más pequeños tiende a acumular mayor concentración de Cu que los organismos de mayor talla (Figura 6), similar a lo registrado en *Ostrea edulis* en Mayo de 1974, donde la concentración de Cu detectado en tejido de *O. edulis* decreció conforme al incremento de tamaño en los individuos (Coombs, 1974). Estudios Previos (Gutierrez-Galindo et al., 1990; Cataldo et al., 2001; Gill et al., 2006; Baqueiro-Cárdenas et al., 2007; Senior, 2015) han mencionado que la capacidad regulatoria de Cu y Zn en los bivalvos tiende a ajustarse fácilmente en los individuos pequeños para establecer una relación constante conforme a su crecimiento, cuando las condiciones ambientales cambian en el entorno que habitan los bivalvos, la regularización de Cu es difícilmente ajustada por los individuos de tallas elevadas, a esto se le conoce como dilución biológica, un fenómeno que explica que el crecimiento del tejido es más avanzando que la incorporación del metal. Esto puede explicar que los individuos de *C. fluminea* de CT con una talla anteroposterior grande presentaran menor concentración de Cu que en los individuos de menor talla.

Mata de Varas y Mata Tambor

Durante la temporada de lluvias los niveles biodisponibles de Cu se encuentran abundantes debido al deslave de la tierra aledaña al cauce que se acumula y se transporta a través del sedimento a lo largo de la cuenca, fenómeno que puede explicar que durante esta temporada en la región de MT la concentración más alta de Cu detectado en tejido de *C. fluminea* fue de 89.01 $\mu\text{g/g}$ en un individuo con un rango de talla anteroposterior de 2.48 cm. La concentración promedio de Cu detectado en MT durante la temporada de lluvias fue

similar que en los individuos de CT durante la temporada de secas ($34.35 \pm 25.22 \mu\text{g/g}$) en individuos con un rango de talla anteroposterior entre 1.76 cm y 3.26 cm, sin embargo, en esta temporada la correlación entre el tamaño de los bivalvos y el contenido neto de Cu en tejido de *C. fluminea* fue significativa ($p= 0.0126$) lo que demuestra una relación positiva (Bioacumulación) de acuerdo con la pendiente ($\beta > 1.0$) lo que sugiere la ausencia de dilución biológica en los bivalvos durante esta temporada.

El Cu es considerado un elemento esencial para el metabolismo ya que juega un papel fundamental como activador enzimático debido a que forma parte de la hemoglobina y hemocianina; proteínas especializadas para el transporte de O_2 a través del sistema circulatorio en los animales, considerando que la etapa reproductiva es un factor que define la concentración de elementos detectados en los organismos, puede explicarse que *C. fluminea* requiera elevadas concentraciones de Cu durante esta temporada puesto que su época reproductiva se extiende desde verano hasta a finales de otoño (Junio-Octubre), así mismo se puede explicar que la variación heterogénea de tallas encontradas durante esta temporada de MT se deba al mismo fenómeno de época reproductiva considerando que el crecimiento de miembros juveniles es avanzado (> 1.0 cm) durante los primeros 3 meses de vida (McMahon, 2000).

La Tabla 8 compara la concentración de Cu acumulado en el tejido de *C. fluminea* obtenido en este estudio con otros trabajos realizados en bivalvos de la familia cyrenidae. Bilos et al., (1998) en el Río la Plata, Argentina, encontraron una relación directa entre el tamaño de *C. fluminea* y el contenido de Cu en tejido blando, así mismo discuten que los factores que influyen en este carácter acumulativo son la temporada reproductiva, el sexo y el tipo de alimentación que tienen los bivalvos, en cambio, Peltier et al. (2009) discuten que la biodisponibilidad de Cu en el medio es un factor importante que explica el carácter acumulativo de los bivalvos, ya que la exposición prolongada de este elemento en el ambiente que habitan los pelecípodos es la causa principal que promueve el crecimiento (talla) de *C. fluminea* así como la concentración de Cu en su interior.

Cabe mencionar que tres factores definen que exista diferencias entre los niveles de Cu detectados en este estudio respecto a los otros, 1) El tiempo de exposición al metal que tuvo el organismo 2) los factores ambientales que definen la biodisponibilidad del elemento para ser absorbido por el organismo y 3) las rutas de incorporación del metal hacia el organismo (Gutierrez-Galindo et al., 2003; Páez-Osuna, 2005a; Peltier et al., 2009; Ruelas-Inzunza et al., 2009).

TABLA 8: Concentraciones promedio de Cu y Pb [$\mu\text{g/g}$] en especies del genero corbicula detectados en diferentes sitios.

Especie	Cu	Pb	Sitio	Referencia
<i>Corbicula fluminea</i>	123.6	--	Savannah River, USA	Peltier et al., 2009
<i>Corbicula fluminea</i>	45	--	Río la Plata, Argentina	Bilos et al., 1998
<i>Corbicula fluminea</i>	40	--	Shatt al-Arab River, Iraq	Abaychi y Mustafa, 1988
<i>Corbicula fluminea</i>	9	0.09	Coatzacoalcos, Veracruz	Ruelas-Inzunza et al., 2009
<i>Corbicula fluminea</i>	30.7	--	Mexicalli valley, México	Gutierrez-Galindo et al., 2003
<i>Corbicula fluminalis</i>	24.8	5.8	Anzali wetland, Iran	Pourang, 1996
<i>Polymesoda Caroliniana</i>	9.32	0.91	Coatzacoalcos, Veracruz	Ruelas-Inzunza et al., 2009
<i>Polymesoda Caroliniana</i>	6.4	--	Sistema fluvial-estuarino Coatzacoalcos, Veracruz	Botello y Toledo, 1996
<i>Corbicula fluminea</i>	33.75	--	Sistema Fluvial Jamapa- Atoyac	Este estudio

4.3. Factor de bioacumulación

Una forma de evaluar a un bioindicador de contaminantes a través de las proporciones contenidas de un material dentro de un organismo respecto al contenido del material disponible en el ambiente, es calculando el factor de bioacumulación (por sus siglas: BAF) (Mackay et. al, 2000). Boyden (1977) interpreta por medio de su ecuación; $Y = \alpha e^{\beta x}$, el comportamiento del metal al ser asimilado por un organismo, donde $Y = \text{BAF}$, $x = \text{talla/biomasa}$, $\beta = \text{pendiente}$ y $\alpha = \text{ordenada de origen}$, siguiendo el criterio de que sí la pendiente (β) es <1 existe exclusión del metal, $=1$ hay regulación del metal y >1 es

acumulación de metal, esto explica, que la biomasa respecto al contenido proporcional de Cu acumulado en el tejido de *C. fluminea* en contraste a los niveles biodisponibles del SFJA (BAF) es significativo ($p= 0.00004$) y positivo en relación a la pendiente de origen ($\beta=1.6267$), por ende, *C. fluminea* es considerado un bioacumulador de Cu y no un bioindicador ya que no existe un delimitado nivel de acumulación hacia este metal que sugiera una tendencia proporcional al contenido biodisponible del mismo en el medio. Esto se justifica debido a que el Cu es considerado un elemento esencial para la estructura de proteínas utilizadas en el metabolismo, el cual actúa indispensablemente a promover el crecimiento tendiendo a incrementar la capacidad acumulativa con el tiempo de exposición, mismo suceso que ocurrió en Savannah River, donde encontraron niveles de Cu superiores a 100 $\mu\text{g/g}$ en organismos de *C. fluminea* con un tamaño anteroposterior superior a 2.0 cm (Peltier et al., 2009).

El Pb fue indetectable en los pelecípodos en ambas temporadas, esto se puede referir a que el Pb es un elemento que no participa en el metabolismo de *C. fluminea*, además de ser considerado un elemento altamente tóxico a bajas concentraciones (Bilos et. al, 1998; Ruelaz-Inzunza et. al, 2009), se puede deducir que *C. fluminea* tiene la capacidad de reconocer el material que su organismo no necesita, a pesar de encontrarse en forma biodisponible, el metal que pudo concentrarse dentro de los bivalvos logro ser diluido al no ser partícipe de las rutas metabólicas en los mismos, tal como lo discuten Ruelaz-Inzunza et al. (2009) donde hallaron 0.09 $\mu\text{g/g}$ de Pb en *C. fluminea* en una zona industrializada de Coatzacoalcos, Ver., en organismos con un tamaño superior a 2.0 cm.

4.4. Análisis comparativo entre estaciones: Características bioacumulativas de *C. fluminea* y riesgo de consumo.

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas de *t de student* (comparación de ambas estaciones) arrojaron diferencias significativas en cuanto a la biomasa (peso seco; $p= 0.00001$, $t= 6.27$) y en cuanto al carácter bioacumulativo (BAF; $p=0.00000001$, $t= 10.31$) respecto a la absorción de Cu, esto puede indicar que la exposición a este elemento

promueve el crecimiento y por ende la indefinida capacidad acumulativa del mismo. Los factores que influyen en la bioacumulación elevada de elementos traza son la absorción dietética y al intercambio gaseoso (Bioconcentración; transporte a través de superficies respiratorias/ adsorción dermal; Mackay y Fraser, 2000). Así mismo, de las características que influyen a que existan diferencias significativas en el carácter bioacumulativo y la biomasa en las poblaciones de *C. fluminea* a la absorción de Cu entre estaciones, se consideran las siguientes:

- El intercambio gaseoso y la dieta de *C. fluminea* al igual que otros bivalvos dulceacuícolas, es detritívora y se da por suspensión alimenticia, bombeando a su interior una corriente de agua (que adsorbe dermalmente) ingiriendo principalmente la materia orgánica que captura, asumiendo este caso como una fuente de absorción de Cu por dieta, se puede inferir que en la estación de CT la acumulación de Cu por los individuos de *C. fluminea* no resultara elevada ya que el contenido de MO% (particularmente donde se encuentra el alimento de *C. fluminea*) en el sedimento fue extremadamente pobre (0.19%), en contraste a lo observado en la estación de MT donde el contenido de MO% en el sedimento fue moderadamente pobre (0.87%).
- El “*pedal-feeding*”, otra ruta dietética particular de los individuos juveniles de *C. fluminea* (abundantes durante la temporada de lluvias) consiste en adquirir recursos energéticos a través de la ingesta de material inorgánico capturado por el pie, generalmente del material lábil del sedimento (mineral biodisponible), considerando en este caso que el nivel biodisponible de Cu es contraste entre temporadas de los sitios muestreados (secas: 0.04 µg/g y lluvias: 1.73 ± 1.66 µg/g) la acumulación de Cu por *C. fluminea* es mayor en temporada de lluvias debido a que la concentración biodisponible de este metal en el sedimento durante esta temporada es más elevada que la concentración detectada en la estación de CT durante la temporada de secas.

Debido a estas características, se puede asumir que durante la temporada de lluvias, en la estación de MT y MV (donde el contenido de Cu se encuentra generalmente más

biodisponible para ser adquirido por *C. fluminea*) el comportamiento bioacumulativo es más representativo que en CT. No obstante, el contenido de Cu en los bivalvos de ambas estaciones (MT y CT) no es estadísticamente diferente a los límites permisibles establecidos por la legislación brasileña (30 µg/g), México no cuenta con un dato específico para delimitar el contenido de Cu en recursos pesqueros, sin embargo tomando en cuenta el límite establecido de Brasil (Díaz, 2009), se puede asumir (respecto a los resultados obtenidos en este estudio) que no existe un riesgo potencial hacia el consumo de este bivalvo, pero se recomienda considerar ligeras precauciones en su consumo durante la temporada de lluvias, donde la exposición de Cu en el SFJA es más prolongada, lo que genera una acumulación constante de este metal por el organismo.

5.0. Conclusiones

- ✓ El bivalvo *Corbicula fluminea* no puede ser considerado como un bioindicador de Cu debido a que presenta una excelente capacidad acumulativa respecto a su tamaño o biomasa
- ✓ El bivalvo *Corbicula fluminea* puede ser considerado un bioremediador de Cu en el SFJA.
- ✓ La acumulación de Cu detectado en tejido de *C. fluminea* es mayor en la estación de MT debido a la constante exposición de Cu biodisponible en el SFJA donde el carácter bioacumulativo fue significativo en relación con la talla de *C. fluminea*.
- ✓ El carácter bioacumulativo de *C. fluminea* hacia el Cu además de estar mediada por sus hábitos alimenticios, puede estar influenciado por la biodisponibilidad del metal en el sedimento y por las características fisicoquímicas del mismo (contenido de MO%, CICT y textura)
- ✓ La almeja *C. fluminea* ha sido empleada como fuente de nutrición para la población de Cuitláhuac, se recomienda hacer un consumo moderado de este recurso alimenticio principalmente durante la temporada de lluvias ya que puede presentar un riesgo significativo por la presencia de Cu al sobrepasar el límite permisible.
- ✓ El Factor de bioacumulación de *Corbicula fluminea* para Cu es positivo en relación a su biomasa, por lo tanto la hipótesis se acepta: *Corbicula fluminea* es un bioacumulador de Cu.

6.0. Bibliografía

- Abaychi, J. K., & Mustafa, Y. Z. (1988). The Asiatic clam, *Corbicula fluminea*: an indicator of trace metal pollution in the Shatt al-Arab River, Iraq. *Environmental Pollution*, 54(2), 109-122.
- Achard, M., Baudrimont, M., Boudou, A., & Bourdineaud, J. P. (2004). Induction of a multixenobiotic resistance protein (MXR) in the Asiatic clam *Corbicula fluminea* after heavy metals exposure. *Aquatic toxicology*, 67(4), 347-357.
- Ahumada, R. (1989). Descripción de las condiciones oceanográficas de la bahía San Vicente y antecedentes sobre los efectos de la contaminación. *Biol. Pesq.(Chile)*, 18, 37-52.
- Ahumada, R. (1992). Patrones de distribución espacial de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb, en sedimentos superficiales de Bahía San Vicente, Chile. *Rev. Biol. Mar. Valparaíso*, 27(2), 265-282.
- Anderson, R. V., & Holm, D. J. (1987). *Chaetogaster limnaei* (Oligochaeta: Naididae) Infesting Unionid Mollusks (Pelecypoda: Unionidae) and *Corbicula fluminea* (Pelecypoda: Corbiculidae) in Pool 19, Mississippi River. *Journal of Freshwater Ecology*, 4(1), 61-64.
- Arévalo, A. L. E. J. A. N. D. R. A., Skewes, A., Stern, C., Floody, R., Goldfarb, R., Nielsen, R., & Zúñiga, R. (2002). The giant El Teniente, breccia deposit: hypogene copper distribution and emplacement. *Integrated methods for discovery: Global exploration in the Twenty-first Century*, 9, 299-citation_lastpage.
- Bahena-Manjarrez, J. L., Rosales-Hoz, L., & Carranza-Edwards, A. (2002). Spatial and temporal variation of heavy metals in a tropical estuary. *Environmental Geology*, 42(6), 575-582.
- Baqueiro-Cárdenas, E. R., Borabe, L., Goldaracena-Islas, C. G., & Rodríguez-Navarro, J. (2007). Los moluscos y la contaminación: Una revisión. *Revista mexicana de biodiversidad*, 78, 1-7.
- Bilos, C., Colombo, J. C., & Presa, M. J. (1998). Trace metals in suspended particles, sediments and Asiatic clams (*Corbicula fluminea*) of the Rio de la Plata Estuary, Argentina. *Environmental Pollution*, 99(1), 1-11.

- Bonnail, E., Sarmiento, A. M., DelValls, T. A., Nieto, J. M., & Riba, I. (2016). Assessment of metal contamination, bioavailability, toxicity and bioaccumulation in extreme metallic environments (Iberian Pyrite Belt) using *Corbicula fluminea*. *Science of the Total Environment*, *544*, 1031-1044.
- Botello, A. V., & Toledo, A. impacto Ambiental de la Industria.Universidad autónoma de Campeche, epomex, serie científica, pp 541-554
- Boyden, C. R. (1977). Effect of size upon metal content of shellfish. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, *57*(3), 675-714.
- Caille, N., Tiffreau, C., Leyval, C., & Morel, J. L. (2003). Solubility of metals in an anoxic sediment during prolonged aeration. *Science of the Total Environment*, *301*(1), 239-250.
- Cataldo, D. H., Boltovskoy, D., Stripeikis, J., & Pose, M. (2001). Condition index and growth rates of field caged *Corbicula fluminea* (Bivalvia) as biomarkers of pollution gradients in the Paraná river delta (Argentina). *Aquatic Ecosystem Health & Management*, *4*(2), 187-201.
- Campbell, P.G.C., Kraemer, L.D., Giguere, A., Hare, L., Hontela, A., 2008. Subcellular distribution of cadmium and nickel in chronically exposed wild fish: Inferences regarding metal detoxification strategies and implications for setting water quality guidelines for dissolved metals. *Hum. Ecol. Risk Assess.* *14*, 290-316.
- Cohen, R. R., Dresler, P. V., Phillips, E. J., & Cory, R. L. (1984). The effect of the Asiatic clam, *Corbicula fluminea*, on phytoplankton of the Potomac River, Maryland. *Limnology and Oceanography*, *29*(1), 170-180.
- Coombs, T. L. (1974). The nature of zinc and copper complexes in the oyster *Ostrea edulis*. *Marine biology*, *28*(1), 1-10.
- Covich, A. P., Dye, L. L., & Mattice, J. S. (1981). Crayfish predation on *Corbicula* under laboratory conditions. *American Midland Naturalist*, 181-188.
- Crooks, J. A. (2002). Characterizing ecosystem-level consequences of biological invasions: the role of ecosystem engineers. *Oikos*, *97*(2), 153-166.

- Dare, P. J., & Edwards, D. B. (1975). Seasonal changes in flesh weight and biochemical composition of mussels (*Mytilus edulis* L.) in the Conwy Estuary, North Wales. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 18(2), 89-97.
- De La Hoz Aristizábal, M. V. (2008). First record in Colombia of *Corbicula fluminea* (Mollusca: Bivalvia: Corbiculidae), an invasive species. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 37(1), 197-202.
- Diaz, A. (2009). Unión Europea. Contenidos máximos en metales pesados en productos alimenticios.
- Driscoll, C. T., Otton, J. K., & Iverfeldt, A. (1994). Trace metals speciation and cycling.
- Dong, D., Nelson, Y. M., Lion, L. W., Shuler, M. L., & Ghiorse, W. C. (2000). Adsorption of Pb and Cd onto metal oxides and organic material in natural surface coatings as determined by selective extractions: new evidence for the importance of Mn and Fe oxides. *Water Research*, 34(2), 427-436.
- Eggleton, J., & Thomas, K. V. (2004). A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International*, 30(7), 973-980.
- Fan, W., Wang, W. X., Chen, J., Li, X., & Yen, Y. F. (2002). Cu, Ni, and Pb speciation in surface sediments from a contaminated bay of northern China. *Marine Pollution Bulletin*, 44(8), 820-826.
- Fournier, E., Adam, C., Massabuau, J. C., & Garnier-Laplace, J. (2006). Selenium bioaccumulation in *Chlamydomonas reinhardtii* and subsequent transfer to *Corbicula fluminea*: role of selenium speciation and bivalve ventilation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(10), 2692-2699.
- Gatenby, C. M., Neves, R. J., & Parker, B. C. (1996). Influence of sediment and algal food on cultured juvenile freshwater mussels. *Journal of the North American Benthological Society*, 15(4), 597-609.
- Gil, M. N., Torres, A., Harvey, M., & Esteves, J. L. (2006). Metales pesados en organismos marinos de la zona costera de la Patagonia Argentina continental. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 41(2), 167-176.

- Graczyk, T., Conn, D., Marcogliese, D., Graczyk, H., & De Lafontaine, Y. (2003). Accumulation of human waterborne parasites by zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) and Asian freshwater clams (*Corbicula fluminea*). *Parasitology research*, 89(2), 107-112.
- Gutierrez-Galindo, E., Flores, G., Olguin, G., & Villaescusa, J. (1990). Biodisponibilidad de metales trazas en almejas y mejillón del valle agrícola de Mexicali y Alto Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 16(4), 1-28.
- Hall, J. J. (1984). Production of immature *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae), in Lake Norman, North Carolina. *The Nautilus*, 98(4), 153-159
- Hansen, A. M., León, A., & Bravo, L. (1995). Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala. *Ingeniería Hidráulica en México*, 10(3), 55-69.
- Horta-Puga, G., Cházaro-Olvera, S., Winfield, I., Avila-Romero, M., & Moreno-Ramírez, M. (2013). Cadmium, copper and lead in macroalgae from the Veracruz Reef System, Gulf of Mexico: Spatial distribution and rainy season variability. *Marine pollution bulletin*, 68(1-2), 127-133.
- Hoz, L. R., & Edwards, A. C. (2005). Estudio geoquímico de metales en el estuario del río Coatzacoalcos. *Golfo de México*, 389.
- Ilarri, M., & Sousa, R. (2012). *Corbicula fluminea* Müller (Asian clam). *A handbook of global freshwater invasive species. Earthscan, London*, 173-183.
- King, C. A., Langdon, C. J., & Counts III, C. L. (1986). Spawning and early development of *Corbicula fluminea*(Bivalvia: Corbiculidae) in laboratory culture. *American Malacological Bulletin*, 4(1), 81-88.
- Lopez-Sanchez, J. F., Rubio, R., Samitier, C., & Rauret, G. (1996). Trace metal partitioning in marine sediments and sludges deposited off the coast of Barcelona (Spain). *Water Research*, 30(1), 153-159.
- Loring, D. H. (1979). Geochemistry of cobalt, nickel, chromium, and vanadium in the sediments of the estuary and open Gulf of St. Lawrence. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(6), 1196-1209.

- Mackay, D., & Fraser, A. (2000). Bioaccumulation of persistent organic chemicals: mechanisms and models. *Environmental pollution*, 110(3), 375-391.
- Martínez, D., & Bocanegra, E. (2002). Hydrogeochemistry and cation-exchange processes in the coastal aquifer of Mar Del Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 10(3), 393-408.
- Martínez, G. (2002). Metales pesados en sedimentos superficiales del Golfo de Cariaco, Venezuela.
- McMahon, R. F. (2000). Invasive characteristics of the freshwater bivalve *Corbicula fluminea*. *Nonindigenous freshwater organisms*, 315-343.
- Miller, W. A., Atwill, E. R., Gardner, I. A., Miller, M. A., Fritz, H. M., Hedrick, R. P., ... & Conrad, P. A. (2005). Clams (*Corbicula fluminea*) as bioindicators of fecal contamination with *Cryptosporidium* and *Giardia* spp. in freshwater ecosystems in California. *International journal for parasitology*, 35(6), 673-684.
- Morlán-Cahue, Y., y H. Opengo-Piña, 2005. Determinación de metales (Fe, Mn, Pb, y Zn) en macroalgas clorofitas del Sistema Arrecifal Veracruzano, México, p. 373-388. In: A. V. Botello, J. Rendónvon Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. De México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Momoli, R. S., Cooper, M., & Castilho, S. C. D. P. (2007). Sediment morphology and distribution in a restored riparian forest. *Scientia Agricola*, 64(5), 486-494.
- Morton, B. S. (1973). A new theory of feeding and digestion in the filter-feeding Lamellibranchia. *Malacologia*, 14, 63-79.
- Muñoz, I. D., Mendoza, C. A., López, G. F., Hernández, M. M., & Soler, A. A. (2001). Manual de análisis de suelos: México. *Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala*, 82p.

- Naranjo-García, E., & Olivera-Carrasco, M. T. (2014). Moluscos dulceacuícolas introducidos e invasores. *Especies acuáticas invasoras en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México*, 337-345.
- Neck, R. W. (1986). Corbicula in public recreation waters of Texas: Habitat spectrum and clam-human interactions. *American Malacological Bulletin*. 1986.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2002). Lehninger principios de bioquímica. *São Paulo: Sarvier*, 3.
- Páez-Osuna, F. (2005)^a. Efectos de los metales. *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: diagnóstico y tendencias*, 343-360.
- Paez-Osuna, F., (2005)^b. Fuentes de metales en la zona costera marina, p. 329-342. In: A. V. Botello, J. Rendon-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernandez (Eds.). *Golfo de Mexico Contaminacion e Impacto Ambiental: Diagnostico y Tendencias*, 2da Edicion. Univ. Auton. de Campeche, Univ. Nal. Auton. de Mexico, Instituto Nacional de Ecologia. 696 p.
- Peltier, G. L., Wright, M. S., Hopkins, W. A., & Meyer, J. L. (2009). Accumulation of trace elements and growth responses in *Corbicula fluminea* downstream of a coal-fired power plant. *Ecotoxicology and environmental safety*, 72(5), 1384-1391.
- Phelps, H. L. (1994). The Asiatic clam (*Corbicula fluminea*) invasion and system-level ecological change in the Potomac River estuary near Washington, DC. *Estuaries and Coasts*, 17(3), 614-621.
- Ponce-Velez, G., & Botello, A. V. (1992). Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la Laguna de Términos, Campeche. *Hidrobiológica*, 1(2).
- Pourang, N. (1996). Heavy metal concentrations in surficial sediments and benthic macroinvertebrates from Anzali wetland, Iran. *Hydrobiologia*, 331(1-3), 53-61.
- Robinson, J. V., & Wellborn, G. A. (1988). Ecological resistance to the invasion of a freshwater clam, *Corbicula fluminea*: fish predation effects. *Oecologia*, 77(4), 445-452.
- Ruelas-Inzunza, J., Spanopoulos-Zarco, P., & Páez-Osuna, F. 2009. Cd, Cu, Pb and Zn in clams and sediments from an impacted estuary by the oil industry in the southwestern

Gulf of Mexico: concentrations and bioaccumulation factors. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 44(14), 1503-1511.

Schaule, B. K., & Patterson, C. C. (1981). Lead concentrations in the northeast Pacific: evidence for global anthropogenic perturbations. *Earth and Planetary Science Letters*, 54(1), 97-116.

Senior Galindo, W. J. (2015). Contenido de metales pesados en organismos acuáticos expedidos en los mercados de la ciudad de machala, provincia de el oro.

Sickel, J. B. (1998). Gluttonous feeding behavior in the rhabdocoel, *Macrostomum* sp., induced by larvae of the asiatic clam, *Corbicula fluminea*.

Sousa, R., Antunes, C., & Guilhermino, L. (2008, January). Ecology of the invasive Asian clam *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in aquatic ecosystems: an overview. In *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology* (Vol. 44, No. 2, pp. 85-94). EDP Sciences.

Stumm, W., y J.J. Morgan. 1984. *Aquatic Chemistry*. John Wiley and Sons, New York, 720 p.

Thorp, J. H., & Covich, A. P. (Eds.). (2009). *Ecology and classification of North American freshwater invertebrates*. Academic press. pp: 309-371.

Uno, S., Shiraishi, H., Hatakeyama, S., Otsuki, A., & Koyama, J. (2001). Accumulative characteristics of pesticide residues in organs of bivalves (*Anodonta woodiana* and *Corbicula leana*) under natural conditions. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 40(1), 35-47.

Vaněk, A., Borůvka, L., Drábek, O., Mihaljevič, M., & Komárek, M. (2005). Mobility of lead, zinc and cadmium in alluvial soils heavily polluted by smelting industry. *Plant, Soil and Environment*, 51(7), 316-321.

Way, C. M., Hornbach, D. J., Miller-Way, C. A., Payne, B. S., & Miller, A. C. (1990). Dynamics of filter feeding in *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae). *Canadian Journal of Zoology*, 68(1), 115-120.

Weiss, D., Shotyk, W., Appleby, P. G., Kramers, J. D., & Cheburkin, A. K. (1999). Atmospheric Pb deposition since the industrial revolution recorded by five Swiss peat profiles:

enrichment factors, fluxes, isotopic composition, and sources. *Environmental science & technology*, 33(9), 1340-1352.

Wong, K. W., Yap, C. K., Nulit, R., Hamzah, M. S., Chen, S. K., Cheng, W. H., ... & Al-Shami, S. A. (2017). Effects of anthropogenic activities on the heavy metal levels in the clams and sediments in a tropical river. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(1), 116-134.

Yap, C. K., Ismail, A., & Tan, S. G. (2003). Effects of total soft tissue and shell thickness on the accumulation of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) in the green-lipped mussel *Perna viridis*. *Russian Journal of Marine Biology*, 29(5), 323-327.

7.0. Anexos

7.1. Anexo 1: Sistemática de *C. fluminea*



Figura I: Valvas de *Corbicula fluminea* (Muller, 1774), vista interna (derecha) y externa de la valva (Izquierda), escala cm.

Taxonomía

- **Filo:** Mollusca
- **Clase:** Bivalvia
- **Orden:** Veneroidea
- **Familia:** Cyrenidae
- **Género:** *Corbicula*
- **Especie:** *Corbicula fluminea* (Müller, 1774)

7.2. Anexo 2: Morfología y alometría de *C. fluminea*.



Figura II: medidas de las valvas de *Corbicula fluminea*: Dorsoventral (izquierda), Anteroposterior (centro) y lateral (derecha).

7.3. Anexo 3: Estaciones de muestreo.



Figura III: Estación Mata de Varas, temporada de lluvias



Figura IV: Estación de Mata Tambor, temporada de lluvias



Figura V: Cultivos aledaños al SFJA: Caña de azúcar, Maíz, Mango, Trigo.

8.0. Glosario

- **Ambiente:** Suma total de condiciones (elementos) bióticas y abióticas, que rodean a la biota y su hábitat, incluyendo las condiciones externas de un determinado hábitat.
- **Bioacumulación:** Acumulación de sustancias químicas en el tejido de los organismos a través de diferentes vías de absorción: respiración, ingesta e incluso contacto directo con agua/sedimento.
- **Bioconcentración:** Acumulación de sustancias químicas transmitidas específicamente por contacto o rutas NO dietéticas.
- **Biodisponibilidad:** Se refiere a la forma lábil y libre de la materia que se dispone a la biota.
- **Bioindicador:** Organismo característico de evaluar las condiciones del ambiente que habita.
- **Biomagnificación:** fenómeno natural que enriquece los contaminantes acumulados dentro de las redes tróficas.
- **Bioremediador:** Organismo que tiene la capacidad de cambiar las condiciones inestables del ambiente que habita beneficiando al ecosistema.
- **Bivalvo:** Organismo invertebrado perteneciente al filo molusca, característico de presentar una concha dividida en dos.
- **Deposit feeding:** mecanismo de alimentación que utilizan los bivalvos de la familia cyrenidae el cual consiste en capturar partículas del sedimento por medio del pie.
- **Digestión química:** Proceso de desnaturalización de la materia ejercida por agentes químicos en conjunto con la energía térmica para la ruptura de enlaces químicos.
- **Dilución biológica:** fenómeno que sucede cuando el crecimiento de un tejido es más avanzado que la incorporación de un material en el mismo.
- **Elemento refractario:** compuestos químicos inorgánicos resistentes a la exposición de energía química, eléctrica o térmica.
- **Elemento traza:** elemento químico que se caracteriza por tener una densidad superior a 5g/L, algunos se denominan esenciales (eg. Cu) al ser parte de la estructura de algunas enzimas además de participar en el metabolismo mientras que otros elementos no esenciales (eg. Pb) no son requeridas en el metabolismo y son tóxicos para la biota.
- **Erosión:** fenómeno que distribuye el material parental de la rocas en tamaños diminutos.
- **Especie centinela:** Organismo indicador de las condiciones características de un ambiente.

- **Filtración:** proceso que consiste en la separación de sólidos en una columna por medio de una estructura porosa o regulada por estructuras especializadas en la selección de materia.
- **Geoquímica:** Ciencia o disciplina que estudia la naturaleza y la interacción de los elementos químicos, principalmente los metales pesados.
- **Hábitat:** Porción local del ambiente, donde un organismo o un grupo de organismos vive bajo una serie de factores.
- **Meteorización:** disgregación de las rocas provocado por agentes externos al contacto de estos con la atmosfera.
- **Molusco:** Filo del reino animalia que involucra a organismos marinos y terrestres de cuerpo blandos y acorazados.
- **Osmorregulación:** forma activa de equilibrar la presión osmótica del medio interno manteniendo los líquidos osmóticos del cuerpo.
- **Pediveliger:** etapa metamórfica larval característico de los bivalvos.
- **Sedimento:** Conglomerado de materiales parentales formados en la corteza terrestre.
- **Sinergia:** Acción conjunta de diversos factores en la realización de una función.
- **Sistema biológico:** Red compleja de entidades biológicas relativas.
- **Sistema lotico:** Alusión a un hidrosistema que se encuentra en constante movimiento
- **Sistema lentico:** Alusión a un hidrosistema que se mantiene estático.
- **Trocófora:** etapa metamórfica pre-juvenil característico de los bivalvos.
- **Valva:** estructura ósea de material calcáreo de algunos moluscos que funciona como protección, principalmente los presentan organismos pertenecientes a la clase bivalvia.