



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el
molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de
Bacalar, Quintana Roo.**

T E S I S

Para obtener el grado de

Ingeniero Ambiental

PRESENTA

Jesús Moreno Caraveo

DIRECTOR

Q.F.B. José Luis González Bucio

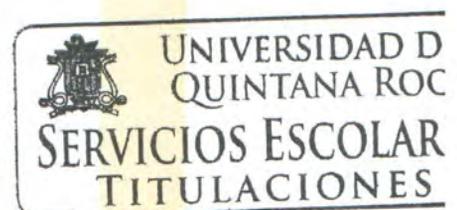
ASESORES

Dr. José Manuel Carrión Jiménez

Dr. Víctor Hugo Delgado Blas

M.C. José Martín Rivero Rodríguez

Dr. Víctor Hugo de Jesús Soberanis Cruz



Chetumal, Quintana Roo, México, Junio de 2014



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Trabajo de tesis bajo la supervisión del comité del programa de licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

Ingeniero Ambiental

Comité de Tesis

Director:

Q.F.B. José Luis González Bucio

Supervisor:

Dr. José Manuel Carrión Jiménez

Supervisor:

Dr. Víctor Hugo Delgado Blas



Chetumal, Quintana Roo, México, Junio de 2014.

Dedicado a:

DIOS quien me ha bendecido al permitirme llegar hasta aquí, ha sido mi principal guía en este camino de mi formación, me ha dado la mano para levantarme las veces que he caído y ha escuchado mis peticiones en momentos de angustia.

Mi FAMILIA: Papá, Mamá, Hermanos y Sobrinos por todo el respaldo incondicional que me han brindado.

Mi abuelita Elva (Q. E. P. D) que siempre quiso verme concretar este sueño.



Agradecimientos:

A mi madre celestial, la Virgencita, por protegerme siempre.

A cada uno de mis sinodales que formaron parte de mi Comité de Tesis:

Profe. Bucio, le agradezco de todo corazón por aceptar dirigir este trabajo y por el tiempo que se tomó transmitiéndome sus conocimientos. Gracias por su apoyo, sus asesorías, su confianza y comprensión tanto en lo académico como en lo personal.

Al Dr. Carrión por su amistad, su apoyo y tomar parte de su tiempo contribuyendo en el desarrollo de este trabajo realizando las críticas adecuadas al mismo.

M. C. Martín Rivero gracias por sus comentarios, sabios consejos y motivantes charlas que me impulsaron no solo a terminar la tesis sino también a concluir la carrera.

Al Dr. Víctor H. Delgado por sus observaciones objetivas y su aporte científico en la elaboración del presente trabajo.

Al Dr. Víctor H. Soberanis Cruz por sus asesorías y ayudarme con la interpretación estadística de los resultados.

A cada uno de los docentes del Departamento de Ingeniería de la UQROO por sus cátedras en las cuales tuve que exigirme demasiado para comprenderlas y me ayudaron a dar lo mejor de mí. Gran parte de lo que sé se lo debo a ustedes.

A cada uno de mis compañeros que compartieron conmigo su aprendizaje, su paciencia, su comprensión e hicieron de nuestra generación 2009-2014 un grupo muy unido. Romel, Stacey, Ervin, Farid, Quevedo, Addy, Gibrán, Hipólito, Anahí, Antonio, Jane, Gerardo, Félix y Santiago, sin ustedes no hubiera sido lo mismo.

A los encargados y asistentes del Laboratorio de Química de la UQROO por su ayuda y brindarme las facilidades para poder trabajar mis muestras.

Al Centro de Información Geográfica por facilitarme el equipo GPS.

Tío Geño gracias por escucharme y darme ánimos en los momentos difíciles.

Fam. Caraveo Soto gracias por brindarme las puertas de su hogar y preocuparse por mí.

Fam. Juárez Ávalos gracias ya que siempre me ofrecieron su cariño y su gran amistad.

A mis amigos de infancia por alegrarme y convivir conmigo sin importar las circunstancias: Adriana Luis, Omar, Juan, Freddy, Oscar, Levi, Tony, Abimael y Raúl.



*Este trabajo fue financiado en la Convocatoria 2014 "Apoyo a la Titulación" de la
División de Ciencias e Ingeniería con fondos del PIFI.*



Contenido

RESUMEN.	Error! Bookmark not defined.
I. INTRODUCCIÓN.	12
1.1. JUSTIFICACIÓN.	14
1.2. ANTECEDENTES.	15
1.3. OBJETIVOS.	16
1.3.1. Objetivo general.	16
1.3.2. Objetivos particulares.	16
II. MARCO TEÓRICO.	17
2.1. Biogeografía del genero <i>Pomacea</i>.	17
2.2. Descripción de la especie <i>Pomacea flagellata</i>.	18
2.2.1. Nombres comunes.	18
2.2.2. Posición taxonómica.	18
2.2.3. Biología y ciclo de vida.	19
2.2.4. Hábitat.	20
2.2.5. Reproducción.	20
2.2.6. Alimentación.	21
2.2.7. Respiración.	22



2.2.8.Excreción.....	22
2.3. Importancia ecológica y socioeconómica y aprovechamiento de los caracoles pomáceos a nivel mundial.....	23
2.4. Metales pesados.....	24
2.4.1.Factores bióticos.....	29
2.4.1.1. Tolerancia al metal.....	29
2.4.1.2. Etapas de vida y tamaño de los organismos.....	29
2.4.1.3. La toxicidad entre especies.....	29
2.4.1.4. La nutrición de los organismos.....	30
2.4.2.Factores abióticos.....	30
2.4.2.1. pH.....	30
2.4.2.2. Variación de temperatura.....	31
2.4.2.3. Oxígeno disuelto.....	31
2.4.2.4. Conductividad eléctrica.....	32
2.4.2.5. Sedimentos.....	32
2.4.3.Bioacumulación.....	33
2.4.4.Bioconcentración.....	34
2.4.5.Biomagnificación.....	34



2.5.	Fuentes de emisión y generación de Hg, Pb, Cd y Zn.....	34
2.6.	Acumulación y efectos de metales pesados en organismos acuáticos.....	38
III.	ÁREA DE ESTUDIO	41
IV.	METODOLOGÍA.....	44
4.1.	Laboratorio.....	44
4.1.1.	Reactivos	44
4.1.2.	Equipo.....	44
4.2.	Trabajo en campo.....	45
4.2.1.	Diseño de muestreo	45
4.2.2.	Muestreo de Sedimentos	47
4.2.3.	Colecta de los Organismos	47
4.2.4.	Medición de parámetros.....	47
4.3.	Preparación y análisis de muestras de organismos y sedimento.....	48
4.3.1.	Digestión de los organismos	49
4.3.2.	Digestión de los sedimentos.....	50
4.4.	Análisis de metales pesados.....	50
4.4.1.	Preparación de las curvas de calibración.....	51
4.5.	Análisis de resultados obtenidos.....	52



4.5.1. Análisis estadístico	52
4.5.1.1. Análisis de Componentes Principales (ACP).....	52
4.5.1.2. Correlación lineal de Pearson.....	53
4.5.1.3. Análisis de Clúster	53
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
5.1. Análisis de metales pesados en molusco (<i>Pomacea flagellata</i>) de la Laguna de Bacalar.....	55
5.2. Análisis de metales pesados en sedimento de la Laguna de Bacalar.....	60
5.3. Parámetros fisicoquímicos	63
5.4. Análisis de correlación.	67
5.5. Análisis de componentes principales (ACP).	69
5.6. Análisis de Clúster.....	71
VI. CONCLUSIONES.....	74
VII. RECOMENDACIONES.	76
VIII. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	77



Índice de Lista de Figuras	Pág.
Fig. 1. Caracol chivita. Fuente: propia.	18
Fig. 2. Anatomía del caracol.	19
Fig. 4. Rutas y bioacumulación de los metales pesados en el ambiente costero y lagunar M +n ión metálico libre, M +n pares iónicos, M-R complejos metálicos.	38
Fig. 5. Mapa del área de estudio: Laguna de Bacalar.	42
Fig. 6. Sitios de muestreo en la zona de estudio.	43
Fig. 7. Análisis de Componentes Principales (ACP) correspondiente a la temporada de seca 2014. 70	
Fig. 8. Análisis de Componentes Principales (ACP) correspondiente a la temporada de lluvia 2014.	71
Fig. 9. Dendrograma correspondiente a la temporada de seca 2014.	72
Fig. 10. Dendrograma correspondiente a la temporada de lluvia 2014.	73



Índice de lista de Tablas	Pág.
Tabla 1. Principales orígenes de algunos metales pesados.	37
Tabla 2. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.	46
Tabla 3. Condiciones de operación del Espectrómetro de Absorción Atómica (EAA).	51
Tabla 4. Concentraciones de metales pesados en <i>Pomacea flagellata</i> de la laguna de Bacalar en temporada de seca 2014.	56
Tabla 5. Concentración de metales pesados en <i>Pomacea flagellata</i> de la laguna de Bacalar en temporada de lluvia 2014.	59
Tabla 6. Niveles estándar y máximos ($\mu\text{g/g}$ peso seco) de metales en productos de la pesca descrito en la literatura y rango de las concentraciones halladas en musculo de <i>Pomacea flagellata</i> de Laguna de Bacalar.	60
Tabla 7. Concentración de metales pesados en sedimento en la temporada de seca 2014.	61
Tabla 8. Concentración de metales pesados de sedimento en temporada de lluvia 2014.	62
Tabla 9. Matriz de correlación de Pearson para la temporada de seca 2014.	68
Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson para la temporada de lluvia 2014.	69



Índice de lista de Diagramas	Pág.
Diagrama 1. Comportamiento de metales pesados en <i>Pomacea flagellata</i> de la laguna de Bacalar en temporada de seca 2014.	57
Diagrama 2. Comportamiento de metales pesados en <i>Pomacea flagellata</i> en temporada de lluvia 2014.	59
Diagrama 3. Comportamiento de los metales pesados en sedimento en temporada de seca 2014.	62
Diagrama 4. Comportamiento de los metales pesados en sedimento en temporada de lluvia 2014.	63
Diagrama 5. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en temporada de seca 2014.	64
Diagrama 6. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en temporada de lluvia 2014.	64



Resumen.

La Laguna de Bacalar es un lugar propenso, por sus características hidrológicas y geológicas, a ser impactado por la contaminación debido al crecimiento urbano y por las actividades económicas que se llevan a cabo en la región. El siguiente trabajo tuvo como finalidad el estudio de los metales pesados Hg, Pb, Cd y Zn en el molusco de la especie *Pomacea flagellata* de la Laguna de Bacalar. Se realizaron dos muestreos en tres sitios a lo largo de la orilla de la Laguna de Bacalar, durante la temporada de seca (enero, 2014) y la temporada de lluvia (mayo, 2014) para analizar la variación temporal. El comportamiento de la concentración de los metales en sedimento fue diferente al observado en el molusco debido a que la concentración en sedimento fue moderadamente superior a la hallada en el caracol para cada sitio y en ambas temporadas climáticas. En temporada de lluvia los niveles de concentración de los metales estudiados se incrementaron ligeramente, tanto en los organismos como en las réplicas de sedimento, con respecto a la temporada de seca. Se observó que las concentraciones de los metales en el molusco están dentro del límite permisible que indica la norma correspondiente (NOM-129-SSA1-1995), sin embargo hay concentraciones de Pb y Hg que rebasan los límites internacionales que indican la Unión Europea, la FAO y la FAO/WHO. Las concentraciones de los metales en sedimento rebasan los límites permisibles que indica la norma (NOM-001 ECOL-1996). Por último, se observó que existe una correlación entre los metales Hg, Pb y Cd y entre los parámetros fisicoquímicos, pero no entre los metales y los parámetros fisicoquímicos.



I. INTRODUCCIÓN.

La contaminación dulceacuícola ocasionada por las actividades antropogénicas constituye uno de los problemas de mayor trascendencia en nuestros tiempos. Las lagunas y estuarios son los ecosistemas más frágiles y sensibles y con el transcurso de los años han sufrido una serie de transformaciones negativas, esto debido a la gran contaminación.

Muchos de esos ecosistemas acuáticos se encuentran contaminados, por producto de la actividad humana, algunos incluso, con sustancias tóxicas como los metales pesados (González *et al.*, 2008) que son altamente dañinos para la biota acuática debido a su capacidad de bioacumulación y biomagnificación a lo largo de la cadena trófica (Marcovecchio *et al.*, 1991). Y aunque algunos metales son esenciales para los organismos como el cromo, cobre, fierro, molibdeno, selenio y zinc, pueden ser tóxicos si las concentraciones en el medio son elevadas. Sin embargo, el plomo, el cadmio y el mercurio son altamente tóxicos, y generan un problema cuando son utilizados y desechados al ambiente sobre los ríos, estuarios, lagunas y mares (Espina y Cecilia, 2005; Cawardine *et al.*, 2006).

La Laguna de Bacalar es la laguna más importante en el sur quintanarroense por su gran atractivo turístico, por su belleza natural, cultural, histórica y escénica para los habitantes locales, regionales, nacionales e internacionales. Además, presenta una gran riqueza de especies características de ambientes lacustres como por ejemplo el molusco de la especie *Pomacea flagellata*, mejor conocido en la región como caracol chivita, el cuál es capturado para autoconsumo y también para su venta.

Aunque aún parece encontrarse en buen estado de conservación, la Laguna de Bacalar sufre debido a la contaminación una gran presión proveniente de fuentes antropogénicas derivado de actividades de agricultura y ganadería, pero principalmente a la falta de drenaje de la ciudad de Bacalar, que inciden



negativamente en la calidad del agua de la laguna (SEDUMA, 2011). Sólo un cuarto de la ciudad cuenta con la instalación de la red de drenaje instalada por CAPA, sin embargo sólo un 30 por ciento de la población de esa área está conectada, mientras que el 70 por ciento restante continúa vertiendo sus aguas residuales de manera directa al subsuelo (Horta, 2013).

Lo anterior realza la importancia de la investigación de la calidad del agua de la laguna y con base en ello, proponer acciones que eviten el deterioro ambiental de tan importante ecosistema.

Esta investigación se enfocó al estudio de contaminación producida por los metales Hg, Pb, Cd y Zn en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) en la Laguna de Bacalar. Los organismos fueron sometidos a digestión húmeda de acuerdo a la técnica estandarizada en Métodos Analíticos para Espectroscopía de Absorción Atómica (Perkin-Elmer, 1996) mientras que los sedimentos fueron secados y sometidos a digestión ácida según el método ISO 11466 (1995) y analizados mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica. Con base en ello se evaluó la correlación de la concentración de dichos metales pesados entre el sedimento y el caracol “chivita” y con los parámetros medidos.

Aunque no existen antecedentes de algún estudio de metales pesados en la Laguna de Bacalar y de manera específica en el caracol chivita, este estudio permite conocer, con base en los resultados, si estos organismos presentan concentraciones problemáticas de metales y que su consumo moderado no constituye un riesgo para el consumidor.



1.1. Justificación.

La selección de los metales a determinar en molusco y sedimento en la Laguna de Bacalar, Q. Roo, se basó en algunos trabajos realizados en la Bahía de Chetumal y el Río Hondo dada su ubicación geográfica y condición geohidrológica que le permite una conexión con estos cuerpos de agua.

Los problemas de contaminación no han sido evidentes en la laguna en comparación con la Bahía de Chetumal y el Río Hondo, lo cual ha provocado que estudios e investigaciones no se lleven a cabo en la misma magnitud que los lugares mencionados. Sin embargo, es relevante considerar que la Laguna de Bacalar está expuesta a sufrir la contaminación debido a las actividades económicas como la agricultura y la ganadería que se practican en la región, además de los proyectos de construcción de hoteles como consecuencia de la promoción turística que se busca para el sur del estado.

Finalmente, se ha seleccionado el molusco de la especie *Pomacea flagellata* (Say, 1827) como herramienta biológica para evaluar la bioconcentración de los metales seleccionados por ser una especie del bentos y que está en contacto con el sedimento, además de formar parte de la dieta alimenticia del ser humano.



1.2. Antecedentes.

La región de Bacalar ha sido objeto de diversos estudios realizados de manera puntual por las diferentes instituciones que existen en la entidad.

Para reafirmar lo anterior, de acuerdo con el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Laguna de Bacalar (2005), tenemos que:

En 1962 el Instituto Nacional de la Pesca realizó un estudio ictiofaunístico de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo con la finalidad de introducir cultivos de tilapias. En 1987 la Secretaría de Recursos Hidráulicos realizó un estudio ecológico preliminar de la zona sur de Quintana Roo con el objetivo de impulsar el desarrollo económico del sur del Estado mediante una adecuada planificación, respetando el entorno ecológico. Gamboa Pérez y Schmitter-Soto (1999) hicieron una investigación de la distribución de peces cíclidos en el litoral de la laguna de Bacalar.

Álvarez *et al.* (2011) realizaron un estudio en el que se monitorearon 14 parámetros de la calidad del agua de siete lagunas costeras y continentales del estado de Quintana entre las que se incluye la laguna de Bacalar con la finalidad de diseñar e implementar un programa de monitoreo estatal.

Actualmente, de Jesús-Navarrete *et al.* (2013) están realizando un estudio sobre distribución y abundancia del caracol chivita en la laguna de Bacalar.

No existe antecedente alguno de estudios realizados en la Laguna de Bacalar con respecto a contaminación por metales pesados.



1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar la concentración de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en sedimento y en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo.

1.3.2. Objetivos particulares.

1. Evaluar la concentración de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata*.
2. Evaluar la concentración de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en sedimento.
3. Obtener los parámetros fisicoquímicos: Temperatura, Oxígeno disuelto, pH y conductividad
4. Determinar si existe una correlación entre la concentración de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en sedimento y el molusco *Pomacea flagellata*.



II. MARCO TEÓRICO.

2.1. Biogeografía del género *Pomacea*.

A los representantes de este género se les encuentra en zonas tropicales y subtropicales húmedas, habitando en ríos, lagos, canales, pantanos y humedales en general, preferentemente donde la vegetación es muy abundante (Perera y Walls, 1996; Rangel, 1998). Su distribución está controlada principalmente por condiciones de la temperatura, y aparentemente el volumen de las precipitaciones anuales (Vázquez *et al.*, 2011).

Los pomáceos se distribuyen en América, desde Estados Unidos hasta Argentina, con 17 especies vivas y un fósil; en América del Norte están presentes tres de estas especies (Rangel, 1988; Rangel *et al.*, 2003). De acuerdo a la literatura dicha especie también se encuentra en el Oeste de la India hasta Florida y Georgia en Estados Unidos. En África, a estos caracoles se les encuentra a lo largo del Río Nilo en Egipto, siendo más abundantes hacia el centro del continente. En el Oriente, se distribuyen desde la India y Sri Lanka, a través de Tailandia y hasta el Este de la India, excepto en Nueva Guinea (Perera y Walls, 1996).

En México se han registrado sólo dos especies: *Pomacea flagellata* (Say, 1827), que se distribuye desde el Norte de Veracruz, a través de la vertiente del Golfo de México, hasta la Península de Yucatán, desciende por el Estado de Chiapas y posiblemente Oaxaca, y continua por Centroamérica hasta el Norte de Colombia; y una segunda especie, que corresponde a *Pomacea patula catemacensis* (Baker, 1992) que limita su distribución al Lago de Catemaco, Veracruz (Naranjo y García, 1986; Rangel, 1988; Rangel *et al.*, 2003), de ahí que se derive su nombre.



2.2. Descripción de la especie *Pomacea flagellata*.

2.2.1. Nombres comunes.

A los caracoles correspondiente al género *Pomacea* se les ha asignado distintos nombres, como: “caracol manzana”, éste nombre es conocido a nivel mundial. A nivel México en Tabasco lo llaman “tote”, “caracol de río” y “caracol de pantano”; en Chiapas se le denomina “tango”; en Veracruz “tegologo” (Rangel *et al.*, 2003) y en Quintana Roo es conocido como “caracol chivita” (Fig. 1) (de Jesús-Navarrete *et al.*, 2013).



Fig. 1. Caracol chivita. Fuente: propia.

2.2.2. Posición taxonómica.

La posición taxonómica de varias especies del genero *Pomacea* ha sufrido muchos cambios debido a los pocos criterios morfológicos, de edad y la variabilidad de la especie en una población. Como ejemplo de ello, entre el siglo XIX y XX se enlistaron 30 especies para este género.

Los pomáceos son moluscos acuáticos que pertenecen a la Familia Ampullariidae (Rangel *et al.*, 2003).

2.2.3. Biología y ciclo de vida.

Los pomáceos presentan anatómicamente tres estructuras básicas, que son la concha, el opérculo y la masa visceral. La primera se caracteriza por ser un caparazón calcáreo subgloboso, con una espiral que se desarrolla hacia la derecha (dextrógiro), la coloración puede ser desde amarilla, parda hasta marrón. El opérculo es una estructura dura, cornea y delgada que se presenta en la parte posterior del pie y cuya función fundamental es la protección y defensa, tanto de depredadores como de cambios ambientales, ya que estos caracoles pueden estar por largos periodos. Por último, la masa visceral contiene el complejo cabeza-pie, el aparato excretor, un aparato digestivo y un aparato reproductor (Fig. 2) (Rangel, 1988; Rangel *et al.*, 2003).

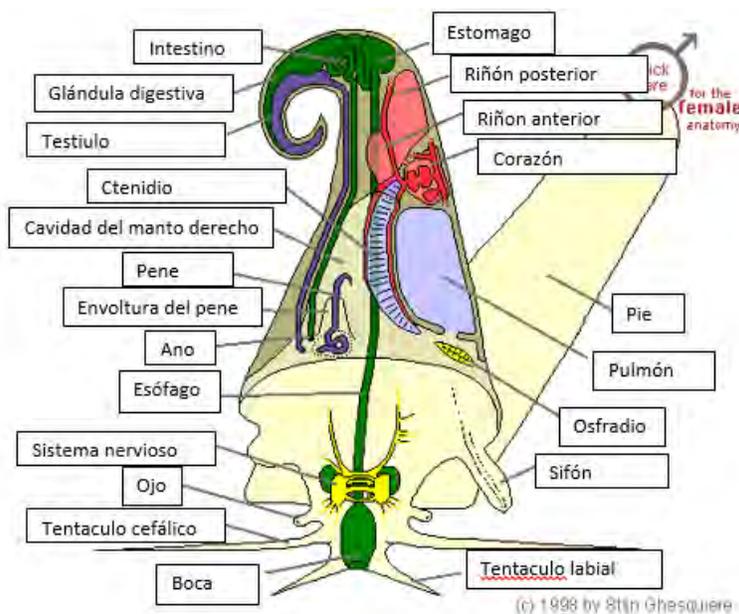


Fig. 2. Anatomía del caracol.

Fuente: Ghesquiere (2007)

Este tipo de caracoles presenta un par de tentáculos grandes y filiformes que actúan como un órgano de recepción, en la base de éstos se encuentran los ojos.



Presentan una rádula que cumple con la función de raspar la vegetación y triturar el alimento. El pie es un músculo grande y carnoso, ligeramente espatulado. Tienen un sifón para llevar al cabo la actividad respiratoria aérea cuando las condiciones de oxígeno en el agua no son las óptimas, dicho tubo funciona mediante una cavidad pulmonar; de igual manera, tienen una branquia mono pectinada para respirar dentro del agua (Perera y Walls, 1996; Rangel *et al.*, 2003).

2.2.4. Hábitat.

Al igual que casi todos los gasterópodos, es una especie gregaria y bentónica que habita sobre todo en los márgenes de cuerpos de aguas lenticas (de poco movimiento) como son lagos y zonas pantanosas. Se les localiza asociados a zonas con mucha vegetación y a cuerpos de agua someros. Su periodo de mayor actividad es durante el día. Cuando habitan cuerpos de agua temporales presentan el fenómeno de estivación para contrarrestar los periodos de seca, para ello cierran la abertura del opérculo y sellan los bordes con una sustancia mucosa la cual se endurece en poco tiempo, evitando así la pérdida de agua, y reduciendo al mínimo su metabolismo. Cuando llueve, el agua sirve como estímulo para que el caracol salga de este estado y continúe de manera normal (Rangel *et al.*, 2003).

2.2.5. Reproducción.

Los pomáceos son organismos dioicos, es decir que presentan sexos separados y no presentan un dimorfismo sexual (Rangel, 1988). En este género, no se ha registrado algún caso de hermafroditismo en condiciones naturales, y únicamente en algunas especies hay un dimorfismo secundario en el tamaño, forma y ancho de la concha (Estebenet y Martín, 2002).

La primera cópula depende del tamaño, edad del caracol y de la disponibilidad de alimento, aunque en realidad la madurez sexual está dada por la edad más que



por el tamaño. Una característica notable en las hembras, es el almacenamiento de esperma hasta por periodos de 140 días, y que pueden ovopositar más de 3000 huevos en ese tiempo (Estebenet y Martín, 2002), razón por la cual, hembras copuladas que se encuentran aisladas en una parcela, pueden seguir ovopositando sin la presencia del macho (Teo, 2003).

La copula y la ovoposición se realizan frecuentemente durante la noche y madrugada, este comportamiento está generalizado en los pomáceos, probablemente regido por la depredación y los escasos riesgos de desecación (Cazzaniga y Estebenet, 1988; Albretcht *et al.*, 1996; Estebenet y Martín, 2002).

La reproducción de esta especie se realiza durante todos los meses del año, lo cual se puede observar claramente por la presencia de puestas recientes. La ovoposición en el campo disminuye notablemente en la época de lluvias y principalmente en los meses de diciembre y enero en los cuales son muy frecuentes los nortes en el sureste de México. Sus eventos reproductivos aumentan en épocas de secas. Lo anterior es debido a que una vez que las puestas se han endurecido, cuando éstas se ponen en contacto con el agua son gravemente dañadas (Rangel *et al.*, 2003).

2.2.6. Alimentación.

Los “caracoles manzana” o pomáceos pueden presentar tres tipos básicos de alimentación, aunque usualmente se consideran herbívoros cuando se alimentan de macrófitas o de hojas verdes. En algunos casos tienen hábitos carroñeros, debido a que se les ha observado alimentándose de peces o animales muertos (Rangel, 1988); otros son micrófagos, consumidores de microalgas que se encuentran adheridas sobre la vegetación llamada perifiton, sobre objetos inertes, o incluso pueden alimentarse de microalgas en suspensión, ya sea por ramoneo o por movimientos ciliares (Perera y Walls, 1996); sin embargo, sus hábitos



alimenticios no se limitan a un solo tipo, ya que bajo ciertas condiciones pueden tener las tres modalidades o cambiar sus preferencias para alimentarse.

También hay autores (Cazzaniga y Estebenet, 1984; Rangel *et al.*, 2003; Vázquez *et al.*, 2011) que clasifican los hábitos alimenticios de la Familia *Ampullariidae* como micrófagos, zoófagos y macrofitófagos, hábitos que no se excluyen mutuamente. Estos autores argumentan que los caracoles micrófagos pastorean sobre los depósitos acumulados en el sedimento y sobre la película de la superficie; mientras que los zoófagos se alimentan de insectos, crustáceos y pequeños peces, aunque han sido más estudiados los hábitos de estos caracoles en la depredación de huevos, desoves y caracoles hospederos del parásito *Schistosoma*; por último, consideran que los macrofitófagos se alimentan esencialmente de vegetación, como diversas fanerógamas acuáticas.

2.2.7. Respiración.

Es considerada una especie anfibia, puede respirar dentro del agua por medio de una branquia mono pectinada (en forma de peine) o fuera de ésta por medio de una cavidad pulmonar localizada aliado izquierdo de la branquia. Es característica también la presencia de un par de sifones que son prolongaciones del manto, los cuales se pliegan hacia arriba formando un tubo, pero nunca se fusionan. El sifón izquierdo es más grande que el derecho. El poseer esta cavidad pulmonar permite a las hembras poder salir del agua a poner sus masas de huevos (Rangel *et al.*, 2003).

2.2.8. Excreción.

Presenta un solo riñón de forma alargada, que también actúa en el control hídrico del cuerpo. El producto de excreción es el amonio (Rangel *et al.*, 2003).



2.3. Importancia ecológica y socioeconómica y aprovechamiento de los caracoles pomáceos a nivel mundial.

Los moluscos han sido apreciados por el hombre desde la prehistoria, habiéndoseles dado diversos usos a través del tiempo. La primera forma de aprovechamiento de los caracoles por el hombre fue como fuente de alimentación directa, la cual sigue vigente hasta hoy. Otros de los usos dados a las conchas fueron como materia prima para la fabricación de herramientas, como símbolo religioso en las ceremonias, como instrumentos musicales, como moneda, como objetos de arte y joyería, tal como se evidencia en los sitios arqueológicos y, más recientemente, se les ha utilizado como material de construcción en las carreteras y caminos, y en la medicina (Naranjo, 2003).

En el aspecto ecológico, los caracoles manzana forman un importante eslabón en la cadena trófica, debido a que son una fuente alimentaria directa para otros animales, soportando una parte importante de la productividad en los ecosistemas tropicales (Vázquez *et al.*, 2011). Los organismos acuáticos como los moluscos tienen una función trófica de importancia en la dinámica de los ecosistemas acuáticos, además son herramientas biológicas esenciales para evaluar la respuesta a contaminantes (Iannacone *et al.*, 2001), ya que son buenos o excelentes indicadores de contaminación ambiental por sus hábitos sedentarios, por su longevidad, por ser resistentes a variaciones, ser abundantes en el área y pueden obtenerse fácilmente (Naranjo, 2003), además que constituyen una parte sustancial en la estructura de los ecosistemas y están estrechamente ligados a la vida del hombre (Vázquez *et al.*, 2011).

En México, las conchas de diversos caracoles se han aprovechado de muy diversas maneras, un ejemplo es en la elaboración de la cal que es un ingrediente usado en la preparación de las tortillas, una tradición proveniente de la Región de los Tuxtla, Veracruz; no obstante, el mayor valor que tienen los caracoles



pomáceos es el de la alimentación, *Pomacea flagellata* y *P. patula catemacensis* son las especies que principalmente se consumen en Veracruz y Tabasco desde la época prehispánica hasta nuestros días (Naranjo, 2003). Esta última especie, conocida como “teogolo” en la región, genera ingresos y fuentes de trabajo debido a que es uno de los principales recursos pesqueros del Lago de Catemaco, Veracruz; en contraste con *P. flagellata*, cuyo consumo se reduce a nivel familiar (Naranjo y García, 1986).

Los principales depredadores de los juveniles y adultos de esta especie son el Gavilán caracolero (*Rostrhamus sociabilis*) y el hombre. Esta especie, al igual que todos los organismos dulceacuícolas, ha sido afectada por diversos tipos de contaminantes. También ha sido sobreexplotada a tal grado de hoy en día se encuentra en veda en Quintana Roo y se empiezan a crear granjas de cultivo intensivo para evitar su extinción, mediante el cultivo que representa un alto potencial para considerarla como un buen prospecto en sistemas de cultivo intensivo.

2.4. Metales pesados.

Estrictamente, y desde el punto de vista químico, los metales pesados están constituidos por elementos de transición y post-transición incluyendo algunos metaloides como el arsénico y selenio. Estos elementos tienen una gravedad específica significativamente superior a la del sodio, calcio, y otros metales ligeros. Por otro lado, estos elementos se presentan en diferente estado de oxidación en agua, aire y suelo y presentan diversos grados de reactividad, carga iónica y solubilidad en agua (INECC, 2009).

Una forma opcional de nombrar a este grupo es como “elementos tóxicos”, los cuales, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), incluyen a los siguientes



elementos: Arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo.

Metales tóxicos son aquellos cuya concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas. Los términos metales pesados y metales tóxicos se usan como sinónimos pero sólo algunos de ellos pertenecen a ambos grupos.

Algunos metales son indispensables en bajas concentraciones, ya que forman parte de sistemas enzimáticos, como el cobalto, zinc, molibdeno, o como el hierro que forma parte de la hemoglobina. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones.

Serán objeto de esta tesis los metales: Hg, Pb, Cd y Zn.

a) Mercurio (Hg)

El mercurio se genera de manera natural en el medio ambiente y se da en una gran variedad de formas. Al igual que el plomo y el cadmio, el mercurio es un elemento constitutivo de la tierra, un metal pesado.

Cuando el mercurio se combina con carbono se forman compuestos conocidos como compuestos "orgánicos" de mercurio u organomercuriales. Existe una gran cantidad de compuestos orgánicos de mercurio (como el dimetilmercurio, fenilmercurio, etilmercurio y metilmercurio), pero el más conocido de todos es el metilmercurio.

Varias formas de mercurio se dan de manera natural en el medio ambiente. Las formas naturales de mercurio más comunes en el medio ambiente son el mercurio metálico, sulfuro de mercurio, cloruro de mercurio y metilmercurio. Ciertos microorganismos y procesos naturales pueden hacer que el mercurio en el medio ambiente pase de una forma a otra.



El compuesto orgánico de mercurio más común que generan los microorganismos y procesos naturales a partir de otras formas es el metilmercurio. El metilmercurio es particularmente inquietante porque puede acumularse (bioacumulación y biomagnificación) en muchos peces de agua dulce y salada comestibles, así como en mamíferos marinos comestibles, en concentraciones miles de veces mayores que las de las aguas circundantes (INECC, 2009).

En la agricultura se usan fungicidas de compuestos organomercuriales como el 2-cloro-4-hidroxifenilmercurio y el acetato de 2-(fenil-mercuriamino) etanol, y fungicidas de follaje como el acetato de 2-(fenil-mercuriamino) etanol.

El cloruro mercúrico, HgCl_2 , es muy tóxico y peligroso por su gran solubilidad en agua (71.5 g/L a 25°C). El fulminato mercúrico, $\text{Hg}(\text{ONC}_2)_2$, es soluble en agua, en solventes orgánicos y se usa como detonador de explosivos. El acetato fenilmercúrico se usa en pinturas látex como conservador y como contra el ataque de hongos o el enmohecimiento.

b) Plomo (Pb)

Se encuentra de manera natural, pero una buena parte de su presencia en el medio ambiente se debe a su uso histórico en pinturas y gasolinas, así como a diversas actividades mineras y comerciales.

El plomo existe tanto en forma orgánica como inorgánica.

Plomo inorgánico. El plomo que se encuentra en pintura vieja, en el suelo y en varios productos que se describen a continuación es plomo inorgánico. Los gases de combustión producidos por la gasolina con plomo también contribuyen a la contaminación ambiental con plomo inorgánico. Por esta razón, este documento está enfocado principalmente al plomo inorgánico.



Plomo orgánico. La gasolina con plomo contiene plomo orgánico antes de que el combustible sufra combustión. Hoy en día, gracias a que a partir de 1976 en Estados Unidos se ha eliminado el plomo de las gasolinas, la exposición al plomo orgánico está restringida a los contextos ocupacionales. No obstante, el plomo orgánico puede ser más tóxico que el inorgánico puesto que el cuerpo lo absorbe más fácilmente. Es por esto que la exposición potencial al plomo orgánico debe ser tomada especialmente en cuenta.

El plomo puede aparecer en el agua potable al desprenderse de las tuberías, las llaves y pedazos de soldadura que contienen plomo. Estas estructuras pueden encontrarse en edificios viejos.

Gran parte del plomo se obtiene por reciclado de chatarras como las placas de baterías y de las escorias industriales como soldaduras, metal para cojinetes, recubrimientos de cables, etc.

Las áreas urbanas y cercanas a carreteras han sido la principal fuente de Pb antropogénica. La contaminación del agua por plomo no se origina directamente por el plomo sino por sus sales solubles en agua que son generadas por las fábricas de pinturas, de acumuladores, por alfarerías con esmaltado, en fototermografía, en pirotecnia, en la coloración a vidrios o por industrias químicas productoras de tetraetilo de plomo (se usa como antidetonante en gasolinas) y por algunas actividades mineras, etc.

c) Cadmio (Cd)

El cadmio es un elemento natural de la corteza terrestre. Generalmente se encuentra como mineral combinado con otros elementos tales como oxígeno (óxido de cadmio), cloro (cloruro de cadmio) o azufre (sulfato de cadmio, sulfuro de cadmio). Se encuentra principalmente en el suelo y en el agua en bajas concentraciones (Duffus, 1983).



La población abierta se expone a él principalmente a través de la cadena alimenticia, aunque también por el consumo de tabaco contaminado con cadmio presente en los fertilizantes fosfatados. El cadmio se acumula en el organismo humano, fundamentalmente en los riñones, causando hipertensión arterial (INECC, 2009). La absorción pulmonar es mayor que la intestinal, por lo cual, el riesgo es mayor cuando el cadmio es aspirado.

La contaminación del agua por cadmio es provocada por las principales áreas de aplicación que arrojan sus desechos a las alcantarillas, como son el acabado de metales, la electrónica, la manufactura de pigmentos (pinturas y agentes colorantes), de baterías (cadmio níquel), de estabilizadores plásticos, de plaguicidas (fungicidas), la electro deposición o la aleaciones de hierro, en la producción de hierro y zinc, y en el uso de reactores nucleares.

d) Zinc (Zn)

El zinc constituye sólo el 0.004% de la corteza terrestre. Su uso más importante consiste en recubrir otros metales, particularmente en el hierro y el acero galvanizados. El zinc (Zn) está presente en la corteza terrestre en una concentración media de 70 µg/g, donde no se suele encontrar de forma libre, sino formando complejos con sulfuros, carbonatos y óxidos.

Se utiliza en la fabricación de hardware y componentes eléctricos. También se emplea para formar aleaciones con otros metales, como el níquel, aluminio y bronce. Otro uso, también muy extendido, es para galvanizar, previniendo así la corrosión de otros metales como el hierro. Derivados del Zn, como el óxido de Zn se utiliza en pinturas, cosméticos, productos farmacéuticos, plásticos, baterías, textiles y el sulfuro de Zn se utiliza en fluorescentes, rayos X y pantallas de TV.

Los factores que influyen en la toxicidad de los metales en organismos acuáticos pueden ser divididos en dos principales categorías: factores bióticos y abióticos:



2.4.1. Factores bióticos.

2.4.1.1. Tolerancia al metal.

Muchos organismos pueden responder fisiológicamente, aclimatándose a la toxicidad del metal, si son pre-expuestos a concentraciones sub-letales de metales. Los organismos aclimatados son generalmente más tolerantes a toxicidades que aquellos que no son expuestos previamente. Los mecanismos biológicos de defensa contra metales pesados envuelven por ejemplo, la secreciones de mucosidad en peces; el almacenamiento de metales en vesículas o glándulas dentro de órganos como el hígado y el riñón; la producción en bacterias, hongos, plantas y mamíferos de metalotioneínas, que son proteínas ricas en cisteínas que se ligan a los metales, tal como Zn (II), Cd (II), Hg (II); la conversión del metal a formas volátiles. La tolerancia adquirida parece ser temporal y específica al metal y obviamente depende de la estructura de los organismos.

2.4.1.2. Etapas de vida y tamaño de los organismos.

Estos factores tienen un efecto importante en la sensibilidad hacia la toxicidad del metal. Generalmente organismos adultos y de mayor tamaño son más tolerantes que aquellos de menor tamaño y que están en etapas de vida iniciales. Hay excepciones de formas en estados iniciales que son más resistentes a los metales.

2.4.1.3. La toxicidad entre especies.

Es un parámetro importante para la conducción de pruebas de toxicidad. En ambiente acuático, las algas, bacterias, plantas superiores, invertebrados y vertebrados, todos ocupan su propio nicho naturalmente y no reaccionan de la misma forma con las sustancias tóxicas.



2.4.1.4. La nutrición de los organismos.

Es otro factor con una fuerte influencia en la toxicidad, si el metal se encuentra disponible (agua, sedimento, etc.) o biodisponible (organismos del cual se alimenta, plantas o vegetales, etc.) en el hábitat, el organismo bioacumula metales en sus tejidos.

2.4.2. Factores abióticos.

2.4.2.1. pH

El pH afecta a la especiación química y a la movilidad de muchos metales pesados. Un cambio en la especie química del mismo metal, bajo influencia del pH, puede ejercer diferente toxicidad. Estudios sugieren que toxicidades de Cd, Cu y Zn crece con el aumento del pH, especialmente de pH 4 a 7, en cuanto mientras que otros trabajos indican que la toxicidad del Hg, Ni, Mn, Cu y Pb aumentan con el decrecimiento del pH.

El pH del agua influye en el sentido que determina la proporción del metal total que está en forma catiónica, que es la que generalmente se considera tóxica para las especies piscícolas. Además, los iones H⁺ compiten con los sitios de unión de metales pesados en las branquias de los peces. Los trabajos científicos que estudian esta relación encuentran que a medida que disminuye el pH acuático, los metales pasan a formas iónicas más fácilmente absorbibles por los peces y otros organismos. Es decir, a pH ácidos existe una mayor solubilidad y por tanto disponibilidad de los iones metálicos, por lo que aumenta la toxicidad de los metales pesados.



2.4.2.2. Variación de temperatura.

El valor de la temperatura es un criterio de la calidad del agua para la protección de la vida acuática y, también es un parámetro establecido como límite máximo permitido en las descargas de aguas residuales.

También puede afectar la toxicidad de los metales en organismos acuáticos y cuya variación estaminal debe ser considerada. La mayoría de estudios indican que la toxicidad crece con un aumento de temperatura. La asimilación de metales traza por organismos marinos también cambia conforme la variación estacional de la temperatura.

La temperatura influye sobre la solubilidad de los metales y al igual que el contenido de oxígeno disuelto afecta de manera decisiva tanto a la distribución como al estado fisiológico de la biota del sistema acuático del que va a depender la respuesta frente al tóxico.

En estudios realizados por la OMS en percas (*Lepomis macrochirus*) expuestas a una solución de Pb, a dos regímenes diferentes de temperatura (10 y 20-25°C) durante 42 días en agua de mar normal, se encontró que si se aumentaba la temperatura, el contenido de Pb se elevaba (Palacios, 1997).

2.4.2.3. Oxígeno disuelto.

La presencia de OD es esencial en el agua; proviene principalmente del aire. Niveles bajos o ausencia de oxígeno en el agua, puede indicar contaminación elevada, condiciones sépticas de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa; por ello se le puede considerar como un indicador de contaminación. En algunos casos, el contenido de OD puede influir en las propiedades corrosivas del agua, dependiendo de la temperatura (a mayor temperatura, mayor corrosión) y del pH (a menor pH, mayor corrosión). Si este es el caso, en aguas que tienen



suficiente contenido en calcio (Carbonato de Calcio), se reduce la corrosión y se eleva el pH al valor de saturación del carbonato cálcico.

Estudios han mostrado que una disminución en la concentración de oxígeno disuelto aumenta la toxicidad de los metales.

2.4.2.4. Conductividad eléctrica

La conductividad del agua brinda una estimación acerca de la concentración aproximada de las sales minerales presentes. La resistencia eléctrica de las soluciones disminuye cuando aumenta el contenido de sales solubles, y por lo tanto la conductancia aumenta, la conductividad tiene dependencia de la temperatura (Prichet y Fisher, 1987).

2.4.2.5. Sedimentos.

Los sedimentos son un factor fundamental en el control de los ambientes costeros ya que generalmente presentan concentraciones considerables de elementos traza y nutrientes. La disponibilidad que tienen los metales pesados para asociarse a la biota depende de la naturaleza física y química de los sedimentos así como de la calidad del agua. El conocimiento de las concentraciones y distribuciones de los metales trazas en sedimentos puede, por lo tanto, jugar un rol clave en la detección de fuentes de contaminación en sistemas acuáticos.

En general, los metales traza están asociados con las partículas pequeñas de estos materiales.

Esta tendencia es atribuida predominantemente a la adsorción, co-precipitación, y complejación de metales en las capas superficiales de la partícula. Como es conocido las pequeñas partículas tienen elevada área superficial con relación a su volumen y por consiguiente pueden retener altas concentraciones de metales. El área superficial específica de los sedimentos es dependiente de los parámetros

Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo. Moreno-Caraveo, 2014.



granulométricos y la composición mineral. Entre las fracciones que se pueden separar para realizar los análisis la mayoría de autores recomiendan analizar la porción $< 63 \mu\text{m}$ por las siguientes razones (Palacios, 1997):

- Los metales traza de origen antropogénico, se encuentran asociados a estas partículas.
- Existe una elevada relación entre los contenidos de elementos determinados en esta fracción y los que se encuentran en suspensión. Es importante destacar, que la suspensión es la forma de transporte más importante de las partículas que están presentes en los sedimentos.
- La técnica de tamizado empleada para separar esta fracción, no altera las concentraciones de metales, además, es rápida y sencilla.
- Son numerosos los estudios de metales pesados en sedimentos realizados en la fracción mencionada anteriormente, lo que permite una mejor comparación de los resultados obtenidos.

2.4.3. Bioacumulación.

Cuando la concentración de una sustancia aumenta en el organismo expuesto en función del tiempo; por ejemplo, que las concentraciones de una sustancia específica son más altas en los peces adultos que en los jóvenes del mismo sitio se dice que hay bioacumulación (Palacios, 1997).

El factor de bioacumulación es la relación (en L/kg) de concentración de una sustancia en los tejidos de un organismo acuático a su concentración en el ambiente del agua, en situaciones en las que están expuestos tanto en el organismo como su comida y la proporción no cambia sustancialmente con el tiempo (EPA, 1995).



2.4.4. Bioconcentración.

Es el proceso por el cual una sustancia alcanza en un organismo una concentración más alta que la tiene en el ambiente al cual dicho organismo está expuesto (OPS, 2005). Algunas sustancias tiene más afinidad por los tejidos de ciertos organismos que por el agua, por lo que pueden alcanzar concentraciones más elevadas en esos organismos que en el agua (Palacios, 1997).

La concentración de equilibrio de un contaminante en los organismos se puede estimar al multiplicar la concentración de un producto químico en el agua superficial por el factor de concentración de organismos para ese producto. Este parámetro es un determinante importante de la absorción humana a través de la vía de ingestión de alimentos acuáticos (OPS, 2005).

La relación (en L/kg) de concentración de una sustancia en los tejidos de un organismo acuático a su concentración en el ambiente del agua, en situaciones en las que se expone el organismo solo a través del agua y la proporción no cambia sustancialmente con el tiempo (EPA, 1995).

2.4.5. Biomagnificación.

Es el aumento en la concentración de una sustancia sucesivamente en los eslabones de la cadena trófica; como resultado, sus concentraciones en los organismos que están al final de dichas cadenas son muchos más elevadas que en los organismos que están en la base de ellas (Palacios, 1997).

2.5. Fuentes de emisión y generación de Hg, Pb, Cd y Zn

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. En general esto puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al

Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo. Moreno-Caraveo, 2014.



ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares. Además, la inadecuada disposición de residuos metálicos también ha ocasionado la contaminación del suelo, agua superficial y subterránea y de ambientes acuáticos.

Tanto las fuentes naturales como antropogénicas pueden contribuir importantemente a la emisión de elementos metálicos a la atmósfera. Cabe señalar que al comparar las emisiones globales, la emisión de elementos como selenio, mercurio y manganeso se realizan en su mayoría por fuentes naturales; sin embargo, en el plano regional las fuentes antropogénicas puede contribuir de manera importante y estos metales se convierten en contaminantes en la escala local.

Entre las principales fuentes de emisión de los metales de mayor preocupación en México se tiene:

Mercurio

- Actividades mineras de extracción de oro, plata y cobre.
- Fundición primaria y secundaria de metales.
- Producción de carbón y coque.
- Combustión de combustóleo y carbón en la generación de electricidad.
- Industria de cloro-sosa.
- Incineración de residuos peligrosos y biológicos infecciosos.
- Fungicidas usados en la agricultura

Plomo

- Fundición primaria y secundaria de metales.
- Loza vidriada
- Producción de pinturas
- Elaboración de latas soldadas con plomo



- Industria electrónica y de cómputo
- Uso de gasolina con plomo
- Chatarras (placas de batería).
- Soldaduras y recubrimientos de cables.

Cadmio

- Baterías Recargables de Níquel/Cadmio (Ni/Cd):
- Fertilizantes
- Pigmentos y Estabilizadores en Plástico y PVC
- Pigmentos en Pinturas
- Galvanización
- Catalizadores y Conservadores en la Industria del Plástico
- Elaboración de Pinturas
- Aleaciones
- Plaguicidas (fungicidas)

Zinc

- Vertidos de las plantas industriales
- Recubrimiento de otros metales (galvanizado)
- Componente de plaguicidas
- Pinturas
- Cosméticos
- Productos farmacéuticos

A nivel local los efluentes domésticos ocupan la mayor causa de contaminación de los cuerpos de agua en conjunto con la aplicación de fertilizantes y plaguicidas en los campos agrícolas y ganaderos que de alguna manera se filtran o mueven por el suelo (Tabla 1).



Tabla 1. Principales orígenes de algunos metales pesados.

ORIGEN	Sb	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
Baterías eléctricas			*	*			*	*	
Curtido de pieles				*	*				
Eléctrica y electrónica			*	*	*		*	*	*
Farmacéuticas		*		*	*				*
Fertilizantes		*	*	*	*	*	*	*	*
Fotografía			*	*	*			*	
Fundiciones		*	*	*	*		*	*	*
Galvanizados			*	*	*		*	*	*
Minería	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Motores de vehículos			*	*	*				*
Municiones y explosivos				*	*			*	
Papelería y similares		*		*	*	*		*	*
Plaguicidas									
Pigmentos, tintas, pinturas	*		*	*	*		*	*	*
Plásticos	*		*		*				*
Petroquímica	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Vitrocerámica			*				*	*	
Textiles	*			*	*				*

Fuente: Páez, 2005

La dinámica de los metales pesados en un cuerpo de agua depende de varios factores en conjunto (Fig. 5), entre ellos la biota acuática, reacciones químicas, la aportación de contaminantes y los factores abióticos.

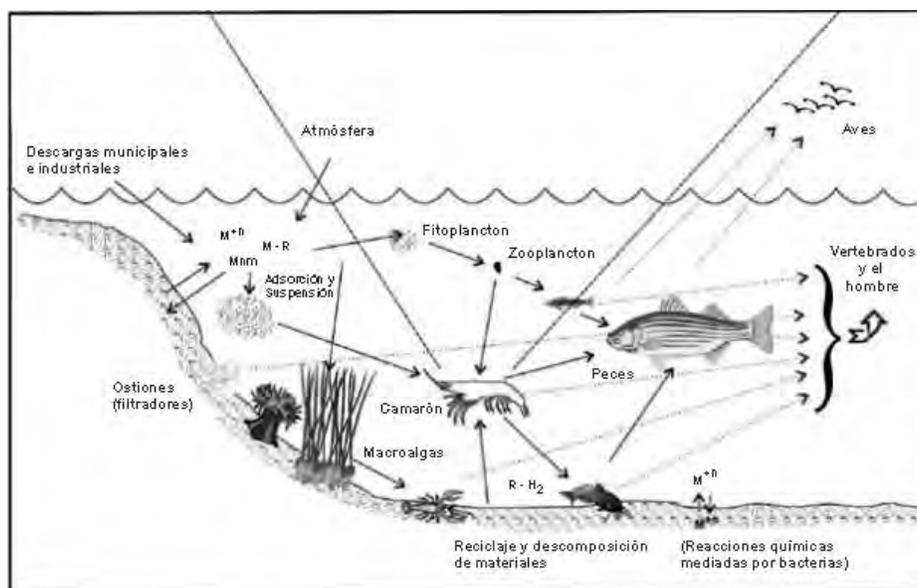


Fig. 3. Rutas y bioacumulación de los metales pesados en el ambiente costero y lagunar $M+n$ ión metálico libre, $M+n$ pares iónicos, $M-R$ complejos metálicos.

Fuente: Botello, 2005.

2.6. Acumulación y efectos de metales pesados en organismos acuáticos.

Los metales pesados se acumulan en los tejidos de los organismos y la exposición está relacionada con problemas a la salud a lo largo de la historia como retrasos en el desarrollo, cáncer, daños al riñón, e incluso, con casos de muerte (Deveze, 2011).

La exposición prolongada a niveles más bajos de cadmio en el aire, los alimentos o el agua produce acumulación de cadmio en los riñones y posiblemente enfermedad renal. Otros efectos de la exposición prolongada consisten en daño del pulmón y fragilidad de los huesos.

Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo. Moreno-Caraveo, 2014.



El mercurio es el metal típicamente bioacumulado en los componentes de la cadena alimentaria, niveles bajos en el agua (mg/L) reducen la biomasa y la diversidad de las comunidades algales; en crustáceos, los efectos del mercurio son más pronunciados que los provocados por otros metales. Los efectos crónicos y agudos del plomo incluyen daños histopatológicos, deformidades, neurotoxicidad, anemia hemolítica e inhibición de la síntesis de la hemoglobina y ocurren en peces aún en concentraciones del orden de 8 mg/L en el agua.

Los efectos de éstos elementos en los organismos se asocian con perturbaciones de los sistemas enzimáticos en los compartimentos intracelulares. El cadmio se acumula en los tejidos y lesiona principalmente los mecanismos de regulación de iones (Páez, 2005).

El cadmio se acumula principalmente en el hígado y riñón de los organismos y se tiene conocimiento que lesiona principalmente los mecanismos de regulación de los iones más que afectar las funciones respiratorias nerviosas (Hellawell, 1989).

Ramírez *et al.*, (1989) señalan que en todas las concentraciones probadas, el cadmio produjo un incremento en el consumo de oxígeno, lo cual ha sido interpretado como resultado de un aumento en la actividad locomotora y en el sistema de ventilación. Estos resultados hacen sugerir a los autores, que ocurre una alteración en los mecanismos que controlan las transferencia de oxígeno, la cual puede ser el resultado de una reducción en la eficiencia de la transferencia de oxígeno sobre las branquias, o bien, de una constricción vascular en las capilaridades branquiales, lo cual a su vez provoca una cierta irregularidad en el intercambio de gases.

Los efectos crónicos y agudos del plomo incluyen efectos histopatológicos, deformidades neurotoxicidad, anemia hemolítica e inhibición en la síntesis de hemoglobina, estos efectos ocurren en peces, aun en concentraciones tan bajas del elemento en el agua como de 8 mg/L (Davies *et al.*, 1976).



Debido a que el Pb es un metal electropositivo, tiene una alta afinidad por los grupos sulfhidrilo y enzimas que dependen de esos grupos son inhibidas en presencia del Pb. Además, como metal divalente, es similar en algunos aspectos al Ca y puede competir en los procesos celulares tales como la respiración al nivel de las mitocondrias y algunas funciones neurológicas (Landis y Yu, 1999). Por otro lado, también se sabe que el Pb actúa con los ácidos nucleicos, provocando un incremento o decremento en la síntesis proteica.

El zinc forma parte integral de ciertas enzimas como la anhidrasa carbónica, carboxipeptidasa y varias hidrogenasas. Entre los metales, al Zn se le considera de relativa baja toxicidad para los invertebrados acuáticos (Bianchini y Carvalho, 1999).



III. ÁREA DE ESTUDIO

La Laguna de Bacalar (Fig. 5) está ubicada en las coordenadas 18° 40' 47'' N; 88° 23' 05'' W a un costado del pueblo de Bacalar, a unos 35 km al norte de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. Es una enorme extensión de aguas poco profundas, con arena blanca y muy suave. Tiene una altitud de 10 metros sobre el nivel del mar.

Esta laguna es parte de un sistema lagunar de aproximadamente 55 kilómetros de largo que se comunica con la bahía de Chetumal por medio del Río Hondo y el estero de Chaac (Pueblos de México, 2012).

El área geográfica es un lugar susceptible al embate de tormentas y huracanes de Junio a Noviembre. Las precipitaciones anuales medias son de 1300 mm. El clima es del tipo Aw (x') i, que corresponde a un cálido sub-húmedo con lluvias en verano y parte del invierno (Olivera, 2009). La temperatura media anual oscila entre los 25.5 °C y 26.5 °C. La oscilación térmica es menor de 5 °C, correspondiendo a Enero ser el mes menos cálido, en tanto que el de mayor temperatura, fluctúa entre Abril y Mayo. Los vientos dominantes son los alisios (ESE) en verano y "nortes" en otoño-invierno.

Para el Sistema lagunar de Bacalar es fundamental la existencia de una serie de fracturas geológicas en el terreno, ya que estas determinan de manera significativa la dinámica geohidrológica de toda la Región (POET, 2005). Esta dinámica en la tectónica de placas en el sur de Quintana Roo la que produjo en la región Bacalar una zona de numerosas fracturas o grietas geológicas, las cuales presentan un patrón general de orientación SW-NE. Lo que ha contribuido significativamente a establecer una serie de aportes y drenaje de agua dulce desde la Laguna de Bacalar hacia los cuerpos lagunares vecinos, el Río Hondo y la Bahía de Chetumal.

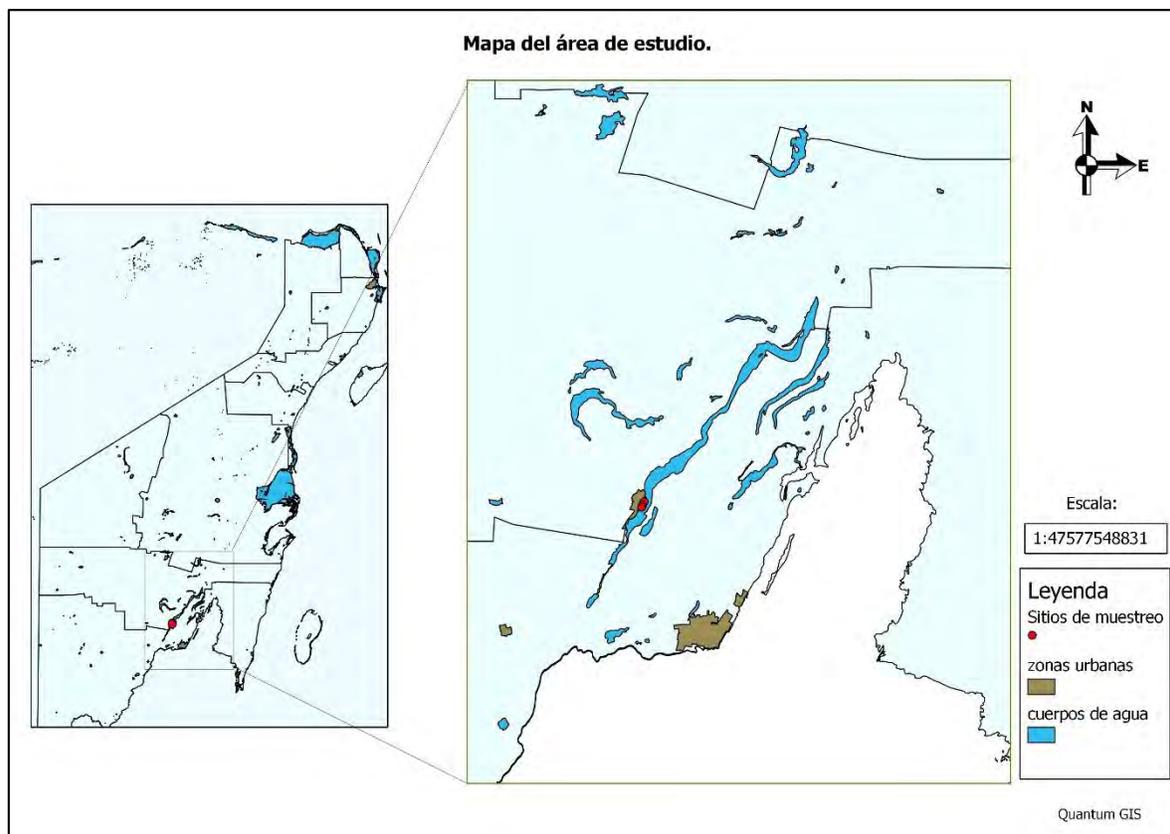


Fig. 4. Mapa del área de estudio: Laguna de Bacalar.

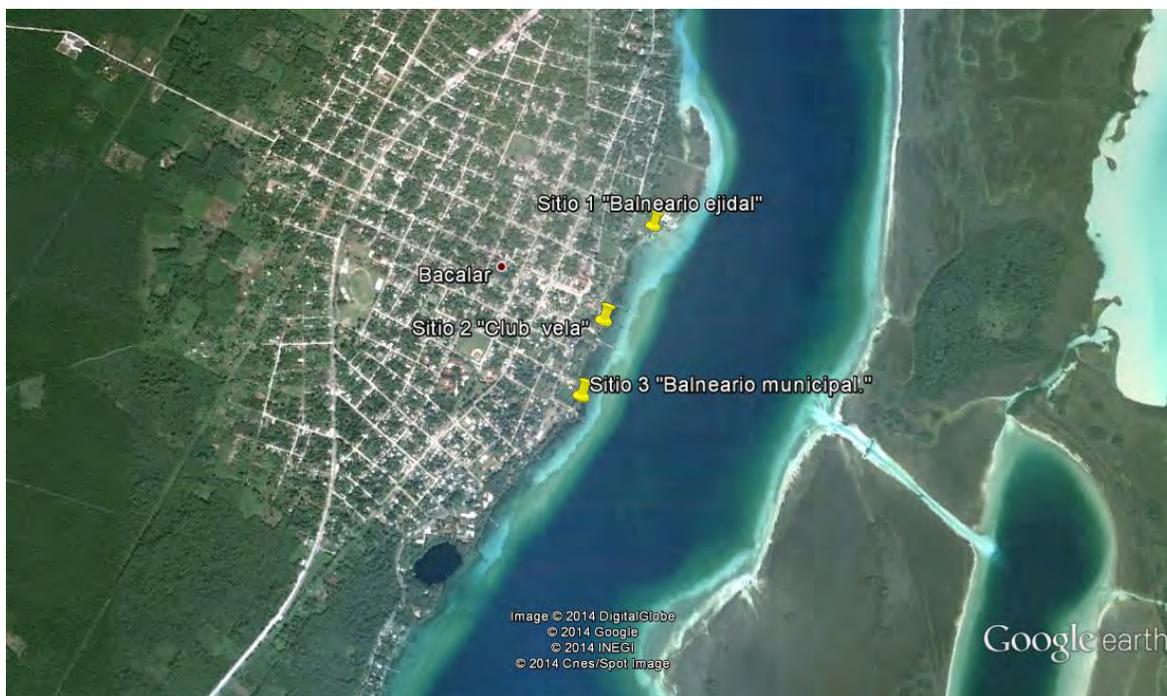


Fig. 5. Sitios de muestreo en la zona de estudio.



IV. METODOLOGÍA

4.1. Laboratorio

4.1.1. Reactivos

Los reactivos utilizados en el tratamiento de las muestras fueron de grado analítico (grado HPLC):

- Ácido nítrico J.T. Baker, al 69 – 70 % y $d = 1.42 \text{ Kg/L}$.
- Ácido Clorhídrico JT. Baker, 36.5 – 38 %.
- Agua bidestilada para lavado de los utensilios.
- Patrones (estándares) 1000 +/- 0.1 ppm de cada elemento metálico. Marca Varian.

4.1.2. Equipo

Los equipos e instrumentos utilizados en el presente trabajo son:

- Espectrómetro de Absorción Atómica, de doble rayo Varian, modelo SpectrAA 220, con llama aire/acetileno y generador de hidruros VGA 77.
- Balanza analítica Sartorius BL 120 S (0.1 mg).
- Manta de calentamiento PYRO MULTI-MAGNESTI con regulación de temperatura y se utilizó fibra de vidrio para uniformar la temperatura en todo el recipiente.
- Conductímetro portátil HANNA modelo HI9635 en $\mu\text{S/cm}$ y con ajuste de temperatura, calibrado con cloruro de potasio (KCl) al 0.01M.
- Oxímetro portátil HANNA modelo HI3142, previamente calibrado antes de cada muestreo.
- pH-metro portátil modelo HANNA HI 9025C de lectura digital a la centésima, con un electrodo combinado de vidrio-calomelano.
- Pipetas automáticas de 50, 100, 200 y 1000 μL . Marca Oxford
- Pipetas de 10 y 1 mL.



- Matraces balón base plana 250 mL
- Vasos de precipitado de 50 ml.
- Condensador de reflujo tipo rosario.
- Bisturí
- Regla
- Pinza de plástico.
- Matraces balón 100 ml.
- Parrilla múltiple de calentamiento.
- Tamiz con abertura de malla de 63 μ m.

4.2. Trabajo en campo

4.2.1. Diseño de muestreo

Se estableció el diseño de muestreo en 3 puntos de la Laguna de Bacalar, el criterio para la ubicación de la red de estaciones de muestreo se basó la ubicación de los balnearios principales y puntos con mayor descarga de aguas pluviales, considerando que estos puntos se ubican paralelos a la zona centro del área urbana.

Las 3 estaciones de muestreo (Fig. 6) se ubicaron geográficamente a lo largo de la orilla de la laguna:

SITIO 1. Se ubicó frente al Balneario Ejidal. Es uno de los lugares más concurridos por los visitantes y habitantes locales. Se llevan a cabo actividades recreativas como recorridos en lanchas y motos acuáticas, además de nado y snorkeling. Presenta influencia directa de las descargas de aguas pluviales provenientes del área urbana de la ciudad de Bacalar. El agua se ve clara, distinguiéndose las tonalidades que caracterizan a la laguna. El sedimento es de color gris y arenoso.

SITIO 2. Se ubicó frente al Club de Vela, mismo que se ubica a un costado de la Terminal Marítima de los Marineros y frente al Fuerte de Bacalar. La principal

Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo. Moreno-Caraveo, 2014.



actividad llevada a cabo en este lugar es el canotaje, es el punto de partida de kayaks y lanchas y barcos de la Marina, además existe un restaurant. El agua se ve sucia y con olor fétido y el sustrato es fangoso y de color café oscuro. Está ubicado a 472 m de distancia con respecto al sitio 1.

SITIO 3. Se ubicó frente al Balneario Municipal. A diferencia de los Sitios 1 y 2, es el lugar con menor presencia de visitantes. Sin embargo, también se pudo observar la presencia de algunas embarcaciones menores que ofrecen servicios de recorridos por grupos a los visitantes a lo largo de la laguna. El agua se ve un poco turbia y el sustrato es de pequeños fragmentos de madera y gravilla. Se ubica a 335 m de distancia con respecto al sitio 2 y aproximadamente a 900 m del Sitio 1.

En cada estación se colectaron entre 2 y 4 caracoles, una réplica de sedimento y se analizaron los parámetros físico químicos *in situ*.

Las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo se muestran en la siguiente tabla (Tabla 2):

Tabla 2. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.

No.	Sitio	Latitud	Longitud
1	Balneario Ejidal	18°40'46.35''N	88°23'10.94''O
2	Club de vela	18°40'32.64''N	88°23'18.30''O
3	Balneario municipal	18°40'22.18''N	88°23'21.53''O

Fuente: Adaptación propia.

Tanto los organismos como los sedimentos, se recolectaron en bolsas de polipropileno, previamente lavadas con ácido nítrico diluido al 10%, siguiendo el Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo. Moreno-Caraveo, 2014.



criterio propuesto por Word y Mearns (Word y Mearns, 1979) y posteriormente fueron colocados en una nevera a temperatura de 5° C para su conservación.

Se llevaron a cabo dos muestreos. El primer muestreo correspondió a la temporada de seca (febrero 2014) y el segundo muestreo a la temporada de lluvia (mayo 2014).

4.2.2. Muestreo de Sedimentos

Se tomó una muestra de sedimento por estación, a una distancia de 10 metros de línea de costa. La metodología para el diseño de muestreo se tomó de (Cabrera, Maldonado y Romero, 2004). Cabe hacer mención que el sedimento se colectó en un punto medio a la ubicación de colecta de los caracoles con la finalidad de asegurar condiciones de sustrato similares sobre el cual se desplazan.

Las muestras de sedimentos se tomaron en un área de 20 cm de diámetro y 15 cm de profundidad aproximadamente, con ayuda de un nucleador casero.

4.2.3. Colecta de los Organismos

Se colectaron 26 organismos para objeto del presente estudio. Para la temporada de seca, se colectaron manualmente 4 organismos en el Sitio 1, tres individuos en el Sitio 2 y dos organismos en el Sitio 3.

En la temporada de lluvia, se colectaron tres organismos en el Sitio 1, cuatro en el Sitio 2 y cuatro en el punto Sitio 3.

4.2.4. Medición de parámetros

Se determinaron “*in situ*” los parámetros fisicoquímicos Temperatura, Oxígeno disuelto (OD), pH y conductividad, para cada sitio de muestreo empleando el equipamiento indicado, de acuerdo a lo establecido en las siguientes normas:



NMX-AA-007-SCFI-2000 para temperatura.

NMX-AA-008-SCFI-2000 para pH.

NMX-AA-012-SCFI-2001 para oxígeno disuelto.

NMX-AA-093-SCFI-2000 para conductividad.

Para cada sitio se colectó agua en un frasco de polipropileno, previamente lavado con ácido nítrico diluido al 10%, y se llevó a la superficie para realizar las mediciones.

El equipo utilizado para la medición del pH consistió en un potenciómetro portátil marca HANNA modelo HI991003 de lectura digital a la centésima, con un electrodo combinado, previamente calibrado. La conductividad en el agua se obtuvo con un conductímetro portátil marca HANNA modelo HI9635 en $\mu\text{S}/\text{cm}$, con ajuste de temperatura, calibrado con cloruro de potasio (KCl) 0.01M. La medición del OD se realizó mediante un oxímetro portátil marca HANNA modelo HI9142, previamente calibrado.

4.3. Preparación y análisis de muestras de organismos y sedimento

Tanto organismos como sedimentos colectados fueron etiquetados y colocados en una hielera (5 °C), cada una en sus respectivas bolsas de polietileno, para conservar su estado original hasta el momento del análisis. Previo a su disección mediante digestión húmeda (Perkin-Elmer, 1996) los caracoles fueron medidos, pesados y lavados en el laboratorio.

La etiqueta principal de las muestras consta de 4 caracteres:

- S#C#, para muestras de caracol. La letra S significa el Sitio, seguida del número que corresponde al punto donde se colectó la muestra, la letra C



indica que es una muestra de caracol y finalmente se añade el número para indicar el número de organismo colectado en ese sitio. Por ejemplo, la muestra S3C2, significa que fue el segundo caracol colectado en el Sitio 3.

- S#S#, para muestras de sedimento. La letra S significa el Sitio, seguida del número que corresponde al punto donde se colectó la muestra, la letra S indica que es una muestra de sedimento y finalmente se añade el número para indicar el número de réplica colectada en ese sitio. Por ejemplo, la muestra S2S1, indica que es la réplica número uno colectada en el Sitio 2.

Las muestras de sedimento se colocaron sobre papel filtro y se dejaron reposar por un lapso de tres días con la finalidad de que se eliminara la humedad total previo al proceso de tamizado. Posteriormente los sedimentos se secaron y tamizaron empleándose la fracción menor de 63 μm para su posterior digestión pseudototal de acuerdo a ISO-11466, (1995) mediante un tamiz con una abertura de malla de 63 μm . Esta fracción incluye arcillas (<2 μm) y limos (2-63 μm).

4.3.1. Digestión de los organismos

Después de ser lavados los caracoles, se procedió a la extracción del tejido blando mediante un bisturí.

Fueron digeridos mediante Análisis de pescados y mariscos: Digestión Húmeda, establecida en los Métodos Analíticos para Espectroscopía de Absorción Atómica (Perkin-Elmer, 1996).

Se pesó 3 g de tejido blando y se metió a un matraz. Se añadió 5 ml de HNO₃ y después 5 ml de HClO₄ a la muestra. Se permitió que la reacción se llevara a cabo. Posteriormente se calentaron las muestras a 60°C durante 30 minutos, se dejaron enfriar, se añadieron 10 ml de HNO₃ y se regresaron a la parrilla de calentamiento a 120° C y se incrementó lentamente hasta alcanzar los 150 °C. Se removieron los matraces cuando las muestras se pusieron negras, se dejaron



enfriar y se añadió 1 ml de H₂O₂ hasta que las muestras presentaron un color claro. Finalmente se agregaron 50 ml de agua desionizada.

Finalmente se almacenaron previo a su análisis en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

4.3.2. Digestión de los sedimentos

Las muestras de sedimento se procesaron de acuerdo a lo establecido a la norma ISO-11466 (1995).

Se pesó 3 gr de sedimento seco (fracción menor de 63 µm) en un matraz esférico de fondo plano de 250 ml. Se añadieron 21 ml de ácido clorhídrico y 7 ml de ácido nítrico, mezclando suavemente para evitar la formación de vapores. Se calentó la digestión a reflujo en una manta de calentamiento múltiple, con un arreglo en serie, durante 2 horas a temperatura constante. Posterior al calentamiento se dejaron reposar durante 16 horas a temperatura ambiente para permitir una oxidación lenta de la materia orgánica. Una vez digeridas las muestras se filtraron a un matraz de balón base y se diluyó a 100 ml con agua destilada.

Finalmente se almacenaron previo a su análisis en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

4.4. Análisis de metales pesados.

Se efectuaron los análisis de metales pesados (Hg, Cd, Pb y Zn) con un Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) de la marca Varian modelo Spectro AA 220, con llama aire/acetileno y generador de hidruros de la marca VGA 77 (vapor frío). La determinación de metales pesados se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma NMX-051-SCFI-2001.

Las condiciones de operación del EAA se describen en la Tabla 3:



Tabla 3. Condiciones de operación del Espectrómetro de Absorción Atómica (EAA).

Variable	Cd (A/A)	Pb (A/A)	Hg (A/A)	Zn (A/A)
Longitud de Onda (nm)	228.8	213.9	217	253.7
Flujo de aire (L/min)	35	10	3.5	10
Flujo de combustible (L/min)	4.5	2	1.5	2
Corrección de fondo D2	SI	SI	SI	SI
Intensidad de corriente (mA)	4	5	10	4
Slit (mm)	0.5	1	1	0.5
Altura de quemador (mm)	13.5	13.5	13.5	13.5

A/A= aire/acetileno. Fuente: Adaptación propia.

4.4.1. Preparación de las curvas de calibración

Para la preparación de las curvas de calibración se utilizaron estándares con concentración de 1000 +/- 0.1 ppm para cada metal, a partir de las cuales se prepararon las soluciones estándares (3 concentraciones por cada curva) para las curvas de calibración, estas últimas se prepararon en el instante de la lectura. Las concentraciones de las soluciones estándares dependieron del metal. Para el mercurio las concentraciones utilizadas fueron las siguientes: 2.5, 5.0 y 10 (mg/L); para el cadmio fueron: 0.250, 0.500 y 1.0 (mg/L); para el plomo: 2.0, 5.0 y 10.0 (mg/L) y para el zinc no aplica, debido a que el equipo EAA no leyó la lámpara.



4.5. Análisis de resultados obtenidos.

4.5.1. Análisis estadístico

Para la realización del análisis estadístico de los resultados, se utilizaron los programas Microsoft Excel y XLSTAT versión 2014.3.01 (Addinsoft, 2014), este último nos ayudará a establecer las correlaciones lineales y realizar el análisis de componentes principales (ACP) y de Clúster.

4.5.1.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica multivariante diseñada en 1901 por Karl Pearson con la finalidad de encontrar líneas y planos que mejor se ajusten a una nube de puntos en el espacio. La técnica de Pearson ha sido modificada a través de los años (Cela, 1994) empleándose actualmente en muchos tipos de problemas multidimensionales (Quintana y Mora, 1994; Carlosena, Andrade, Fernández y Prada, 1999).

La idea básica del ACP es encontrar un pequeño número de combinaciones lineales no correlacionadas a partir de las 7 variables originales (Hg, Pb, Cd, T°, OD, pH y Conductividad), tales que expliquen el mayor por ciento de la variabilidad total de los datos originales (26 muestras).

Es decir, pasar el conjunto de variables primitivas a un nuevo espacio, trasladando la máxima información original contenida en el espacio multidimensional analizado, a un espacio de dimensionalidad reducida, como por ejemplo tri o bidimensional (Massart *et al.*, 1998).

Lo anterior nos permitirá observar el comportamiento de las muestras trabajadas y agrupar los datos que presenten una tendencia semejante. De manera que, se espera agrupar aquellas muestras que presenten una tendencia similar en



concentración de metales tomando en cuenta los parámetros y el tipo de muestra (sedimento o caracol).

4.5.1.2. Correlación lineal de Pearson

Los estudios multivariados, en cualquier campo al que se apliquen, comienzan frecuentemente a partir de la construcción de una matriz de correlación. Esta constituye una tabla simétrica de coeficientes de correlación de cada variable respecto a cada una de las otras; de ellas se pueden emerger patrones y estructuras que a menudo no son distinguibles por simple inspección de los datos. El análisis de correlación sirve como técnica primaria descriptiva estimadora del grado de asociación entre las variables involucradas en el estudio (Sokal, 1981).

Mediante la matriz de correlación, se determinó que variables están relacionadas entre sí lo cual sirvió para analizar si los parámetros fisicoquímicos están influenciados por la presencia de los metales y así conocer el grado de biodisponibilidad de los mismos en la laguna. Así, se observó el comportamiento de las variables en ambas temporadas climáticas.

4.5.1.3. Análisis de Clúster

El análisis de Clúster, tiene como objetivo proporcionar métodos cuya finalidad sea el estudio conjunto de datos multivariante y se utiliza para clasificar los objetos o casos en grupos homogéneos llamados conglomerados con respecto a algún criterio de selección predeterminado.

Los conglomerados de objetos resultantes deberían mostrar un alto grado de homogeneidad interna (dentro del conglomerado) y un alto grado de heterogeneidad externa (entre conglomerados). Por tanto, si la clasificación es acertada, los objetos dentro de los conglomerados estarán muy próximos cuando se presenten gráficamente, y los grupos diferentes estarán muy alejados (Hair,



Black, Basin, Anderson y Tatham, 2000). Un análisis de clúster es muy útil cuando el investigador desea desarrollar la hipótesis concerniente a la naturaleza de los datos o para examinar las hipótesis previamente establecidas (Hair *et al.*, 2000).

Este tipo de análisis nos permitió diferenciar los grupos que presentaron comportamientos muy diferentes en cada época climática. También sirvió para conocer aquellos datos que presentaron un comportamiento común en ambas temporadas climáticas.



V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Análisis de metales pesados en molusco (*Pomacea flagellata*) de la Laguna de Bacalar.

En la Tabla 4 y Diagrama 1, se pueden observar las mediciones de los metales pesados Hg, Pb y Cd en las muestras de *Pomacea flagellata* correspondientes a la temporada de seca del 2014. Para el Hg podemos observar que en todas las muestras analizadas se arrojó valores que no rebasan los límites máximos permisibles de acuerdo a la norma nacional mexicana NOM 129-SSA1-1995, donde establece que el Hg no debe rebasar los valores de 1 $\mu\text{g/g}$. En el sitio S2C1 (0.8 $\mu\text{g/g}$) se observó el valor más elevado en concentración del metal Hg. Comparando los valores de Hg con el límite aceptable propuesto por la Comunidad Europea (CE) (1998) que es de 0.5-1 $\mu\text{g/g}$ vemos que más de la mitad de las muestras rebasan dicho estándar.

Para el Pb podemos observar que en todas las muestras se obtuvo un resultado que no rebasa el límite máximo permisible de acuerdo a la NOM (1995) que establece un valor para el Pb de 1 $\mu\text{g/g}$ en productos de la pesca. El valor más elevado del metal Pb en los moluscos fue en el sitio S2C2 (0.48 $\mu\text{g/g}$). La CE (2005) establece que el límite máximo permitido de Pb en musculo de peces comerciales es de 0.2 $\mu\text{g/g}$, mientras que para la FAO (1983) y para la FAO/WHO (1989) es de 0.5 $\mu\text{g/g}$.

Podemos observar que para el cadmio los valores experimentados en todas las muestras se mantuvieron por debajo del que indica la NOM (1995) (0.5 $\mu\text{g/g}$) y debajo del límite aceptable que proponen la CE (2005) y la FAO/WHO (1989) para metales pesados en musculo de pescados que es de 0.05 y 0.5 $\mu\text{g/g}$ respectivamente.

El metal Zn no se pudo analizar debido a que la lámpara no fue detectada por el equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica.



Si comparamos los valores obtenidos con los analizados en especies marinas de la Bahía de Huarmey, Ancash, Perú podemos observar que el metal Pb se encuentra por encima a los reportados por Jacinto y Aguilar (2007), mientras que el Cd se encuentra por debajo de los valores reportados por Cervantes *et al.*, (2009) para el molusco *Hexaplex trunculus*.

Tabla 4. Concentraciones de metales pesados en *Pomacea flagellata* de la laguna de Bacalar en temporada de seca 2014.

SECA Muestra	Metales pesados ($\mu\text{g/g}$)		
	Hg	Pb	Cd
S1C1	0.6	0.29	0.005
S1C2	0.7	0.28	0.011
S1C3	0.3	0	0.003
S1C4	0.7	0.27	0.008
S2C1	0.8	0.22	0.012
S2C2	0.2	0.48	0.007
S2C3	0.4	0.17	0.006
S3C1	0.5	0.32	0.007
S3C2	0.6	0.29	0.009

Fuente: Adaptación propia.

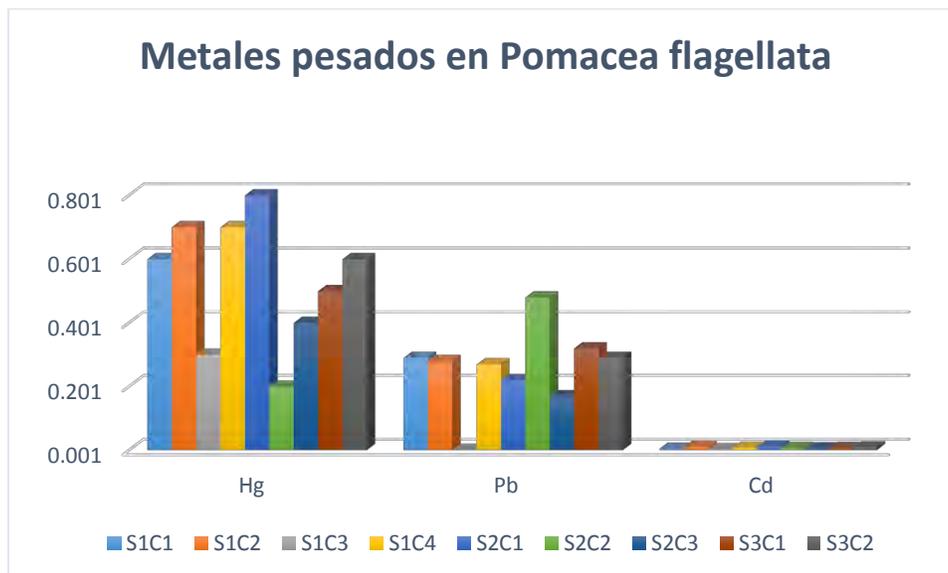


Diagrama 1. Comportamiento de metales pesados en *Pomacea flagellata* de la laguna de Bacalar en temporada de seca 2014.

Fuente: Adaptación propia.

En la Tabla 5 y Diagrama 2, se pueden observar las mediciones de los metales pesados Hg, Pb y Cd en las muestras de *Pomacea flagellata* correspondientes a la temporada de lluvia del 2014. Para el Hg podemos observar que sólo una muestra (S3C4= 1.4 µg/g) rebasa el límite máximo permisible de acuerdo a la norma nacional mexicana NOM 129-SSA1-1995, donde establece que el Hg no debe rebasar los valores de 1 µg/g. Sin embargo, comparando los valores de Hg con el límite aceptable propuesto por la Comunidad Europea (CE) (1998) que es de 0.5-1 µg/g vemos que todas las muestras rebasan dicho estándar. La concentración más baja del Hg se presentó en dos muestras del Sitio 1 (S1C3 y S1C2) y una muestra del Sitio 3 (S3C1) con una concentración de 0.5 µg/g cada una.

Para el Pb podemos observar que en todas las muestras se obtuvo un resultado que no rebasa los límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM anteriormente mencionada que establece un valor para el Pb de 1 µg/g en productos de la pesca. El valor más elevado del metal Pb en *Pomacea flagellata*



fue en el sitio S3C1 (0.67 $\mu\text{g/g}$). Considerando los valores permitidos para el Pb por la Comunidad Europea (2005), la FAO (1983) y la FAO/WHO (1989) donde establecen la concentración límite de 0.2, 0.5 y 0.5 $\mu\text{g/g}$ respectivamente observamos que los metales sobrepasan esas concentraciones.

Podemos observar que para el cadmio los valores experimentados en todas las muestras se mantuvieron por debajo de lo que indica la NOM (1995) (0.5 $\mu\text{g/g}$) y la FAO/WHO (1989) (0.5 $\mu\text{g/g}$). Al igual que con el mercurio, la muestra S3C4 presenta la mayor concentración (0.2 $\mu\text{g/g}$). Se observa que las mayores concentraciones para los tres metales en *Pomacea flagellata* se presentaron en la temporada de lluvia. Si comparamos los valores obtenidos con los analizados en especies marinas de la Bahía de Huarmey, Ancash, Perú podemos observar que el metal Cd se encuentra por debajo a los reportados por Jacinto M.E. y Aguilar S. (2007) y Cervantes, Jiménez y Alvares (2009) en caracol.



Tabla 5. Concentración de metales pesados en *Pomacea flagellata* de la laguna de Bacalar en temporada de lluvia 2014.

LLUVIA	Metales pesados ($\mu\text{g/g}$)			
	Muestra	Hg	Pb	Cd
	S1C1	0.8	0.37	0.01
	S1C2	0.5	0.52	0.013
	S1C3	0.5	0.62	0.014
	S2C1	0.8	0.52	0.011
	S2C2	0.7	0.38	0.012
	S2C3	0.9	0.63	0.011
	S2C4	0.6	0.5	0.01
	S3C1	0.5	0.67	0.014
	S3C2	0.8	0.42	0.017
	S3C3	0.8	0.57	0.013
	S3C4	1.4	0.5	0.02

Fuente: Adaptación propia.

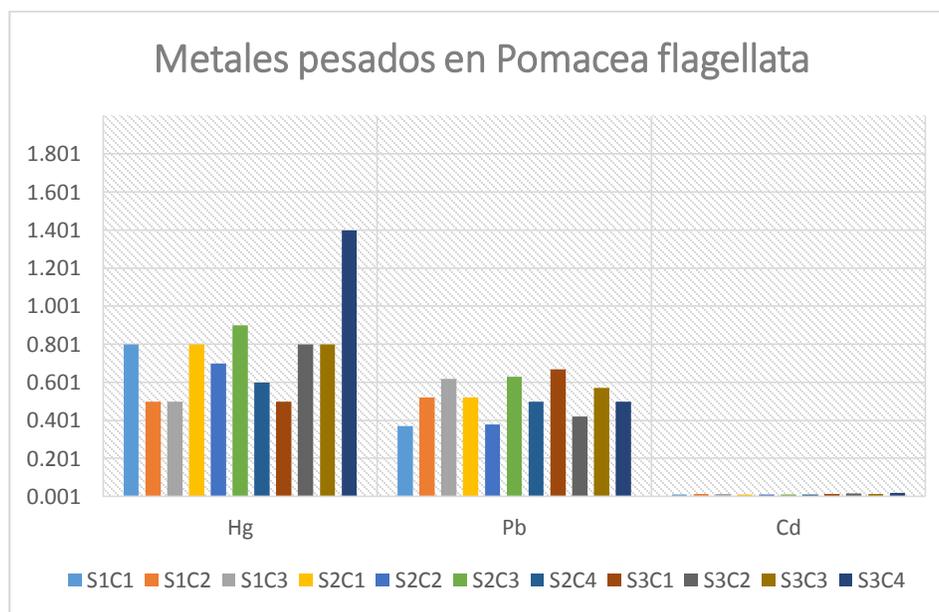


Diagrama 2. Comportamiento de metales pesados en *Pomacea flagellata* en temporada de lluvia 2014.

Fuente: Adaptación propia.



En la siguiente tabla (Tabla 6) se muestran y comparan los valores obtenidos con los límites máximos estándar a nivel local e internacional:

Tabla 6. Niveles estándar y máximos ($\mu\text{g/g}$ peso seco) de metales en productos de la pesca descrito en la literatura y rango de las concentraciones halladas en músculo de *Pomacea flagellata* de Laguna de Bacalar.

Organización/Norma	Metal			Referencia
	Cd	Pb	Hg	
Comunidad Europea	0.05	0.2	0.5-1	CE (1998); CE (2005)
FAO	-	0.5	-	FAO (1983)
FAO/WHO	0.5	0.5	-	FAO/WHO (1989)
NOM-129-SSA1-1995	0.5	1	1	NOM (1995)
Rango de metales en el presente estudio en temporada de seca 2014	0.003-0.012	0-0.48	0.2-0.8	Presente estudio
Rango de metales en el presente estudio en temporada de lluvia 2014	0.010-0.02	0.37-0.67	0.5-1.4	Presente estudio

-, datos no disponibles en la publicación. Fuente: Adaptación propia

5.2. Análisis de metales pesados en sedimento de la Laguna de Bacalar.

Los resultados del análisis de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en sedimento para la temporada de seca se muestran en la Tabla 6 y el Diagrama 3.

En el caso del mercurio, las concentraciones obtenidas en todas las muestras de ambas temporadas se salieron del rango de detección, lo cual indica que los niveles de concentración en los sitios muestreados son moderadamente elevados.

Para el plomo, las concentraciones fluctuaron entre 1.51 y 1.85 $\mu\text{g/g}$ para la temporada de seca. La concentración más alta (1.85 $\mu\text{g/g}$) correspondió a la



réplica de sedimento obtenida del Sitio 1. Todas las concentraciones rebasan el límite máximo permisible (LMP) establecido en la NOM-001-ECOL-1993 para estuarios tanto en promedio mensual (0.2 µg/g) como en promedio diario (0.4 µg/g).

Con respecto al cadmio, los valores de concentración oscilaron entre 0.133 y 0.144 µg/g. La mayor concentración se halló en el sitio 3 (0.144 µg/g), mientras que en el sitio 2 se registró la concentración más baja (0.133 µg/g). Los valores encontrados superan el LMP en la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1993) que establece el valor de hasta 0.1 µg/g en promedio mensual para aguas de estuarios.

Tabla 7. Concentración de metales pesados en sedimento en la temporada de seca 2014.

SECA		Metales pesados (µg/g)		
Muestra	Hg	Pb	Cd	
S1S1	Over	1.85	0.136	
S2S2	Over	1.51	0.133	
S3S3	Over	1.51	0.144	

Over: fuera del rango de detección; Fuente: Adaptación propia.

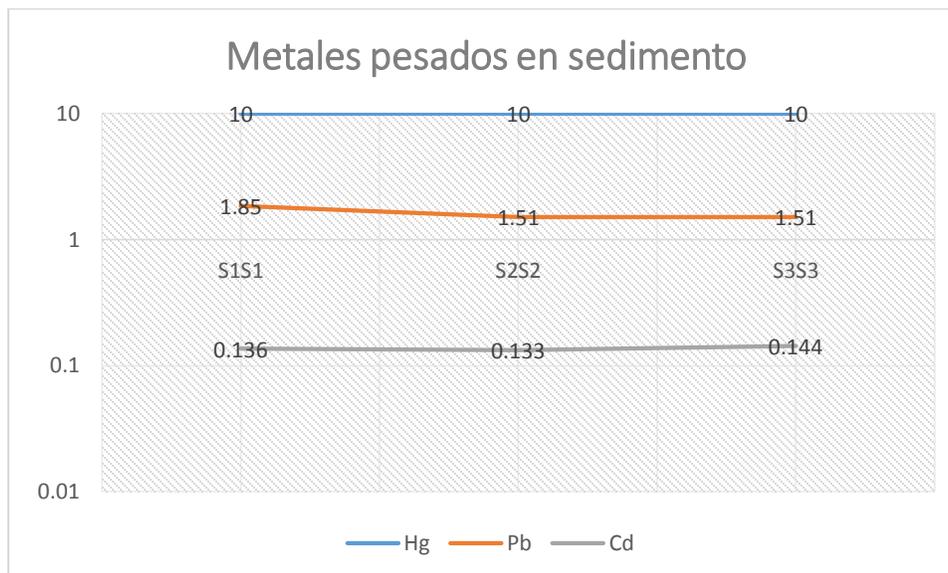


Diagrama 3. Comportamiento de los metales pesados en sedimento en temporada de seca 2014.

Los resultados correspondientes a las concentraciones de metales pesados en sedimento de la Laguna de Bacalar durante la temporada de lluvia se muestran a continuación (Tabla 7 y Diagrama 4):

Para el mercurio, al igual que en la temporada de seca, los valores se salieron del rango de detección, lo cual significa que existe una concentración elevada en los tres sitios. Con respecto al plomo y al cadmio, los valores obtenidos rebasan el límite máximo permisible que establece la norma mexicana NOM-001-ECOL-1996 el cual indica que la concentración máxima en promedio mensual para plomo y cadmio en aguas costeras de recreación es de 1 y 0.4 $\mu\text{g/g}$ respectivamente.

Tabla 8. Concentración de metales pesados de sedimento en temporada de lluvia 2014.

LLUVIA	Metales pesados ($\mu\text{g/g}$)		
Muestra	Hg	Pb	Cd
S1S1	Over	1.8	0.123
S2S1	Over	1.91	0.135
S3S1	Over	2.17	0.128

Over: fuera del rango de detección; Fuente: Adaptación propia

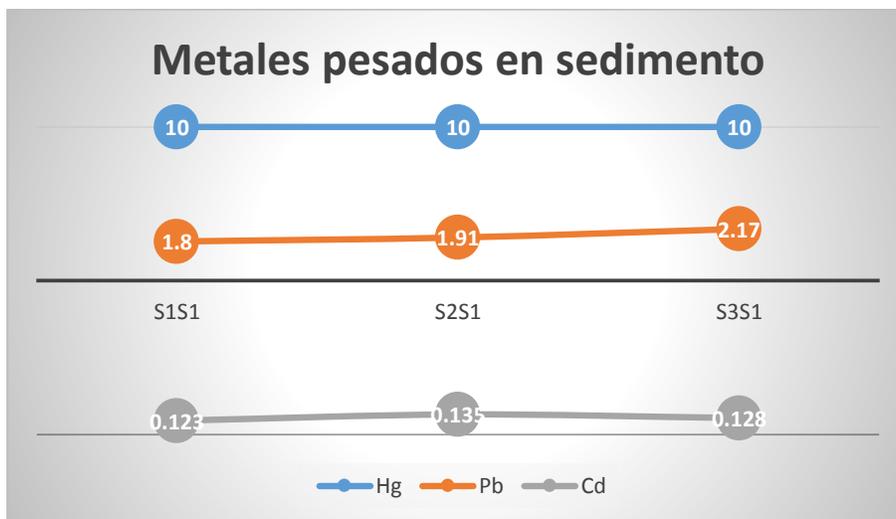


Diagrama 4. Comportamiento de los metales pesados en sedimento en temporada de lluvia 2014.

Fuente: Adaptación propia.

Los valores anteriores de concentración de metales pesados en Hg y Pb en los sedimentos para ambas temporadas al igual que los obtenidos por de la Cruz *et al.* (2013), al igual que los valores de Pb y Cd en comparación con los obtenidos por Aguilar, Montalvo, Ramírez y González (2009) rebasan los límites máximos permisibles que establece la NOM.

5.3. Parámetros fisicoquímicos

Los valores de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, conductividad y OD) obtenidos *in situ* a partir de las muestras colectadas en la columna de agua para cada sitio se muestran en los Diagramas 5 y 6.



PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS. TEMPORADA DE SECA 2014

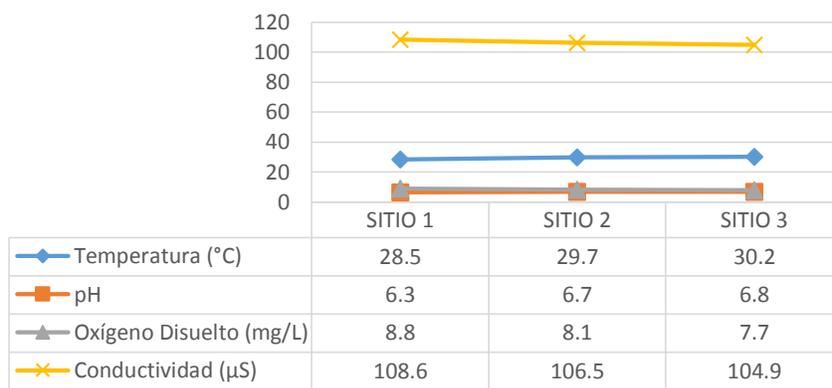


Diagrama 5. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en temporada de seca 2014.

Fuente: Adaptación propia

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN TEMPORADA DE LLUVIA 2014.

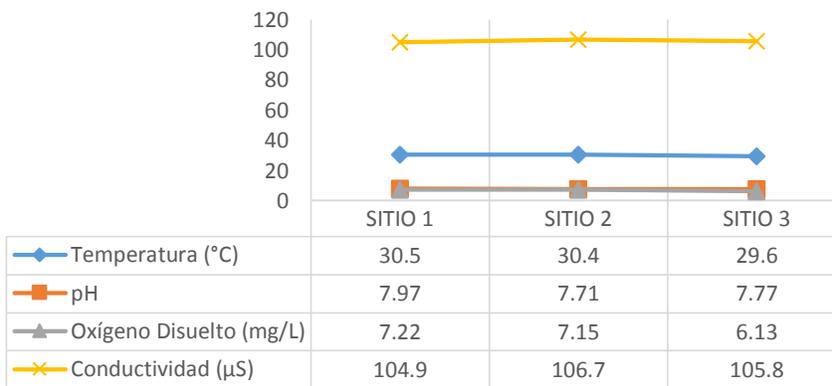


Diagrama 6. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en temporada de lluvia 2014.

Fuente: Adaptación propia.



Temperatura

Los valores de temperatura se incrementaron para los Sitios 1 y 2 en la temporada de lluvia (30.5 y 30.4 °C, respectivamente) con respecto a la temporada de seca (28.5 y 29.7 °C), sin embargo no fue así para el Sitio 3 (Balneario municipal), que fue 30.2 °C y 29.6 °C para temporada de seca y lluvia, respectivamente. La variación más considerable entre ambas temporadas sucedió en el Sitio 1, donde se incrementó 2° C en la temporada de lluvia con respecto a la época de seca. El comportamiento en los sitios 1 y 2 es lógico, ya que la temperatura aumenta en el periodo de verano (YSI Environmental, 2008).

Con base en lo anterior, se observa que todos los valores están por debajo del límite máximo permitido que establece la NOM-001-ECOL-1996 que es de 40 °C al instante en promedio mensual y diario para aguas costeras de recreación.

Oxígeno disuelto (OD)

El nivel más bajo de OD se obtuvo en el Sitio 3 (Balneario municipal) con un valor de 6.13 mg/L durante la temporada de lluvia. En la temporada de lluvia se hallaron niveles más bajos de OD con respecto a la temporada de seca, esto quizás se deba a mayor aporte de materia orgánica por las descargas pluviales que incrementa la demanda del oxígeno.

El comportamiento del OD, en la temporada de seca, en los puntos de muestreo fue inverso al de la temperatura, esto se debe a que el agua más cálida contiene menos oxígeno debido al incremento de la tasa metabólica de la biota acuática que resulta en una mayor necesidad de O₂ (YSI Environmental, 2008). Lo mismo sucede con el pH, debido a que un incremento en la temperatura ioniza las moléculas de agua liberando átomos de hidrógeno que aumentan el pH. Sin embargo, el OD se comportó de manera similar a la temperatura en los puntos de muestreo en la temporada de lluvia.



pH

Los valores de pH fluctuaron entre 6.3 y 7.97, considerando ambas temporadas climáticas. El valor más bajo se presentó en el Sitio 1 en la temporada de seca (6.13), y el valor más alto (7.97) se encontró en el mismo punto de muestreo durante la temporada de lluvia.

Con base en el Diagrama 5 se observa que en la temporada de seca se presentaron condiciones de acidez ligera en los puntos de muestreo. Sin embargo, para la temporada de lluvia (Diagrama 6) este parámetro se incrementó, presentando ligeramente condiciones de alcalinidad en todos los puntos de muestreo. Esto último, coincide con lo reportado por Deveze-Arcos (2011) quien señala que este comportamiento se deba a la descarga de aguas residuales en aumento durante la época de lluvia. A pesar que en temporada de lluvia las concentraciones de los metales se incrementaron ligeramente tanto en el molusco como en el sedimento, el pH tuvo un comportamiento diferente al esperado. Debido a que a menor pH, aumenta la solubilidad de los metales y también su biodisponibilidad (Cifuentes *et al.*, 1997).

Todos los valores se mantuvieron en el rango de límites máximos permisibles que establece la NOM-067-ECOL-1994 el cual es de 6-9 instantáneo.

El comportamiento del pH en los sitios de muestreo en la temporada de seca fue similar al de la temperatura (incrementó) e inverso a los de la conductividad electrolítica y el OD. Es decir no se presentó lo esperado al tener en cuenta que, el pH disminuye al aumentar la temperatura (Cifuentes *et al.*, 1997).

Conductividad electrolítica

La conductividad electrolítica (CE) es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de



la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura.

Los valores analizados para la CE del agua en los puntos de muestreo varió entre 104.9 y 108.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la temporada de seca, el valor de conductividad más alto se presentó en el Sitio 1 (108.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y, el Sitio 3 presentó el valor más bajo (104.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Por su parte, en la temporada de lluvia, el valor más alto se obtuvo en el Sitio 2 (106.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mientras que el Sitio 1 presentó el valor más bajo (104.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Vemos que no existe una diferencia muy notable entre los rangos obtenidos para cada temporada.

Descargas de aguas residuales suelen aumentar la conductividad debido al aumento de la concentración de Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} , u otros iones (Goyenola, 2007). Los valores hallados no tienen un comportamiento muy definido lo cual no nos permite conocer si hay aporten de descargas residuales entre una temporada y la otra.

De acuerdo al Diagrama 6 se puede observar que el comportamiento de la conductividad electrolítica en los sitios de muestreo en ambas temporadas climáticas está en función del pH. A medida que el pH se incrementa la CE disminuye y recíprocamente. Con respecto a la temperatura, en la temporada de seca hubo un comportamiento de influencia por parte de aquella variable; a medida que se incrementó la temperatura disminuyó la conductividad, contrario a lo que se sabe (si la temperatura aumenta, la conductividad se incrementa).

5.4. Análisis de correlación.

El análisis estadístico (correlación lineal de Pearson) muestra, de acuerdo a la Tabla 8, que existen entre los metales pesados y los parámetros analizados en temporada de seca: correlaciones positivas entre mercurio-plomo ($r=0.976$), cadmio-mercurio ($r = 0.999$) y cadmio-plomo ($r= 0.976$). Con respecto a los



parámetros fisicoquímicos, existe una correlación positiva entre T°-pH ($r=0.996$) y OD-Conductividad ($r=0.997$); por el contrario, existe una correlación negativa (inversa) entre T°-OD ($r= -0.997$), pH-OD ($r= -0.986$), T°-Conductividad ($r= -0.989$) y pH-Conductividad ($r= -0.971$). Se puede observar que no existe correlación significativa entre los metales pesados analizados y los parámetros fisicoquímicos, lo cual explica la poca bioconcentración en *Pomacea flagellata*.

Tabla 9. Matriz de correlación de Pearson para la temporada de seca 2014.

Matris de correlacion (Pearson (n)):							
Variables	Hg	Pb	Cd	Temperatura (°C)	pH	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad (µS/cm)
Hg	1						
Pb	0.976	1					
Cd	0.999	0.976	1				
Temperatura	0.108	0.099	0.132	1			
pH	0.103	0.094	0.126	0.996	1		
Oxígeno D	-0.112	-0.102	-0.136	-0.997	-0.986	1	
Conductiv	-0.115	-0.105	-0.140	-0.989	-0.971	0.997	1

En negrita, valores significativos al umbral $r=0.050$ (prueba bilateral)

Para la temporada de lluvia (Tabla 9), existe una correlación directa positiva entre los tres metales, muy similar a la presentada en la temporada de seca: Hg-Pb ($r= 0.979$); Pb-Cd ($r= 0.982$) y Hg-Cd ($r= 0.997$). Con respecto a los parámetros fisicoquímicos, existe una relación directa positiva entre la temperatura y el OD con una $r= 0.999$, y una correlación inversa entre el pH y la CE de $r= -0.950$.



Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson para la temporada de lluvia 2014.

Matriz de correlación (Pearson (n)):							
Variables	Hg	Pb	Cd	Temperatura (°C)	pH	OD (mg/L)	Cond (μS/cm)
Hg	1						
Pb	0.979	1					
Cd	0.997	0.982	1				
Temperatura (°C)	0.011	0.045	0.004	1			
pH	0.037	0.013	0.032	0.343	1		
OD(mg/L)	0.009	0.047	0.005	0.999	0.302	1	
Conductividad (μS)	0.036	0.029	0.036	-0.031	-0.950	0.011	1

En negrita, valores significativos al umbral $r=0.050$ (prueba bilateral)

5.5. Análisis de componentes principales (ACP).

A continuación se representan los resultados obtenidos del ACP (Figs. 7 y 8) generados con XLSTAT (Addinsoft, 2014), que involucra las 26 muestras de caracol, los metales pesados analizados y los parámetros fisicoquímicos obtenidos.

Para las determinaciones realizadas en temporada de seca se observa el ACP correspondiente en la Fig. 7 con el 98.51% de la varianza total. El primer componente principal (CP-I) muestra una varianza de 63.14% y la correlación de los metales (Hg, Pb y Cd), el pH, la temperatura y las muestras S2S1, S2C1, S2C2, S2C3, S3S1, S3C1 y S3C2. Según (Tsai L.J. *et al.* 1998) cuando los metales están agrupados, indican también que tienen la misma fuente de contaminación. El segundo componente principal (CP-II) representa una varianza de 35.36% y está definido por la conductividad, el oxígeno disuelto y las muestras de caracol y sedimento correspondientes al Sitio 3 (S3S1, S3C1, S3C2, S3C3 y S3C4).

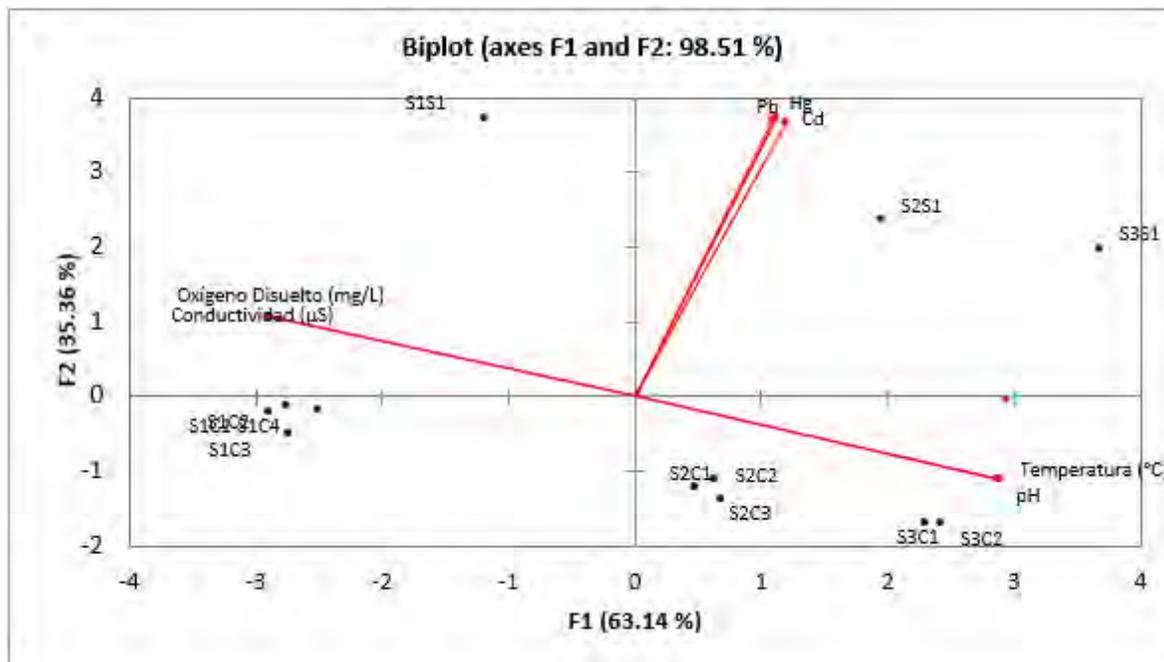


Fig. 6. Análisis de Componentes Principales (ACP) correspondiente a la temporada de seca 2014.

En la Fig. 8 se muestra el ACP correspondiente a la temporada de lluvia que presenta una varianza total de 78.26% distribuido en sus dos componentes, ACP-I y ACP-II, con una varianza de 42.06% y 36.20% respectivamente. El primer componente principal (CP-I), está definido por 3 los parámetros pH, Temperatura y OD, el cual explica el 42.06 % de la varianza total. El segundo componente principal (CP-II) está definido por los metales pesados Hg, Pb y Cd y el parámetro Conductividad y explica el 36.20% de la varianza total. En el primer componente principal (CP-I), correlacionan las muestras S1S1, S1C1, S1C2, S1C3, S2C1, S2C2, S2C3 y S2C4 en estas muestras se presentan mayores concentraciones de los metales de esta temporada e inclusive los valores más elevados de los metales pesados en este estudio.

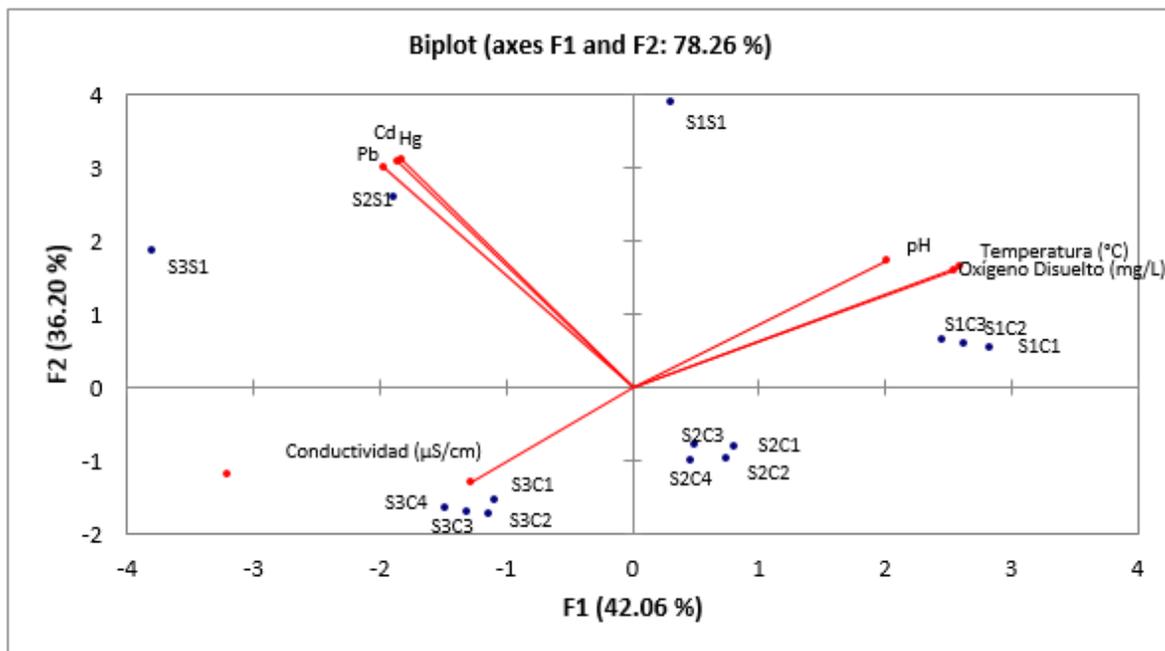


Fig. 7. Análisis de Componentes Principales (ACP) correspondiente a la temporada de lluvia 2014.

5.6. Análisis de Clúster.

En la Figura 10, se presenta el Dendrograma, generado con XLSTAT (Addinsoft, 2014), de los metales pesados, parámetros fisicoquímicos y las muestras de las áreas analizadas en la temporada de seca de 2014. En este análisis se observa que se forman tres grupos conglomerados asociados por las siguientes zonas; de color verde las muestras S1S1, S2S1 y S3S1, donde se arrojaron las concentraciones más elevadas en los sedimentos, de color rosa las muestras S1C3, S1C1, S1C2 y S1C4, donde se obtuvieron las concentraciones más elevadas en los moluscos y la zona de color café, en las muestras S3C1, S3C2, S2C1, S2C2 y S2C3. Donde se obtuvieron los niveles más bajos de concentración de los metales analizados. Analizando las relaciones que existen entre las zonas conglomeradas podemos observar que los 3 grupos ya citados son disimiles entre ellos, o sea que tienen características particulares. Podemos interpretar que los moluscos de los sitios 2 y 3 comparten similares concentraciones, ello podría



deberse a que esta zona puede ser impactada por una fuente de contaminación específica.

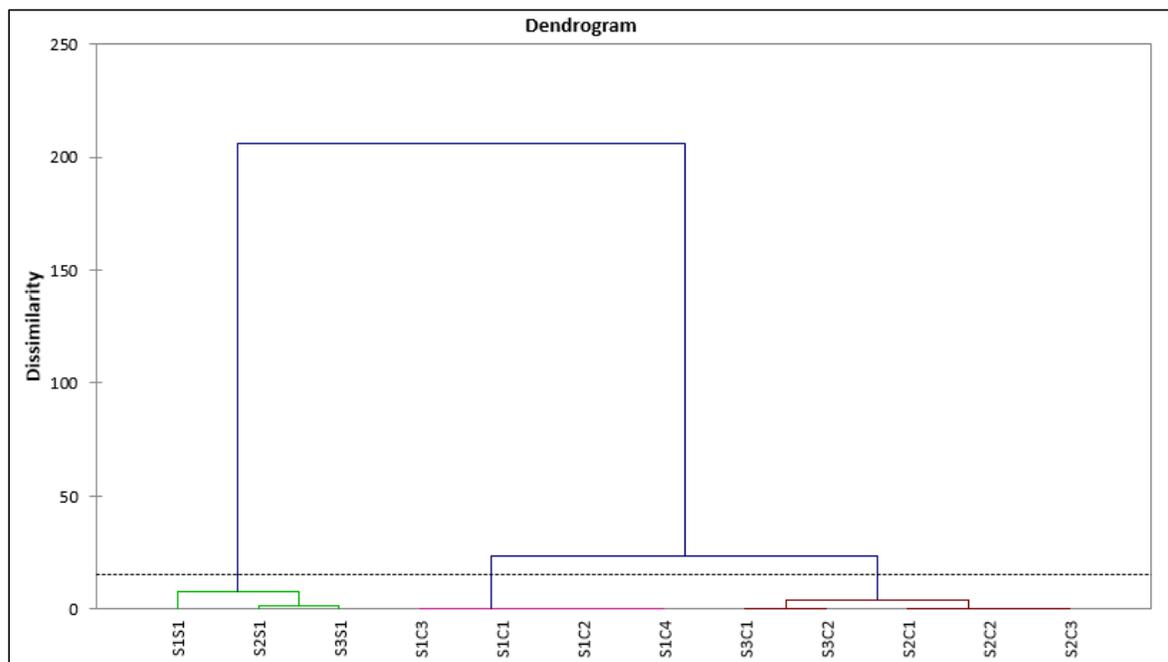


Fig. 8. Dendrograma correspondiente a la temporada de seca 2014.

En la Figura 11, se presenta el Dendrograma, generados con XLSTAT (Addinsoft, 2014), de los metales pesados, parámetros fisicoquímicos y las muestras de las áreas analizadas en la temporada de lluvia de 2014. En este análisis se observa que se forman tres grupos conglomerados asociados por las siguientes zonas; de color verde las muestras S1S1, S2S1 y S3S1, donde se arrojaron las concentraciones más elevadas en los sedimentos, de color rosa las muestras S3C4, S3C1, S3C2 y S3C3, donde se obtuvieron las concentraciones más elevadas en los moluscos y la zona de color café, en las muestras S1C1, S1C2, S1C3, S2C1, S2C2, S2C3 y S2C4 donde se obtuvieron los niveles más bajos de concentración de los metales analizados. Analizando las relaciones que existen entre las zonas conglomeradas podemos observar que los 3 grupos ya citados, al igual que en el Dendrograma anterior, son disimiles entre ellos, o sea que tienen



características particulares. También podemos interpretar que los moluscos de los sitios 1 y 2 comparten similares concentraciones, observando que los moluscos del sitio 2 compartieron características similares con por lo menos un grupo en cada temporada.

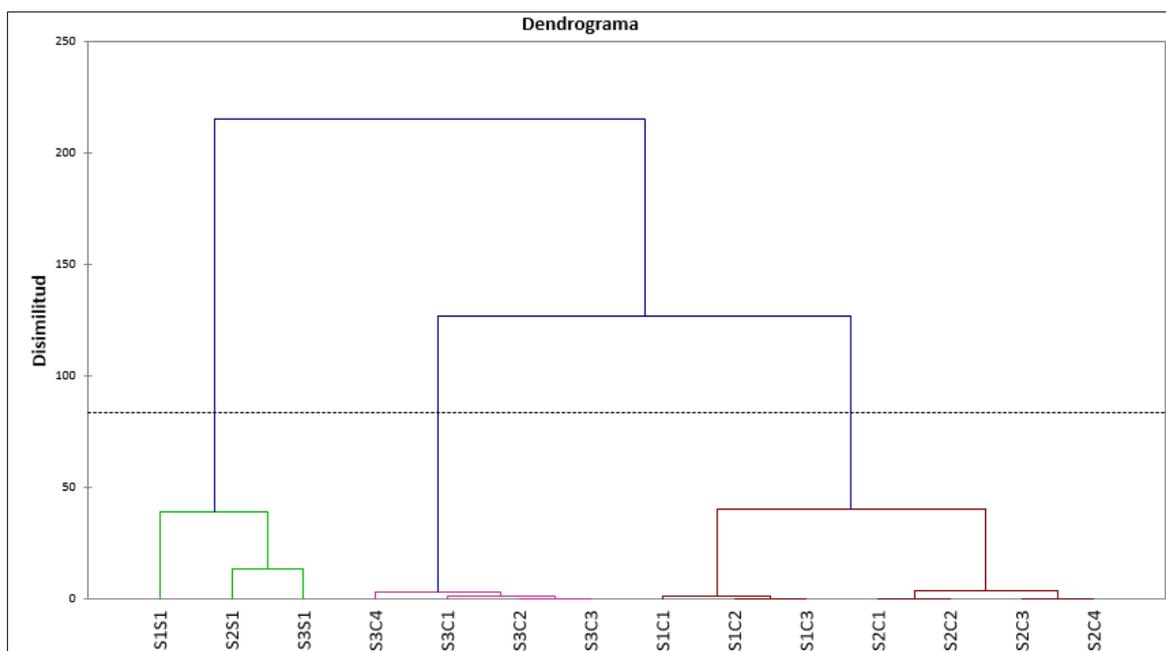


Fig. 9. Dendrograma correspondiente a la temporada de lluvia 2014.



VI. CONCLUSIONES.

1. Las concentraciones de mercurio, plomo y cadmio en musculo de *Pomacea flagellata* en la temporada de seca 2014 en la Laguna de Bacalar no rebasan el límite máximo permisible (LMP) que establece la NOM. Sin embargo, el metal mercurio rebasa el valor de referencia internacional que marca la CE, mientras que el plomo se mantiene dentro del límite aceptable de acuerdo con la FAO y la FAO/WHO. La concentración más elevada para cada metal se obtuvo en muestras del Sitio 2.
2. Los metales pesados en *Pomacea flagellata* están por encima del valor de referencia internacional que permite la Comunidad Europea para ambas temporadas climáticas.
3. Las concentraciones de Hg en musculo de *Pomacea flagellata* en temporada de lluvia 2014 estuvieron muy próximas al LMP que marca la NOM, incluso una muestra del Sitio 3 sobrepasó dicho valor y comparando con el valor de referencia internacional indicado por la CE rebasa el rango aceptable. Los valores para los metales Pb y Cd se incrementaron con respecto a los obtenidos en la temporada de seca 2014 pero se mantienen por debajo y alejados del LMP que indica la NOM. No así para el Pb con lo que establecen las organizaciones internacionales FAO y FAO/WHO. La concentración más elevada para cada metal analizado se presentó en muestras del Sitio 3.
4. Las concentraciones de los metales Hg, Pb y Cd en las réplicas de sedimento, obtenidas en los sitios de muestreo en la Laguna de Bacalar, fueron muy superiores al límite máximo permisible que establece la NOM (1996), incluso los valores para el Hg se salieron del rango de detección del EAA. Se observó un incremento en las concentraciones de los metales Pb y Cd en la temporada de lluvia 2014 con respecto a las obtenidas en la temporada de seca 2014.



5. Para los parámetros fisicoquímicos, los resultados conseguidos muestran valores aceptables. El cambio notable se presentó en los parámetros pH y Temperatura, debido a un incremento ligero en la temporada de lluvia 2014, mientras que el OD disminuyó, con respecto a la temporada de seca 2014
6. Con base en la correlación lineal de Pearson, se establece que existe una relación entre los metales pesados analizados en este estudio en ambas temporadas climáticas lo cual pudiese estar indicando una fuente de contaminación puntual.
7. No existe una correlación entre los metales y los parámetros fisicoquímicos en ninguna de las dos temporadas consideradas en el presente estudio. Sin embargo, existe correlación entre variables del mismo grupo.
8. Las mejores correlaciones entre parámetros sucedieron en la temporada de seca, esto quizás a la estabilidad que se consigue por la poca aportación de descargas pluviales.
9. Para la temporada de seca se consiguió una varianza en los datos del 98.51% y para la temporada de lluvia un 78.26%. Lo anterior nos indica que el aporte de descargas pluviales es un factor que modifica el comportamiento de las variables.
10. No existe similitud entre muestras de sedimento y de molusco. Cada grupo presenta comportamientos particulares.
11. Existe contaminación por Hg, Pb y Cd en los sedimentos de los sitios muestreados en la Laguna de Bacalar.



VII. RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda realizar un análisis espacio temporal en sedimento y columna de agua en la Laguna de Bacalar para obtener información más precisa que permita confirmar la contaminación por Hg, Pb y Cd.
2. Si se consume caracol chivita, se recomienda hacerlo de preferencia en la temporada de seca debido a que en temporada de lluvia existe riesgo de ingerir molusco con una concentración mayor al LMP.
3. Monitorear los Sitios 2 y 3, debido a que en estos sitios se hallaron los valores más altos de concentración de plomo y cadmio con la finalidad de observar el comportamiento.
4. Realizar estudios de bioconcentración en diversas especies acuáticas que permitan identificar aquellas que son útiles como bioindicadores.



VIII. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Addinsoft (2014). *XLSTAT* (Versión 2014.3.01) [Programa de computación]. USA: Addinsoft.

Aguilar, U. C. A., Montalvo, R. M. A., Ramírez, E. y González, B (1995). *Metales pesados en sedimentos del arroyo "La Caleta" de Ciudad del Carmen, Campeche, México: Estudio preliminar*. Consultado en Junio 17, 2014 en <http://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v5-n3-5-metales-pesados-en-sedimentos-del-arroyo-la-caleta-de-ciudad-del-carmen.pdf>.

Álvarez, L. T., Carrillo, B. L., de Jesús, N. A., Herrera, S. J., Gutiérrez, M. y Cervantes, A. (2011). *Desarrollo de indicadores de calidad del agua en ILagunas costeras y continentales de Quintana Roo para el diseño e implementación de un programa de monitoreo estatal*. FOMIX CONACYT-Quintana Roo. 174 p.

Albrecht, E. A., Carreño, N. B. y Castro-Vázquez A. (1996). A quantitative study of copulation and spawning in the South American apple-snail, *Pomacea canaliculata* (Prosobranchia: Ampullariidae). *The Veliger*, 39(2): 142-147.

Bianchini, A., y Carvalho del Casthilo, P. (1999). Effects of zinc exposure on oxygen consumption and gill Na, KATPasa of the estuarine crac *Chasmagnathus granulata* Dana, 1851 (Decapada-Gropsidae). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 62: 63-69.

Buenfil R. M. y Flores C. N. (2007). Determinación de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) presentes en el Río Hondo, Quintana Roo. Consultado en Junio 27, 2014 en http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/congresos/CHIHUAHUA/docs/81-100.pdf.

Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo. Moreno-Caraveo, 2014.



Cabrera-Carranza, C., Maldonado, M. y Romero, L. (2004). Environmental impact in superficial marine silts for industrial and urban liquid residuals. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. Consultado en Noviembre, 11, 2013. En http://revistas.concytec.gob.pe/scielo.php?pid=S1561-08882004000200003&script=sci_arttext.

Carlosena A., Andrade J. M., Tomas X., Fernandez E. y Prada D. (1999). *Classification of edible vegetables affected by different traffic intensities using potencial curves*. *Talanta*, 48, 745.

Cazzaniga, N. J., (2002). Workshop: "Biology of Ampullariidae" Old species and new concepts in the taxonomy Pomacea (Gastropoda: Ampullariidae). *Biocell*, 26(1): 71-81.

Cawardine, Hoyt, Fordyce, y Gill. (2006). Contaminación y efecto sobre los cetáceos. *Apnea: delfines y ballenas*, 12-18.

Cela R. (1994). *Avances en Quimiometría Práctica*. Ed. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela. 503 p.

Cifuentes, L.J.L., Torres, G.M.P. y Frías, M.M. (1997). El océano y sus recursos. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química. Consultado en Junio 26, 2014 en <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/12/htm/oceano2.html>.

Davies, P.H., J.P. Goettl, J. Sinley y N.F. Smith, (1976). Acute and chronic toxicity of lead to rainbow trout, *Salmo gairdneri* in hard and soft water. *Water Research*, 10: 199-206.



Deveze-Arcos, R. (2011). Determinación de metales pesados (Cu, Hg, Pb, Cd, Cr, Zn) en Jaiba Azul (*Callinectes sapidus* Rathbun, 1896) en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo (Tesis de Licenciatura, Universidad de Quintana Roo).

de Jesús, N. A., Oliva, R. J. J., de Jesús, C. R. M., y Vargas, E. A. (2013). Distribución y abundancia de la "chivita" (*Pomacea* sp.) en la Laguna de Bacalar: resultados preliminares. *Innovación para la vinculación FOMIX-Quintana Roo, S/N*, 53-59.

Duffus, John H. (1983). *Toxicología ambiental*. España: Omega .

EC, (2005). European Community. Commission Regulation No 78/2005 (pp. L16/43–L16/45). Official Journal of the European Union (20.1.2005).

EC Directive. 02/22IEEC (1998). *European comisión for standardization. European standard, maximum levels for heavy metal concentration in marine fish. pp. 1-283*

EPA (1995). *Final Water Quality Guidance for the Great Lakes System*. Consultado en Marzo, 25, 2013 en <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-WATER/1995/March/Day-23/pr-82.html>.

Espina, S., y Cecilia, V. (2005). Ecotoxicología y Contaminación. En A. V. Botello, J. Rendón, G. Gold, y C. Agraz, *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias* (págs. 79-120). Campeche, México.: UAC; UNAM; INECOL.

Estebenet, L. A. y Martín, R. P. (2002). Workshop: "Biology of Ampullariidae" *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampulariidae): Life-history Traits and their Plasticity. *Biocell*, 26(1): 83-89.



FAO, (Food and Agriculture Organization), (1983). *Compilation of legal limits for hazardous substances in fish and fishery products*, FAO Fishery Circular No. 464, pp. 5–100.

FAO/WHO (1989). *Evaluation of certain food additives and the contaminants mercury, lead and cadmium*, WHO Technical Report, Series No. 505.

FDA (U.S. Food & Drug Administration—Center for Food Safety & Applied Nutrition) (2001). *Fish and fisheries products hazards and controls guidance*. [en línea]. Third Edition June 2001. <<http://www.cfsan.fda.gov/~comm/haccp4i.html>> (acceso 3/06/14)

Fergusson, J.F. (1990). *The heavy Elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Pergamon Press. Oxford. UK. 614 p.

Forstner, U. y Wittmann, G. T. W. (1979). *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, Berlin, pp.486

Ghesquiere, A. I. (2007). *Apple snails (Ampullariidae)*. Consultado en Junio 16, 2014 en <http://www.applesnail.net/>.

González Bucio, J.L., Carrión Jiménez, J.M., y Díaz López, C. (2006). Estudio de la contaminación por Hg, Pb, Cd y Zn en la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. Consultado en Noviembre, 20, 2013 en http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2006000100004&script=sci_arttext.

González Bucio, J. L., Carrión Jiménez, J. M., Yam Gamboa, O., y Díaz López, C. (2008). Contaminación de la Bahía de Chetumal por metales pesados, materia orgánica y nutrientes producidos por las descargas de aguas residuales municipales. *Caos Conciencia*, pp. 5-11.



Goyenola, G. (2007). Conductividad. Consultado en Junio 27, 2014 en http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/Conductividad.pdf.

Hair, J. F., Black, W. C., Basin, B. J., Anderson, R. E. & Tatham, R. L. (2006). *Multivariate data analysis*, 6th ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

Hellawell, J.M., (1989). *Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management*. Elsevier Applied Science, London, 546 p.

Horta, C. (2013). *Devastan pescadores apreciado molusco en la Laguna de Bacalar*. Consultado en Noviembre, 20, 2013 en <http://sipse.com/novedades/devastan-pescadores-apreciado-molusco-en-la-Laguna-de-bacalar-40938.html>.

Iannacone, J., y Alvaríño, L. (2002). Efecto del detergente doméstico alquil aril sulfonato de sodio lineal (LAS) sobre la mortalidad de tres caracoles dulceacuícolas en el Perú. *Ecología Aplicada*, pp. 81-87.

Iannacone, J., Garcia, J., Vela, H., Ticona, C., Torres, E., Quinte, G., y Vidarte, K. (2001). Toxicidad y bioacumulación de plomo en *Perumytilus purpuratus* (Lamarck, 1819) "chorito" (Bivaldia). *Bol. Soc. Quim.*, pp. 89-98.

Instituto Nacional de Ecología (1995). *NORMA Oficial Mexicana NOM-067-ECOL-1994, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de los sistemas de alcantarillado o drenaje municipal*. Consultado en junio 07, 2014 en <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/228/67.html>.

INECC (2009). *Metales pesados*. Consultado en Junio, 01, 2014 en <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>.



International Standard Soil Quality, ISO 11265 (1994). *Soil Quality, Determination of the specific electrical conductivity*. Switzerland: ISO.

International Standard Soil Quality, ISO 11466 (1995). *Soil quality-Extraction of trace elements soluble in aqua regia*. Switzerland: ISO.

Jacinto, M.E. y Aguilar, S. (2007). Concentraciones traza de metales en especies marinas de la bahía de Huarmey, Ancash, Perú. *Rev. Perú. Biol.*, 14 (2), 307-311.

Landis, W.G., y M.H. Yu, (1999). *Introduction to Environmental Toxicology*. Lewis Publishers, New York. 390 p.

Laube, V., Rammamoorthy, P., y Kushner, D. (1979). Mobilization and accumulation of sediment bound heavy metals by algae. *Environ. Contam. Toxicol*, pp. 763-770.

Leland, H. V., Luoma, S. N., Elder, J. F., y Wilkes, D. J. (1978). Heavy metals and related trace elements. *Control Fed*, pp. 1469-1514.

López Ramos, E. (1975). *Estudio geológico de la Península de Yucatán*. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros. México, D. F.: Beltrán Ed.

Mandelli, E. F. (1979). Contaminación por metales pesados. *Rev. Com. Perm.*, pp. 209-228.

Marcovecchio, J., Moreno, V., y Pérez, A. (1991). Metal accumulation in tissues of sharks from de Bahía Blanca Estuary, Argentina. *Marine Environmental Research*, pp. 263-274.

Massart D.L., Vandeginste, B.G.M., Buydens, L.M.C., De Jong, S. P., Lewi, J. and Smeyers-Verbeke, S. (1998). *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics: Part B*. Ed. Elsevier Sc. pp. 207-241



Mendoza, Fernando (2010). *Determinación de metales pesados, Cd, Cr, Cu y Pb en Farfantepenaeus aztecus (Ives, 1891) colectados en la Laguna de Tampamachoco, Veracruz* (Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana).

Naranjo, E. (2003). Moluscos continentales de México: Dulceacuícolas. *Revista de Biología Tropical*, pp. 495-505.

Naranjo, G. E. y Garcia, C. A. (1986). Algunas consideraciones sobre el género *Pomacea* (Gastropoda: Pilidae) en México y Centroamérica. *An. Inst. Biol. Univ. Nal. Autón. Méx. Ser. Zool.* (2), pp. 603-606.

NMX-AA-007-SCFI-2000 (2000). *Análisis de agua - determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. México: NMX.

NMX-AA-008-SCFI-2000 (2000). *Análisis de agua - determinación del ph - método de prueba*. México: NMX.

NMX-AA-012-SCFI-2001 (2001). *Análisis de agua - determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. México: NMX.

NMX-AA-051-SCFI-2001 (2001). *Análisis de agua - determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. México: NMX.

NMX-AA-093-SCFI-2000 (2000). *Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba*. México: NMX.

NOM-001-ECOL-1996 (1996). *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. México: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo. Moreno-Caraveo, 2014.



NOM-129-SSA1-1995 (1995). *Bienes y servicios. Productos de la pesca: secos-salados, ahumados, moluscos cefalópodos y gasterópodos frescos-refrigerados y congelados. Disposiciones y especificaciones sanitarias*. México: Secretaría de Salud.

Olivera Gómez, A. Y. (2009). *Laguna de Bacalar, Quintana Roo, México. Situation of the Natural Resources and poblamiento during the Holoceno*. Consultado en Febrero, 10, 2014 en http://www.Lagunabacalarinstitute.com/Yolox_chitl-Bacalar_Holoceno_AYOG.pdf.

Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2005). *Curso de Autoinstrucción en Evaluación de Riesgos*. Consultado en Junio 17, 2014 en <http://www.bvsde.ops-oms.org/tutorial/glosario.html>.

Páez-Osuna, F., (2005). Efectos de los metales, p. 343-360. In: A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, 2da Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.

Palacios, A. (1997). *Contaminantes ambientales y criterios de evaluación*. Consultado en junio 07, 2014 en <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a8.pdf>.

Patiño, V., George, A., y Tapia, M. (2003). La nobleza, belleza y via crucis del recurso pesquero caracol "chivita" en Yucatán. *Ciencia*, pp. 66-72.

Perera, G. y Walls, J. G. (1996). *Apple snails in the aquarium*. T. F. H. Publications Inc. Neptune City, New Jersey. 121 p.

Perkin-Elmer (1996). *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy*. USA: The Perkin-Elmer Corporation.

Determinación de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en el molusco *Pomacea flagellata* (Say, 1827) de la Laguna de Bacalar, Quintana Roo. Moreno-Caraveo, 2014.



POET. (2005, Marzo, 15). *Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región de Llaguna de Bacalar, Quintana Roo*. Periódico Oficial del Estado, pp. 126.

Pueblos de México (2012). *Bacalar, Pueblo Mágico, Quintana Roo*. Consultado en Febrero, 10, 2014 en http://pueblosmexico.com.mx/pueblo_mexico_ficha.php?id_rubrique=342.

Prichet, W.L., Fisher, F.F. (1987). *Properties and management of forest soils*. 2 ° Ed. John Wiley and Sons. New York, USA.

Ramírez, P., G. Barrera y C. Rosas (1989). Effects of chromium and cadmium upon respiration and survival of *Callinectes similis*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 43: 850-857.

Rangel Ruíz, R.J. (1988). Estudio morfológico de *Pomacea flagellata* Say, 1827 (Gastropoda: Ampullaridae) y algunas consideraciones sobre su taxonomía y distribución geográfica en México. *Anales del Instituto de Biología*, UNAM, vol. 58, págs: 21-34.

Rangel Ruiz, J. L., Gamboa Aguilar, J., & Ulises Medina, R. (2003). *Pomacea flagellata* (Say, 1827) Un gigante desconocido en México. *KUXULKAB´ Revista de divulgación de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*, 5-9.

Rojas Mingüer A., Morales Vela B. (2002). Metales en hueso y sangre de manatíes (*Trichechus manatus manatus*) de la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México. En: Rosado-May F.J., Romero Mayo R., De Jesús Navarrete A. (Eds.) (2002). *Contribuciones de la ciencia al manejo costero integrado de la Bahía de Chetumal y su área de influencia*. Serie Bahía de Chetumal No. 2. Universidad de Quintana Roo. México. pp. 133-138.



Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA). (21 de Marzo de 2011). *Decreto mediante el cual se declara como área natural la región conocida como parque laguna de bacalar con la categoría de parque ecológico estatal ubicada en la localidad de bacalar, municipio de bacalar, estado de quintana roo.*

Obtenido de http://sema.qroo.gob.mx/sistemas/transparencia/utaiippe_tansparencia/UTAIIPPE_ART.%2015/

Sokal R. R., Rohlf J.F. (1981). *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. 2nd ed., W. H. Freeman and Company, San Francisco, 859 p.

Quintana I., Mora G. (1994). *Análisis de suero Humano por Espectroscopía Atómica*. Tesis de Diploma, Facultad de Química, Universidad de la Habana, Cuba.

Tsai, L.J., Yu, K.C., Chang, J.S. y Ho, S.T. (1998). *Fractionation of Heavy metals in Sediment Cores from the Ell-Ren River Taiwan*. *Water Science Technology* 37, 217-224.

Teo, S. S. (2003). Damage potential of the golden apple snail *Pomacea canaliculata* (Lamarck) in irrigated rice and its control by cultural approaches. *International Journal of Pest Management*, 49(1): 139-148.

Vaithyanathan, P., Ramanathan, A. y Subramanian, V. (1993). *Transport and distribution of heavy metals in Cauvery River*. *Water, Air, and Soil Pollution* 71:13-28.

Vazquez Botello, A., Villanueva Fragoso, S., y Rosales Hoz, L. (2004). Distribución y contaminación de metales en el Golfo de México. En M. Caso, I. Pisanty, & E. Ezcurra, *Diagnóstico ambiental del Golfo de México* (págs. 683-713). México, D. F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de



Ecología; Instituto de Ecología; Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies.

Vázquez, G., Castro, T., Castro, J. y Mendoza, G.. (2011). Los caracoles del género *Pomacea* (Perry, 1810) y su importancia ecológica y socioeconómica. *ContactoS. REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA*, pp. 28-33.

Vazquez, S., G., Castro, B. T., Castro, M. J., y Mendoza, M. G. (2011). Los caracoles del género *Pomacea* (Perry, 1810) y su importancia ecológica y socioeconómica. *UAM-X*, pp. 28-34.

Vega, S. y J. Reynaga (1990). *Evaluación epidemiológica de riesgos ambientales causados por agentes químicos ambientales*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. OMS. Editorial Noriega: México.

Villanueva, F., y Botello, V. (1992). Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe mexicano: una revisión. *Contaminación ambiental*, pp. 47-61.

Villanueva, S., Botello, A., y Paez, F. (1988). Evaluación de algunos metales pesados en organismos del río Coatzacoalcos y de la Llaguna del Ostión, Ver., México. *Contaminación ambiental*, pp. 19-31.

Word, J.Q., y Mearns, A.J. (1979). 60- meter control survey off southern California. Tech. Mem. C229-TR. South. Calif. Coastal Water Res. Proj., El Segundo, CA. 58 pp.

YSI Environmental (2008). Gestión del Oxígeno Disuelto y costes relacionados en estanques de piscicultura. Consultado en Junio 27, 2014 en http://www.y.si.com/media/pdfs/A564-Gestion-del-Oxigeno-Disuelto-y-costes-relacionados-en-estanques-de-piscicultura_001.pdf.

