



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**Determinación de Metales Pesados Hg, Pb, Cd Y Zn  
en Agua de la Zona Urbana de la Bahía de Chetumal**

**T E S I S**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE**

**Ingeniero Ambiental**

**PRESENTA**  
**Viridiana Guadalupe Jiménez Contreras**

**DIRECTOR**  
Q. F. B. José Luis González Bucio

**ASESORES**  
Dr. José Manuel Carrión Jiménez  
Dr. Víctor Hugo Delgado Blas  
M. C. Benito Prezas Hernández  
Dr. Joel Omar Yam Gamboa



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2016



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

ASESOR:

Dr. José Manuel Carrión Jiménez

ASESOR:

Dr. Víctor Hugo Delgado Blas



*Este trabajo fue financiado con la Convocatoria 2014 “Apoyo a la Titulación” de la  
División de Ciencias e Ingenierías.*

## **Dedicatoria:**

Éste trabajo es dedicado a mi padre, Mario Alberto Jiménez May (QEPD), porque fuiste y serás una de mis más grandes inspiraciones y porque al recordarte vives en mi corazón, gracias por todo papá... donde quiera que te encuentres se que estás orgulloso de mi.

A mi madre, Thelma Contreras Hoy, porque has sabido ser una mujer guerrera y me has apoyado, te quiero mucho.

A mi esposo, Alvin Noe Nic Dzul, porque desde el comienzo hasta el final me has apoyado en todo y porque siempre estuviste alentándome para dar éste último paso en mi carrera, paso que me llevo más tiempo de lo pensado, pero al fin lo logré. Te quiero mucho, te amo, y espero sigamos logrando más metas juntos.

A mis hijos, Alexis Arath Nic Jiménez, Sofia Renata Nic Jiménez y Danna Victoria Nic Jiménez, ustedes han sido mi mayor inspiración porque para ustedes he decidido concluir esta meta y porque ustedes son mi vida entera; deseo en el futuro se sientan orgullosos de lo que soy.

Los quiero, los amo y por ustedes hoy estoy aquí.

## **Agradecimientos:**

Agradezco a Dios, porque sin él no estaría aquí, porque sin él, no sería lo que hoy soy y porque sin él no lo hubiese logrado, muchas gracias Diosito por todo lo que me das...

Gracias profesor Q.F.B. José Luis González Bucio, simplemente sin usted no lo hubiese logrado, agradezco mucho su tiempo, su apoyo, sus enseñanzas, es usted una persona admirable, de un buen y noble corazón, lo estimo mucho profe y que Dios le brinde muchos años más de vida.

A mi profesor Dr. José Manuel Carrión Jiménez, le agradezco mucho todo el apoyo que me brindo estos años profe, lo respeto y que Dios lo cuide por siempre.

A mis profesores Dr. Víctor Hugo Delgado Blas y Dr. Joel Omar Yam Gamboa, mis admirables profesores, gracias por sus consejos y el valioso tiempo prestado, de corazón, gracias.

A ti Alvin, gracias por apoyarme económicamente y emocionalmente, porque siempre me has apoyado y porque siempre estuviste y estás aquí, te quiero mucho, gracias.

Gracias a mi padre (QEPD) y madre, porque supieron darme la educación que he necesitado para estar aquí, cumpliendo mi meta, los quiero mucho, gracias; al fin, promesa cumplida.

Gracias a mis hermanos y hermanas que me apoyaron, porque no fue fácil, pero con su ayuda, me hicieron un poco más fácil este logro, los quiero.

Gracias suegra, sobrinas y amigos por apoyarme en su momento cuando más lo necesité, fueron importantes en esta etapa.

Gracias por tu apoyo y por siempre alentarme a dar éste paso, por fin lo he logrado!. Te quiero mucho comis, te doy las gracias con el corazón.

Y por último, pero con el mismo valor, les doy las gracias a mis hijos, por tenerme paciencia, porque los descuidé un poco, con las idas y vueltas, pero hoy llegó a su fin, y por todo eso, gracias mis niños, porque esto es por ustedes y para ustedes, los amo.

## INDICE

<b>Índice General</b> .....	I
<b>Resumen</b> .....	1
<b>1.- Introducción</b> .....	2
<b>1.1.- Antecedentes</b> .....	6
<b>1.2.- Justificación</b> .....	8
<b>1.3.- Objetivos</b> .....	9
<b>2.- Revisión bibliográfica</b> .....	10
<b>2.1.- Origen de los metales en los ecosistemas acuáticos</b> .....	10
<b>2.2.- Metales pesados</b> .....	11
<b>2.3.- Contaminación de sedimentos por metales pesados</b> .....	13
<b>2.3.1.- Asociación de los metales pesados con los sedimentos</b> .....	14
<b>2.4.- Parámetros fisicoquímicos</b> .....	16
<b>2.5.- Análisis estadístico</b> .....	18
<b>2.5.1.- Análisis multivariado</b> .....	18
<b>3.- Metodología</b> .....	20
<b>3.1.- Equipo</b> .....	20
<b>3.2.- Reactivos</b> .....	21
<b>3.3.- Diseño de muestreo</b> .....	21
<b>3.4.- Muestreo de sedimentos marinos</b> .....	23
<b>3.4.1.- Digestión de sedimentos</b> .....	24
<b>3.5.- Determinación de los metales pesados (Hg, Pb, Cd, Zn) en agua</b> .....	24

---

<b>3.6.- Determinación de los Parámetros fisicoquímicos .....</b>	<b>25</b>
<b>3.7.- Análisis estadístico de los datos.....</b>	<b>25</b>
<b>4.- Resultados y discusiones .....</b>	<b>26</b>
<b>5.- Conclusiones .....</b>	<b>33</b>
<b>6.- Recomendaciones .....</b>	<b>34</b>
<b>7.- Bibliografía.....</b>	<b>35</b>



## RESUMEN

El uso indiscriminado de los plaguicidas, metales, residuos agroquímicos y residuos de origen antropogénico en la ribera del Río Hondo y Bahía de Chetumal, han tenido como consecuencia la contaminación del suelo, diferentes cuerpos de agua, flora y fauna acuática, por ello es importante hacer estudios frecuentes de contaminantes ambientales para así conocer el comportamiento de los mismos, en nuestros ecosistemas acuáticos al ser impactados por diferentes vías como son los metales pesados.

En este trabajo se estudiaron diferentes métodos, utilizando técnicas analíticas para determinar las concentraciones de los metales analizados y con ello nos arrojó que los metales Pb y Hg rebasaron los valores permisibles de acuerdo a las normas existentes que evalúan la contaminación por metales pesados.

## 1. INTRODUCCIÓN

El impacto antropogénico provoca el asentamiento de la contaminación de diferentes componentes químicos en los sedimentos marinos y estos pueden llegar a bioacumularse en organismos por diferentes rutas en los cuerpos acuáticos. Diferentes estudios de contaminación ambiental se han realizado en la Bahía de Chetumal, mencionando algunos estudios están el de (Álvarez, 2002), (García, 2001), (González, *et al.* 2006), (González, *et al.* 2008), (Navarro, 1996), (Ortíz, 1997) y (Rojas, *et al.* 2002), por lo que es evidente evaluar el comportamiento de la toxicidad y contaminación; y analizar su correlación de las concentraciones de los metales pesados y algunos parámetros fisicoquímicos.

En el estado de Quintana Roo, se reconoce la necesidad de la protección del medio ambiente, en especial de los ecosistemas acuáticos. Para ello existe un marco normativo, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente (LEGPA, 2008). Esta discute y regula el uso de sustancias nocivas peligrosas que se han generalizado y van en constante aumento, ya no sólo en la industria, sino también en los diversos sectores sociales, lo cual se ha traducido en riesgos sanitarios y ambientales importantes (INE-Semarnat, 2000).

Para poder llevar un buen manejo de los recursos en la Bahía de Chetumal es de suma importancia conocer el estado actual de este ecosistema, así como de los posibles contaminantes, nocivos para la biodiversidad y la salud humana.

Es muy probable que en el caso de la Bahía de Chetumal, la contaminación por metales pesados sea proveniente de las fuentes emisoras de los ingenios del país de Belice y de México ubicados en la ribera del Río Hondo, por el uso de plaguicidas y fertilizantes en la zona cañera de la propia ribera. También por las descargas directas de aguas residuales a diferentes puntos de la Bahía, y los residuos sólidos y líquidos de la pequeña industria urbana, tales como, residuos hospitalarios, talleres de automóviles (aceites y lubricantes), tiradero municipal, etc.

La bahía de Chetumal es un cuerpo de agua que está altamente afectado por la contaminación de metales pesados en sus componentes. En la zona costera existen aproximadamente 30 fuentes que vierten sus aguas a la bahía sin tratar, estas fuentes son provenientes de la ciudad. No obstante, el Río Hondo descarga sus aguas a este cuerpo de agua y consigo trae arrastre de residuos agroquímicos e industriales (ingenios), por tanto, es de esperar que éste se encuentre contaminado con metales pesados, materia orgánica (ácidos fúlvicos y húmicos) así como, la presencia de nutrientes y mayoritarios. (González, *et al.* 2008).

También este cuerpo de agua es utilizado para recreación social y para practicar la pesca local, de modo que no sólo recibe descargas de desechos tóxicos de la ciudad de Chetumal, sino también de la ciudad de Corozal, Belice, que está a sólo 8 km de distancia. Ésta ciudad también tiene problemas con el tratamiento de sus aguas residuales y con el uso de drenajes o fosas sépticas, por lo que se considera como foco de contaminación para la Bahía (Rojas, *et al.* 2002).

La Bahía de Chetumal, está situada en el Sur de la península de Yucatán se encuentra en el municipio de Othón P. Blanco en el estado de Quintana Roo; Othón P. Blanco es el municipio más extenso con 18,760 km<sup>2</sup> y es el segundo más poblado con 224,080 habitantes, de los cuales 151,243 habitan en la ciudad de Chetumal (INEGI, 2015), presenta una temperatura anual promedio de 26.6 °C y una precipitación anual promedio entre 1,100-1,500 mm, se caracteriza por tener climas cálidos de humedad media con lluvias en verano y suelos de roca caliza sedimentaria (INEGI, 2009; 2011). En dicho municipio se encuentra el Río Hondo que colinda y delimita el límite fronterizo entre México y Belice, y la Bahía de Chetumal la cual se encuentra al margen de la ciudad de Chetumal, ambos cuerpos de agua son los más grandes de la parte Sur-Sureste del Estado.

El Río Hondo desemboca en la Bahía de Chetumal, tiene una longitud de 115 km, un área de cuenca de 7,614 km<sup>2</sup> y un escurrimiento natural promedio anual de 533 hm<sup>3</sup> (mil millones de litros) (INEGI, 2013).

La Bahía de Chetumal, es una bahía extensa (2,560 km<sup>2</sup>, incluyendo el área de Belice), pero relativamente somera, con profundidad promedio de 4 m, muestra depresiones angostas y profundas, con diámetros entre 10 y 100 m, conocidas localmente como “pozas”; tiene forma semi-alongada con 110 km de largo y un ancho de 20 km en promedio. La dirección del viento predominante a lo largo del año es del este-sureste, con rapidez media de 3.1 m/s y máxima de 7.6 m/s (Carrillo, *et al.* 2009).

En 1994 la Bahía de Chetumal fue decretada como Área Natural Protegida, “Santuario del Manatí” por el peligro de extinción del manatí, animal mamífero y representativo de dicho lugar (NOM-059-ECOL-1994).

La porción más importante son las aguas someras, con profundidades variables de 1 a 5 metros (<http://documents.mx/documents/bahia-de-chetumal.html>) y su temperatura media anual es de 26.5°C, y se registran las temperaturas más altas entre junio y agosto, con promedios de 28.3°C; los meses más fríos son de diciembre a febrero con promedios de 24.3° C (Flores y Espejel, 1994).

## 1.1 ANTECEDENTES

El Colegio de la Frontera Sur ha realizado desde 1993 diversos estudios enfocados al estudio de los niveles y distribución de plaguicidas organoclorados en sedimentos de la Bahía de Chetumal y Río Hondo, encontrándose diferentes plaguicidas (HCH's, Heptacloros, Drines, DDT's, Endosulfanes, etc.) en los sedimentos de la Bahía en los periodos de 1993-1995 (Álvarez, 2002).

El primer caso de mortandad masiva de bagres en la Bahía de Chetumal, fue registrado por las autoridades y medios de comunicación a partir del 11 de Junio de 1996. Por ello la PROFEPA solicitó la colaboración del CETMAR, CNA, Ecología del municipio Othón P. Blanco, ECOSUR, SAGARPA, SEDEMAR, SEMARNAP, SESA Y SIMAP; con la participación de estas dependencias se estableció el Comité Técnico Científico para el estudio de la mortandad de bagres en la Bahía de Chetumal (Navarro, 1996).

En el 2001 se realizó un estudio de especiación de metales pesados en sedimentos de la Bahía de Chetumal, Quintana Roo y la acumulación en el músculo de bagres (*Ariopsis assimilis*), como resultado, el Zn y el V fueron los metales más biodisponibles en las dos épocas del año y el Fe menos biodisponible tanto en sedimentos como en los organismos. También las relaciones mineralógicas entre el Fe, Zn, Pb, Cu, Cd, Ni y V sugirieron los aportes de estos metales de diferentes fuentes adicionales (García-Ríos, 2001).

Se realizó un estudio de los niveles de concentración de metales pesados en hueso y sangre de manatíes (*Trichechus manatus manatus*) de la Bahía de Chetumal y Río Hondo y se hallaron 14 metales en huesos de manatíes de la Bahía y un ejemplar de la Isla Holbox; las concentraciones de Ni, Cu, Cd, Pb y Hg fueron superiores a las reportadas en otros mamíferos marinos (Rojas, *et al.* 2002).

En el 2006 se estudió la contaminación por Hg, Pb, Cd y Zn en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México (González, *et al.*, 2006). La contaminación por metales pesados en la Bahía de Chetumal se estudió, cuantificando las concentraciones de Hg, Pb, Cd y Zn en tejido de mejillones (*Mytilopsis sallei*) en sedimentos marinos (González, *et al.*, 2006).

En el 2008 se estudió la contaminación de la Bahía de Chetumal por metales pesados, materia orgánica, y nutrientes producidos por las descargas de aguas residuales municipales. Se determinaron las concentraciones de los metales pesados (Cd, Pb, Hg y As) en sedimentos superficiales (González, *et al.* 2008).

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La Bahía de Chetumal es un cuerpo de agua que está altamente afectado por la contaminación de sus aguas de la cual existen algunas investigaciones que reportan los niveles de metales pesados en sus componentes. Es evidente que el desarrollo poblacional, turístico e industrial, está ocasionando daños a las diferentes especies marinas y también a la población que utiliza esta Bahía como balneario (González, *et al.* 2008).

Es estratégico mencionar que en 1996 se encontraron más de 20,000 bagres (*Ariopsis assimilis*) muertos, debido a una contaminación de fuentes no localizadas, por plaguicidas organoclorados (Ortíz, 1997).

En la zona costera existen fuentes que vierten sus aguas a la Bahía sin tratar, estas fuentes son provenientes de la ciudad. No obstante, el Río Hondo descarga sus aguas a este cuerpo de agua y consigo trae arrastre de residuos agroquímicos e industriales provenientes de los ingenios, por tanto, es de esperar que éste se encuentre contaminado con metales pesados, materia orgánica (ácidos fúlvicos y húmicos) así como, la presencia de nutrientes y mayoritarios.

Además en épocas de lluvia, se va provocando mayor dilución de los sedimentos, lo cual incrementa la presencia de metales pesados. Es decir, los agroquímicos y plaguicidas que se utilizan en la actividad cañera de la región estarían filtrándose con mayor rapidez hacia los cuerpos de agua de la Bahía y del Río.



## 1.3 OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

- Determinar el nivel de contaminación en la Bahía de Chetumal debido a metales pesados como Hg, Pb, Cd y Zn en los sedimentos de 3 balnearios de la Bahía de Chetumal.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar los niveles de concentración de los metales Hg, Pb, Cd y Zn en los sedimentos de 3 zonas utilizadas como balnearios, en la Bahía de Chetumal.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos (Temperatura, pH, Oxígeno disuelto, Conductividad) en la columna de agua.
- Correlacionar los metales pesados con los parámetros fisicoquímicos.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Origen de los metales en los sistemas acuáticos

Los metales tienen tres vías de entrada al medio acuático y son:

- a) La vía atmosférica, es debido a la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antropogénicos (principalmente combustión de combustibles fósiles y procesos de fundición de metales). En el sur de Quintana Roo, en lugares cercanos a la Bahía de Chetumal se cultiva la caña de azúcar y para su corte se quema cada seis meses, por lo que las cenizas de la quema llegan al cuerpo de agua en estudio.
- b) La vía terrestre, es debido al proceso de filtración de vertidos, de la escorrentía superficial de terrenos contaminados (minas, utilización de lodos como abono, lixiviación de residuos sólidos, precipitación atmosférica, etc.) y otras causas naturales. La ciudad de Chetumal aún no tiene relleno sanitario y sus residuos sólidos son desechados a un tiradero municipal al aire libre y sus lixiviados posiblemente sean transportados a la propia Bahía. Así mismo, los lodos residuales del ingenio azucarero existente en la zona, son vertidos a los márgenes del Río Hondo.
- c) La vía directa, es a consecuencia de los vertidos directos de aguas residuales industriales y urbanas a los cauces fluviales. Alrededor de la Bahía se desarrollan importantes actividades agrícolas, ganaderas e industriales para los países de

México y Belice. En la pequeña industria están los ingenios azucareros y maderas de uso industrial, así como también, algunas fábricas procesadoras de ron y de chile.

Además, el origen de los metales en los sistemas acuáticos puede ser natural o antropogénico (Förstner, 1989); éste último es el más dominante, ya que en la actualidad el uso de los metales pesados ha ido aumentando paralelamente al desarrollo industrial y tecnológico y actualmente es difícil encontrar una actividad industrial o un producto manufacturado en los que no intervenga algún metal pesado. (Förstner, 1989).

## 2.2 Metales pesados

La presencia en el terreno de diferentes materiales y estructuras geológicas son fuente de una gran variedad de iones disueltos en aguas superficiales, lo que permite saber, de no haber existido la actividad humana, que tipo de suelo atraviesa un cauce de agua. Algunos de estos iones tales como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{+2-}$ , se encuentran en forma mayoritaria, respecto a los demás elementos en todas las aguas continentales, mientras que otros se encuentran a niveles trazas, como es el caso de los metales pesados. Algunos de ellos son necesarios para el adecuado desarrollo de los microorganismos, plantas y animales (metales esenciales) (Duffus, 1984).

La importancia que tiene el estudio de metales pesados en aguas y sedimentos se debe a su elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación por los organismos vivos. Los

efectos tóxicos de los metales pesados no se detectan fácilmente a corto plazo, aunque si puede haber una incidencia muy importante a medio y largo plazo. Los metales son difíciles de eliminar del medio, puesto que los propios organismos los incorporan a sus tejidos y de estos a sus depredadores. La toxicidad de estos metales pesados es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos; un metal disuelto en forma iónica puede absorberse más fácilmente que estando en forma elemental.

El término *elemento traza* se refiere a los elementos que se encuentran en concentraciones muy bajas en los sistemas. Incluye tanto los elementos que son esenciales para los organismos como, Cu, Fe, Mn, Zn y Co, así como a los que no se le conoce alguna función biológica asociada y son altamente tóxicos, tales como Cd, Hg, Pb y Ag (Cervantes, 1999). Los metales traza pueden dividirse en “pesados” (con densidades superiores a  $5 \text{ g.cm}^{-3}$ ) y “ligeros” (con densidades inferiores a  $5 \text{ g.cm}^{-3}$ ).

Aunque el término “metales pesados” no ha sido aun uniformemente definido, y algunos autores incluso lo consideran como una expresión sin sentido (Duffus, 2002), se aplica ampliamente a un grupo de elementos químicos (metales y metaloides) asociados con la contaminación y la toxicidad o ecotoxicidad.

Todos los metales pesados se encuentran presentes en los medios acuáticos, aunque sus concentraciones (en ausencia de contaminación) son generalmente muy bajas. Los metales pesados se encuentran en estas aguas como coloides, partículas minerales (sólidos en suspensión), o fases disueltas (cationes o iones complejos). Las formas coloidales suelen

dar lugar a la formación de hidróxidos, mientras que las partículas sólidas incluyen una gran variedad de minerales. Las fases disueltas pueden a su vez ser capturadas por adsorción o absorción en arcillas o hidróxidos. Adicionalmente, los compuestos orgánicos pueden constituir fases con gran capacidad de captura de cationes metálicos, que en ocasiones dan lugar a compuestos extremadamente tóxicos (p. ej., metilmercurio:  $\text{CH}_3\text{Hg}$ ) (Martínez y Señor, 2001).

### 2.3 Contaminación de sedimentos por metales pesados

Las actividades humanas producen diferentes tipos de vertidos que incrementan la concentración de metales pesados en los sedimentos fluviales. Según su forma de asociación, los metales son susceptibles o no, de solubilizarse durante las modificaciones fisicoquímicas estacionales. La desoxigenación de las capas profundas durante el verano, ocasiona la reducción química de los óxidos asociados a la fase sólida, produciendo así, la disminución de la concentración de Fe y Mn en el sedimento. La reducción de estos dos elementos puede ocasionar la solubilización de ciertos metales adsorbidos en el sedimento como el Zn, Cr y Ni (El Falaki, *et al.* 1994; Baruah, *et al.* 1996).

Los sedimentos pueden actuar como portadores y posibles fuentes de contaminación debido a que los metales pesados pueden ser liberados a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales tales como pH, potencial redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelatos orgánicos (Förstner, *et al.* 1987; Sigg, *et al.* 1987; Carignan y Tessier, 1988; Vaithyanathan, *et al.* 1993; Singh, *et al.* 1999). Como se conoce, sólo ciertas formas

químicas son tóxicas para los organismos, estas incluyen iones libres y metales liposolubles (Chen, *et al.* 1996).

Numerosos estudios han demostrado el poder quelante del EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), que disuelve metales de los sedimentos incorporándolos a la columna de agua (Frimmel, *et al.* 1989; Alder, *et al.* 1990). Otra posibilidad es que la presencia de ciertos componentes de las formulaciones detergentes como los tensoactivos, agentes blanqueadores, estabilizantes, entre otros, participen en la movilización de los metales pesados (Wiener, *et al.* 1984; El Falaki, *et al.* 1994). Por lo tanto, el análisis de metales pesados en sedimentos, permite detectar la contaminación que puede pasar a las aguas y también proporciona información acerca de las zonas críticas del sistema acuático (Förstner y Salomons, 1980; Förstner, *et al.* 1993; Chen, *et al.* 1996).

### **2.3.1 Asociación de los metales pesados con los sedimentos**

Los sedimentos pueden definirse como mezclas complejas de fases sólidas que pueden incluir bacterias, materia orgánica, minerales arcillosos, óxidos metálicos, carbonatos, sulfuros y una numerosa cantidad de minerales; los contaminantes pueden estar asociados con varias de estas fases. Los sedimentos son considerados como destino final de diferentes sustancias introducidas al medio, natural o antrópicamente, acumulándolas en concentraciones superiores a las de aguas y organismos, lo que facilita su análisis químico.

Para estimar la removilización de los metales pesados desde los sedimentos bajo pequeños cambios en las condiciones ambientales es de gran utilidad determinar las especies químicas en que se encuentran, así como el tipo de sustrato al que se hallan asociados los cationes metálicos en los sedimentos (Rosental, *et al.* 1996; Usero, *et al.* 1997). La extracción secuencial puede dar información sobre el comportamiento de los metales pesados en los sistemas acuáticos, su movilidad y poder lograr así, una mejor previsión en la manipulación. La técnica de extracción química secuencial para los estudios de especiación se aplica extensamente en estudios medioambientales, aunque su capacidad de separar metales pesados o definir fracciones geoquímicamente no es perfecto, pero es útil para entender el comportamiento químico y la biodisponibilidad de metales en los sedimentos (Usero, *et al.* 1997; Mester, 1998; Martin, 1998; Usero, 1998; García-Rico, *et al.* 2004; Ahumada, *et al.* 2004; Carro, *et al.* 2005).

La estimación de la removilización de metales bajo condiciones ambientales y la asimilación potencial por los organismos son los principales objetivos para la diferenciación de especies en los metales traza enlazada a los sedimentos. Por otra parte, la biota puede interactuar a través de un gran número de vías con el medio ambiente que le rodea, modificando el pseudo-equilibrio entre las especies químicas en las fases líquida y sólida. Por otro lado, esta variabilidad posiblemente también es resultado de las propiedades de los metales y de la competición entre la adsorción de sedimento y la capacidad de complejación (Campbell y Tessier, 1987; Vaithyanathan, *et al.* 1993; Chen, *et al.* 1996).

## 2.4 Parámetros Físicoquímicos

### Temperatura

La temperatura de las aguas es un parámetro importante, cualquier cambio puede acelerar las reacciones químicas, reducir la solubilidad de los gases, intensificar el olor y sabor del agua. También, la temperatura del agua está en función de la época del año, el caudal, la situación de la zona de muestreo, la hora del día de su determinación, la profundidad del medio y la calidad del agua. La temperatura fluctúa entre  $25-32\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3$  (NMX-AA-007).

### Oxígeno Disuelto

Este parámetro es muy importante en el control de la calidad del agua, las aguas superficiales limpias normalmente están saturadas de oxígeno disuelto (OD), pero la demanda de oxígeno de los desechos orgánicos puede consumirlo rápidamente. El OD en el agua es uno de los parámetros de mayor importancia en la evaluación de la contaminación, ya que estos niveles dependen de las actividades físicas, químicas y bioquímicas en su curso de agua. El OD está en función de la temperatura, la presión, la composición físico-química, la salinidad, la materia orgánica y caudal (Martínez, 1998; Marín, 1996). Las aguas superficiales no contaminadas suelen estar bien oxigenadas, e incluso sobre saturadas con niveles de oxígeno disuelto superiores a 8 mg/L (NMX-AA-012-SCFI, 2001), factor necesario para que exista vida acuática en las aguas superficiales (Tebbutt, 1999).



## **pH**

El pH es un parámetro muy importante en la biodisposición de los metales, debido a que, como ya se ha señalado, cualquier cambio puede provocar modificaciones en la liberación o quelación de los metales. En aguas estuarinas el intervalo es de 6.5 a 7.5 unidades de pH (NMX-AA-008, 1980); para el caso de los estuarios se observa en general, en la cabecera del estuario, un pH ácido (menor a 7) y en la boca marina, un pH alcalino (mayor a 7) (Martínez, 1998).

## **Salinidad**

Este término se define como la concentración total de los iones disueltos por kilogramo de agua, sin ser específico para cloruro de sodio. Existe una preponderancia distintiva entre los cationes como el sodio, potasio, calcio y magnesio, y los aniones como los cloruros, sulfatos y carbonatos, entre otros, para aguas de diferente origen (Martínez, 1998). Hunt, propone valores de salinidad para diferentes tipos de agua; el área de estudio, pertenece al de aguas estuarinas y lagunares y el rango de salinidad está 300-29,999 mg/L (Hunt, 1997).

## **Conductividad**

La conductividad es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones disueltos, sus concentraciones absolutas y relativas, su movilidad y su valencia y de la temperatura y la

viscosidad de la solución. Este parámetro sirve para estimar el contenido total de constituyentes iónicos.

## **2.5 Análisis estadístico**

### **2.5.1 Análisis multivariado**

El volumen grande de datos generados en análisis ambiental ha traído como consecuencia la necesidad de utilización de métodos especiales del procesamiento de los resultados.

Los resultados de las mediciones medioambientales se caracterizan usualmente por su elevada variabilidad, en la que se incluye, además de su variabilidad natural, la incertidumbre resultante de los procesos analíticos como el muestreo, la conservación de las muestras, las mediciones analíticas, etc., de manera que al emplear métodos univariados para su estudio se pierde a menudo información (Grupo de Quimiometría, 2001).

Entre las principales herramientas quimiométricas se encuentran los métodos multivariados, como son el análisis de Discriminantes (AD), las correlaciones Canónicas y el Análisis por Componentes Principales (ACP). Estas han sido empleadas en los últimos 20 años, en la interpretación de datos numéricos resultantes de los diseños de experimentos y de la medición de numerosas variables simultáneamente.

En el presente trabajo se utilizó el programa XLSTAT-Pro versión 7.5.3 (2014 Addinsoft, NY, USA), para establecer correlaciones lineales, realizar el 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, 1994; Carlosena, 1999; Cal, 2001).

La idea básica del ACP es encontrar un pequeño número de combinaciones lineales no correlacionadas a partir de las 'n' variables originales, tales que expliquen el mayor por ciento de la variabilidad total de los datos originales. 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, 1998).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Equipos

- Espectrómetro de Absorción Atómica, de doble rayo Varian, modelo SpectrAA 220, con llama aire/acetileno y óxido nitroso/acetileno y generador de hidruros VGA 77.
- Balanza analítica Sartorius BL 120 S (0.1 mg).
- Tamices de nylon de 63  $\mu\text{m}$  y un rotor de tamizaje Fisherbrand.
- Centrífuga Solvat.
- Tubos de centrífuga de polipropileno, de fondo redondo, con tapa y capacidad de 70 ml.
- Manta de calentamiento PYRO MULTI-MAGNESTI con regulación de temperatura y se utilizó fibra de vidrio para uniformar la temperatura en todo el recipiente.
- Draga Ekman con mensajero de acero inoxidable de 100 pies de línea, con capacidad para 2 kg de sólidos.
- Conductímetro portátil HANNA modelo HI9635 en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  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 $\mu\text{l}$ . Marca Oxford

### 3.2 Reactivos

Los reactivos utilizados para 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 %.
- Ácido acético glacial, J.T. Baker, 99.8%.
- Agua bidestilada para lavado de los utensilios.
- Cloruro Estannoso (cloruro de estaño II), J.T. Baker.
- Borohidruro de Sodio, J.T. Baker.
- Patrones (estándares)  $1000 \pm 0.1 \text{ ppm}$  de cada elemento metálico. Marca Varian.

### 3.3 Diseño de muestreo

Se estableció el diseño de muestreo en 3 puntos del litoral de la Bahía de Chetumal, asumiendo la existencia de un gradiente de contaminación. Se recolectaron muestras de sedimento y agua.

Los puntos de muestreo se seleccionaron de acuerdo a los antecedentes que nos proporcionaron información de los índices de contaminación en el litoral de la Bahía. Se efectuaron dos muestreos temporales seca y lluvia, en 3 puntos ubicados en la zona urbana de la Bahía de Chetumal; 1.- Balneario Calderitas, 2.- Balneario Dos Mulas y 3.- Balneario

Punta Estrella (Fig. 1).

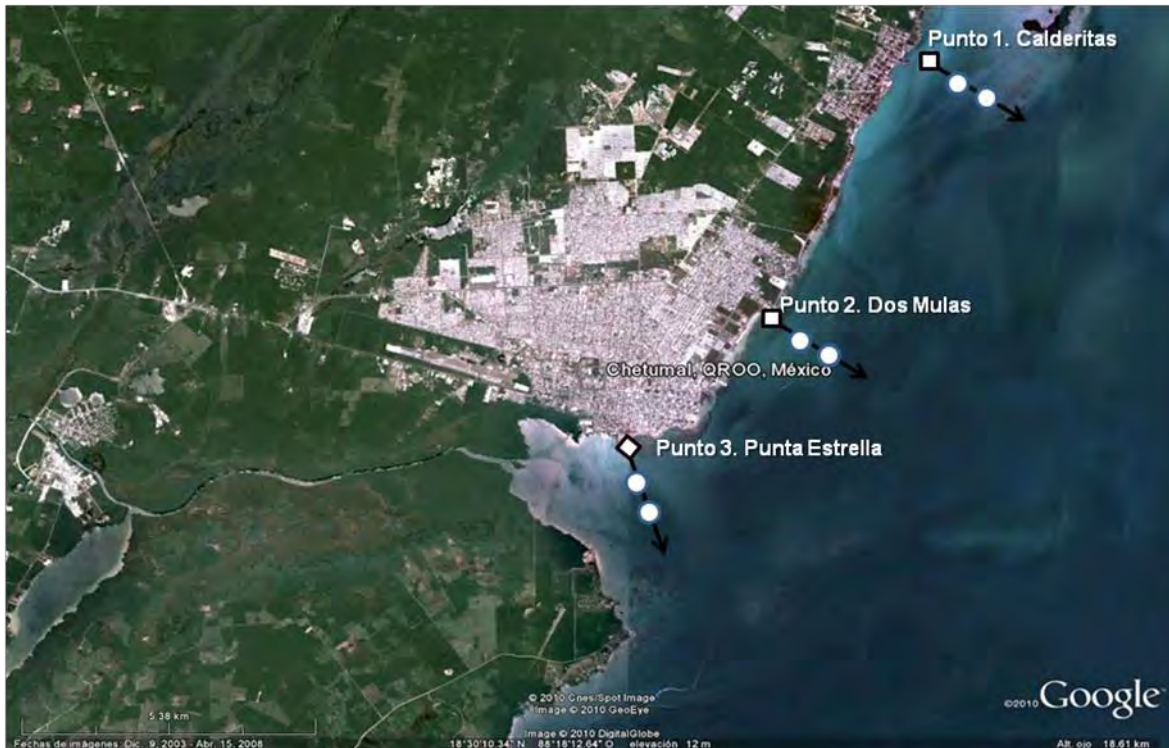


Figura 1. Zona de muestreo.

Los sedimentos y aguas, se recolectaron en frascos de polipropileno, previamente lavados con ácido nítrico diluido al 10%, siguiendo el criterio propuesto por Word y Mearns, (1979). Los frascos fueron etiquetados y conservados a 4° C.

### 3.4 Muestreo de sedimentos marinos

Se tomaron tres réplicas de sedimento por estación tanto en época de seca (marzo de 2013) como en época de lluvia (septiembre de 2013), a una distancia de 500 metros de línea de costa. La metodología para el diseño de muestreo se tomó de (Carbajal, 1999). Se seleccionó la distancia de 500 metros de acuerdo al objetivo del trabajo, que es evaluar el impacto sobre la Bahía de las descargas de residuales.

Las muestras de sedimentos se tomaron en un área de 20 cm de diámetro y 15 cm de profundidad aproximadamente (González, 1989), en 3 puntos (3 réplicas). Los sedimentos se secaron, liofilizaron y tamizaron empleándose la fracción menor de 63  $\mu\text{m}$  para su posterior digestión pseudototal de acuerdo a (ISO-11466, 1994). Esta fracción incluye arcillas ( $< 2\mu\text{m}$ ) y limos (2-63 $\mu\text{m}$ ). El tamizado se efectuó con un tamiz de polipropileno limpio y libre de metales traza, en esta fracción se concentraron prácticamente la totalidad de materia orgánica y metales pesados (Förstner y Salomón, 1980). Para el análisis de los metales, se aplicó el procedimiento descrito en la norma (ISO-11047, 1998).

Las determinaciones se realizaron por Espectrometría de Absorción Atómica con llama o generación de hidruros / vapor frío, según el caso.

### **3.4.1 Digestión de los sedimentos**

Los sedimentos marinos fueron transportados al laboratorio inmediatamente después de muestreados para proceder a su liofilización, tamizaje y digestión (ISO-11466, 1994). Los materiales y equipos utilizados en el laboratorio pudieron introducir contaminación en las muestras que se analizaron es por ello que se sometieron a limpieza con HNO<sub>3</sub> 10% previo a su utilización.

### **3.5 Determinación de los metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en agua**

Para la determinación de los metales pesados en las muestras de agua, se procedió a utilizar las normas que establece el APHA, AWWA, WPCFE, 1992. Posteriormente se analizaron las muestras con un Espectrofotómetro con un equipo de la marca Varian Modelo Spectra 220.

Los parámetros instrumentales empleados en las determinaciones se muestran en la Tabla 1.



Tabla 1. Parámetros instrumentales para la determinación de los metales pesados por EAA.

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

A/A = aire / acetileno

### 3.6 Determinación de los Parámetros fisicoquímicos

Se determinaron *in situ* varios parámetros fisicoquímicos como temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad, con la ayuda de analizadores portátiles de la marca Hanna.

### 3.7 Análisis estadístico de los datos

Los resultados obtenidos se procesaron; analizando la correlación lineal de Pearson, ANOVA y el Análisis de Componentes Principales (ACP), para así tratar y darle una interpretación a los mismos.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados del análisis de los sedimentos en los 3 puntos de muestreo seleccionados, se muestran en las Tablas 1 y 2, y Figuras 1 y 2.

Tabla 1. Metales pesados en sedimentos en temporada de seca, 2013.

SECA		Zn	Pb	Cd	Hg	Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Conductividad
<b>CALDERITAS</b>	M1	0.71	2.77	0.11	3.43	23.00	0.00	6.70	1.40
<b>DOS MULAS</b>	M2	0.64	2.25	0.11	2.33	23.00	0.00	6.60	1.70
<b>PUNTA ESTRELLA</b>	M3	0.96	4.05	0.10	4.32	25.00	0.00	6.50	1.50

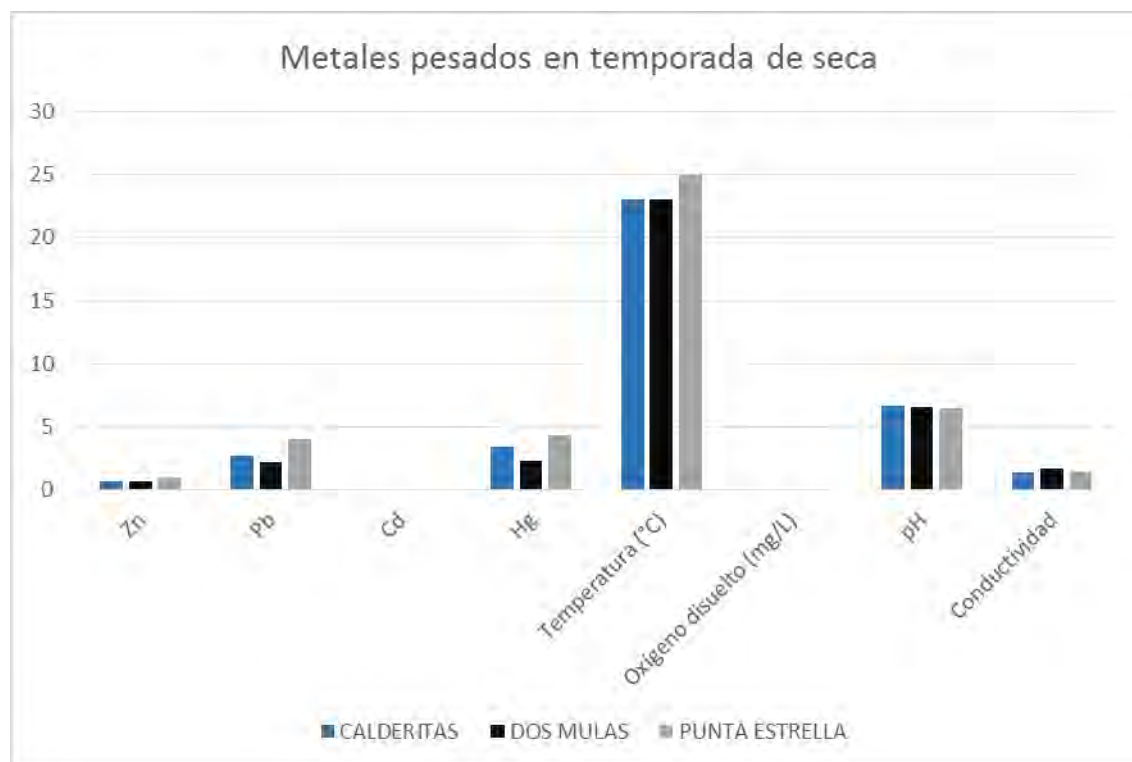


Figura 1. Metales pesados en sedimentos en temporada de seca, 2013.

Tabla 2. Metales pesados en sedimentos en temporada de lluvia, 2013.

LLUVIA		Zn	Pb	Cd	Hg	Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Conductividad
<b>CALDERITAS</b>	M1	0.41	1.37	0.01	4.23	24.00	4.40	6.20	1.20
<b>DOS MULAS</b>	M2	0.41	1.35	0.00	3.25	25.00	0.80	6.10	5.40
<b>PUNTA ESTRELLA</b>	M3	0.34	1.34	0.00	1.80	24.00	1.50	6.20	2.50

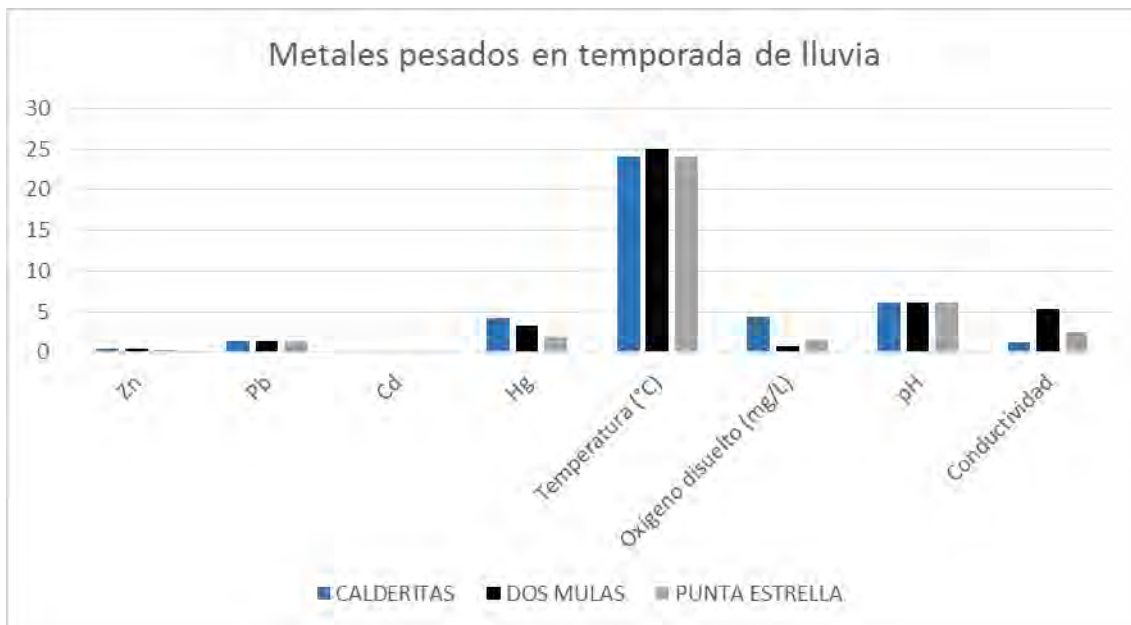


Figura 2. Metales pesados en sedimentos en temporada de lluvia, 2013.

En las Tablas 1 y 2, se presentan los resultados de los análisis de los metales pesados en sedimentos de la Bahía y parámetros fisicoquímicos en la columna de agua de las estaciones de muestreo en temporada de seca y lluvia respectivamente en el año 2013. En ambas estaciones de muestreo por lo general se presentaron concentraciones ligeramente

elevadas los metales Hg, Pb, Cd y Zn, en la mayoría de los puntos de muestreo, de acuerdo a la norma NOM-001-ECOL-1996. Los valores de las concentraciones del Hg fluctuaron entre 1.80 y 4.32  $\mu\text{g/g}$ , en los puntos de muestreo M1 correspondiente al balneario Calderitas, M2 al balneario Dos mulas y M3 al balneario Punta Estrella, se observaron las mayores concentraciones de los metales Pb y Hg en este estudio. Los valores que se encuentran en color rojo rebasaron los límites que establecen la norma, éstos resultados son validados corriendo dos veces una muestra para su QC (Control de Calidad). Con respecto a la temperatura hubo cambios ligeros debido a que se empezó el muestreo a temprana hora y se concluyó por la tarde. Con respecto a los valores de pH en ambas estaciones se presentaron lecturas que nos arrojan información de muestras ligeramente acidificadas y por lo general no presentó mucha fluctuación, éste parámetro es de suma importancia para expresar la movilidad del metal estudiado, ya que un pH ácido libera a los elementos metálicos y pueden ser biodisponibles a cualquier organismo vivo.

El Pb se detectó en los tres puntos de muestreo y los valores encontrados, son inferiores a los reflejados en las referencias (Araúz, *et al.* 2013) (23  $\mu\text{g/g}$ ); (González, 1991) (198 $\mu\text{g/g}$ ); (Gundacker, 2000) (52 $\mu\text{g/g}$ ); (Márquez, *et al.* 2008) (29  $\mu\text{g/g}$ ); (Gil, *et al.* 2006) (30  $\mu\text{g/g}$ ); (Osuma, 2007) (26.9  $\mu\text{g/g}$ ); (García, *et al.* 2004) (6.4  $\mu\text{g/g}$ ); (Lara, 2003) (2.9  $\mu\text{g/g}$ ). Exceden además los criterios ecológicos según la Norma Oficial Mexicana (0.5  $\mu\text{g/g}$ ) (NOM-052-ECOU-93) para sedimentos marinos.

Los valores de Hg encontrados en los sedimentos fueron superiores a los publicados por Do Nascimento (López, 2003) en un estudio realizado en Sudamérica en lugares con relativamente poca influencia antropogénica (hasta 0.1  $\mu\text{g/g}$ ), pero similares a los reportados por (1,09-3,80  $\mu\text{g/g}$ ) (Araúz, *et al.* 2013). También, estos valores fueron superiores a lo que marca la Norma Mexicana (hasta 0.2  $\mu\text{g/g}$ ) (NOM-052-ECOU-93) para sedimentos marinos.

Las concentraciones arrojadas de los metales Cd y Zn se encontraron por debajo de los que indican las normas nacionales (NOM-001-ECOL-1996). Los valores se compararon con los estipulados en las NOM - 031-SSA-1993, 129-SSA-1995.

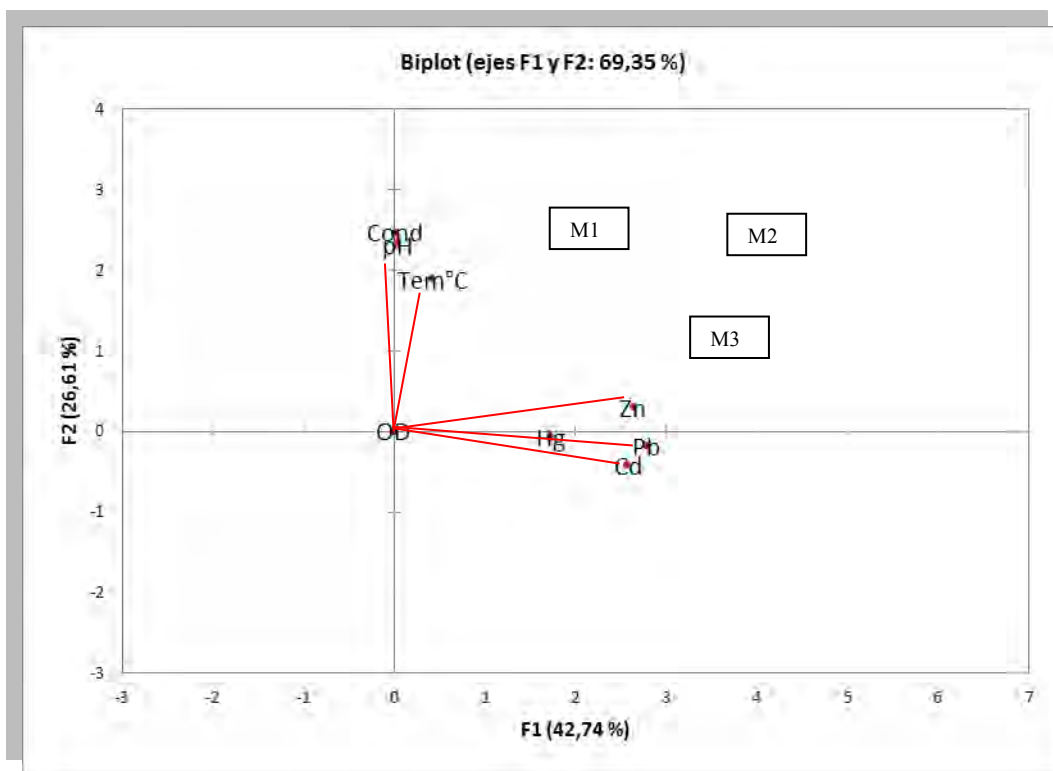
Tabla 3. Correlaciones lineales de Pearson en temporada de seca 2013.

Variables	Zn	Pb	Cd	Hg	Temp °C	OD	pH	Cond
Zn	<b>1</b>							
Pb	<b>0.841</b>	<b>1</b>						
Cd	<b>0.789</b>	<b>0.919</b>	<b>1</b>					
Hg	0.459	0.519	0.301	<b>1</b>				
Temperatura (°C)	0.199	0.127	-0.046	0.048	<b>1</b>			
Oxígeno disuelto (mg/L)								
pH	0.085	-0.043	-0.082	0.026	0.264		<b>1</b>	
Conductividad	0.079	-0.049	-0.054	-0.050	0.389		0.580	<b>1</b>

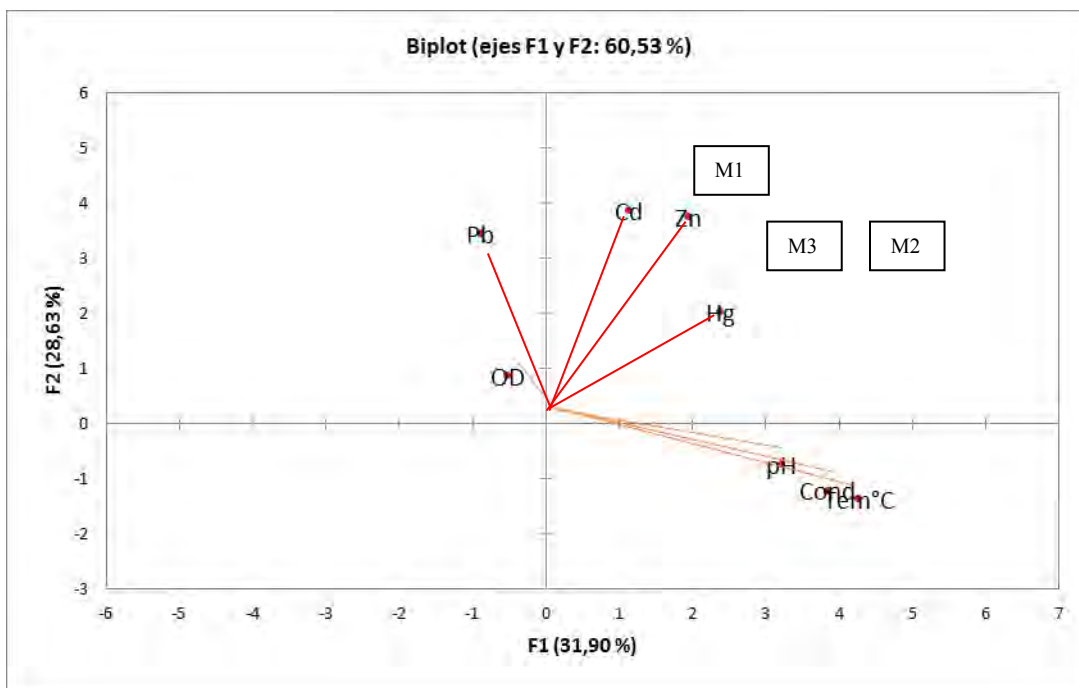
Tabla 4. Correlaciones lineales de Pearson en temporada de lluvia 2013.

Variables	Zn	Pb	Cd	Hg	Temp °C	OD	pH	Cond
Zn	<b>1</b>							
Pb	0.493	<b>1</b>						
Cd	0.757	0.410	<b>1</b>					
Hg	0.362	0.106	0.349	<b>1</b>				
Temperatura (°C)	0.168	-0.303	-0.045	0.265	<b>1</b>			
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.004	-0.092	-0.036	0.419	-0.212	<b>1</b>		
ph	0.090	-0.351	-0.022	0.425	0.585	0.387	<b>1</b>	
Conductividad	0.191	-0.174	0.017	0.103	0.900	-0.570	0.321	<b>1</b>

Para proceder a la utilización del análisis estadístico multivariado, en el tratamiento de los contenidos totales de los metales en los sedimentos, primeramente se realizaron los análisis de correlación lineal de Pearson (Tablas 3 y 4), para establecer los grupos de asociación existentes entre las variables analizadas.



Gráfica 1. ACP de metales pesados en temporada de seca, 2013.



Gráfica 2. ACP de metales pesados en temporada de lluvia, 2013.

Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales (ACP) para los tres sitios de la Bahía de Chetumal, están representados en Gráfica 1 y 2, ahí se puede observar que se explica el **69.35%** de la varianza total a través de dos componentes principales (Fig. 1 y 2).

El primer componente principal (CP-I), está definido por 4 metales Cd, Zn, Hg y Pb, así como por el pH y la temperatura, el cual explica el **42.74%** de la varianza total. El componente II, explica una varianza de **26.61%**, definido solo con la conductividad.

En la Gráfica 2, se muestran los resultados para la temporada de lluvia; como se puede observar el comportamiento observado es muy similar al descrito anteriormente en la temporada de seca. Se puede observar que se explica el **60.53%** de la varianza total a través de dos componentes principales. El primer componente principal (CP-I), está definido por 3 metales Cd, Zn, Hg, así como por el pH, la temperatura y la conductividad, el cual explica el **31.90%** de la varianza total. El segundo componente, explica una varianza de **28.63%**, definido al elemento Pb y la conductividad, este cambio fue debido a que en la temporada de lluvia se encontraron las concentraciones más bajas para el elemento Pb, esto no sucedió con los otros elementos metálicos.



## 5. CONCLUSIONES

1. En todas las estaciones de muestreo los niveles de los metales Pb y Hg en los sedimentos rebasaron las normas existentes que evalúan la contaminación por metales pesados. Sólo para el caso del Pb y Hg la concentración promedio supera los límites máximos permisibles por la referida legislación (0.5 y 0.2 mg/L respectivamente).
2. Las concentraciones en los sedimentos resultaron ser indicadores adecuados de contaminación por metales pesados en la Bahía de Chetumal. Estos se pueden considerar moderadamente contaminados por Pb y Hg al comparar sus contenidos con los establecidos en las normas mexicanas para sedimentos marinos estuarinos.
3. El análisis de componentes principales (ACP) permitió interpretar la presencia de las concentraciones de los metales Pb y Hg en los tres balnearios de la Bahía de Chetumal y definió dos componentes, los cuales fueron de diferente gradiente de contaminación. Los resultados obtenidos del ACP para los tres sitios de la Bahía explicaron el **69.35%** de la varianza total a través de dos componentes principales.

## 6. RECOMENDACIONES

1. Ampliar el análisis y muestreos, utilizando técnicas más sensibles como la Espectrometría de Plasma Acoplado Inductivamente- Espectrometría de Masas.
2. Ampliar el estudio de la región al Río Hondo y otras lagunas costeras, para completar la caracterización de este ecosistema.
3. Continuar el monitoreo en la columna de agua para actualizar la información y mantener el control sobre la contaminación.
4. Proponer formas de biorremediación con empresas no gubernamentales que se dediquen al cuidado y preservación de ecosistemas acuáticos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Ahumada, R.; González, E.; Neir J. (2004). *Especiación de Zn en sedimentos marinos del fiordo Aysén*. Invest. Mar. 32 (1) 3-10.
2. Alder, A. C.; Siegrist, H.; Gujer, W.; Giger, W. (1990). *Behaviur of NTA and EDTA in biological wasterwater treatment*. Water Res. 24, 733-744.
3. Álvarez, L. M. T. (2002). *Plaguicidas Organoclorados en sedimentos de la bahía de Chetumal y del río Hondo*. Una revisión de estudios realizado de 1993-1999,171-178.
4. APHA-AWWA-WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid, España. 2-1, 2-20.
5. Araúz D.; García, A. L.; Rodríguez, F.; Zárata, M. F. (2013). *Nivel de Contaminación y Distribución Espacial de Metales Pesados en Sedimentos Superficiales de Bahía Damas, Isla Coiba*. Centro Internacional de Investigación y Desarrollo Científico Experimental. RIDTEC. Vol. 9, n.º 2. Panamá.
6. Baruah, N. K.; Kotoky, P.; Bhattacharyya, K. G.; Borah, G. C. (1996). *Metal speciation in Jhanji River sediments*. The science of the Environment 193, 1-12.
7. Cal, P. M. J.; Carlosena, A.; Andrade, J. M.; Martínez, M. L.; Muniategui, S.; López-Mahía, P.; Prada, D. (2001). *Antimony as a tracer of the anthropogenic influence on soils and estuarine sediments*. J. Water, Air and Soil Pollution, 129, 333.

8. Campbell, P. G. C., (1987). *Tessier A. Metals Speciation, Separation and Recovery*, Lewis. Michigan, 201-224.
9. Carbajal, V. W., (1999). *Detección de los efectos ambientales sobre las comunidades marinas*. Instituto del Mar del Perú. Callao, Perú. 11.
10. Carignan, R.; Tessier, A. (1988). *The co-diagenesis of sulphur and iron in acid lake sediments of southwestern Québec*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 1179-1188.
11. Carlosena, A.; Andrade, J. M.; Tomas, X.; Fernández, E. Prada D. (1999). *Classificación of edible vegetables affected by different traffic intensities using potential curves*. *Talanta*, 48, 745.
12. Carrillo, L.; Palacios-Hernández, E.; Ramírez, A. M.; Morales-Vela, J. B. (2009). *El sistema ecológico de la Bahía de Chetumal / Corozal: Costa Occidental del Mar Caribe*. J. Espinoza-Avalos, G.A. Islebe y H.A. Hernández-Arana (eds.) ECOSUR.
13. Carro, B.; Borego, J.; López-González, N.; Lozano-Soria, O. (2005). *Fraccionamiento de Fe y metales pesados en la materia en suspensión de la Ría de Huelva (SO de España)*. *Geogaceta* (8).
14. Cela, R. (1994). *Avances en Quimiometría Práctica*. Ed. Univ. Stgo. de Compostela.
15. Cervantes, C. (1999). *Contaminación ambiental por metales pesados*. AGT Edito, S. A. México.

16. Chen, W.; Tan, S. K.; Tay, J. H. (1996). *Distribution, Fraccional composition and release of sediment bound heavy metals in tropical reservoirs*. Water, air, and soil pollution, 235. Duffus, J. H. (1984). *Toxicología Ambiental*. Omega, Edimburgo 82-94.
17. Duffus, J. H. (2002). “Heavy metals”—a meaningless term. (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 74, 5, 793 –807.
18. El Falaki, K.; Perrin, C.; Belkesam, L.; Peisajovich, A.; Martin, G. (1994). “Impacto de los detergentes sobre los sedimentos. Movilización de metales”, *Tecnología del agua* 128, 25-31.
19. Flores, J. S.; Espejel, I. (1994). *Tipos de vegetación de la Península de Yucatán*. Etn Yucatenense, Fascículo 3. Universidad Autónoma de Yucatán, 135 p.
20. Förstner, U. (1989). *Contaminated Sediments*. In Lecture Notes in Earth Sciences, S. Bhattacharij. (eds), Germany, 21, 1-157.
21. Förstner, U.; Calmano, W.; Hong, J. (1987). *Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential*. Water science technology Editions. 256.
22. Förstner, U.; Ahlf, W.; Calmano, W. (1993). *Sediment quality objectives and criteria development in Germany*. Water science technology. 28(8-9), 307-316.
23. Förstner U.; Salomons W. (1980). *Trace metals analysis on polluted sediements*. I. Assesment of sources and intensities. Environment Technology Letters 1, 494-505.

24. Frimmel, F. H.; Grenz, R.; Kordik, E.; Dietz, F. (1989). *Nitrotriacetate (NTA) and ethylenedinitrilotetraacetate (EDTA) in rivers of the Federal Republic of Germany*. *Vom Wasser* 72, 175-184.
25. García, C. J.; Acuña, G. J.; Vargas, Z. J. (2004). *Metales traza en sedimentos costeros de Costa Rica*. (52) 2.
26. García-Rico, L.; Soto, C. M.; Jara, M. M.; Gómez, A. (2004). *Fracciones geoquímicas de Cd, Cu y Pb en sedimentos costeros superficiales de zonas Ostrícolas del estado de Sonora*. México, 20 (4).
27. García-Ríos, V. Y. (2001). *Especiación de metales pesados en sedimentos de la bahía de Chetumal, Quintana Roo, y la acumulación en el tejido muscular de bagres (Ariopsis assimilis)*. 143-149.
28. Gil, M. N.; Torres, A.; Harvey, M.; Esteves, J. L. (2006). *Metales pesados en organismos marinos de la zona costera de la patagonia Argentina continental*. (41) 2.
29. González, H. (1989). *Estudio de la contaminación marina por metales pesados en algunas áreas cubanas*. Tesis Doctoral, ciudad de la Habana, capitulo 1 y 2.
30. González, H. (1991). *Water, Air and Soil Pollution*. 56, 83-93.
31. González, B. J. L.; Carrión, J. J. M.; Díaz, L. C. (2006). *Estudio de la contaminación por Hg, Pb, Cd y Zn en la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México*. *Rev. Soc. Quím. Perú*. 72(1).
32. González, B. J. L.; Carrión J. J. M.; Yam, G. J. O.; Díaz, L. C. (2008). *Contaminación de la Bahía de Chetumal por metales pesados, materia orgánica*

- y nutrientes producidos por las descargas de aguas residuales municipales.*  
Edif. Habana, Cuba. *Caos Conciencia* 1:5-11.
33. *Grupo de Quimiometria, i Qualimetria de Tarragona.* (2001). *Quimiometría una disciplina per al ‘análisi química.* Universitat de Rovira i Virgili.
34. Gundacker, C. (2000). Comparison of heavy metal bioaccumulation in freshwater molluscs of urban river habitats in Vienna. Austria. (110) 61-71.
35. Hunt, C. B. (1997). *Physiography of the United States.* W.H. Freeman and Co., San Francisco. 240.
36. <http://documents.mx/documents/bahia-de-chetumal.html>
37. INE. NTE-CCA-014/88. (2000). *Instituto Nacional de Ecología.* Semarnat.
38. International Standard Soil Quality, ISO 11047. (1998). *Determination of Cadmium, Chromium, Cobalt, Cooper, Lead, Manganese, Nickel, and Zinc in Aqua Regia Extracts of Soil – Flame and Electrothermal Atomic Absorption Spectrometric Methods.*
39. International Standard Soil Quality, ISO 11466. (1994). *Soil Quality, Extraction of traces metals soluble in Aqua Regia.*
40. Lara Villa, M. A. (2003). *Origen, cantidad y destino de metales pesados en Langostino del río Marabasco.* Tesis de maestría. Colima, México.
41. LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE, Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, Última reforma publicada DOF 16-05-2008.

42. López Do Nascimento, M. R., (2003). *Proporción de valores de Referencia para concentraciones de metales y metaloides en sedimentos límnicos y fluviales de la cuenca hidrográfica del río Tiete, sp.* Tesis de doctorado.
43. Marín, R. (1996). *Química, Microbiología, Tratamiento y Control Analítico de Aguas.* Ed. Nanuk, S.L., 246.
44. Márquez, A.; Senior, W.; Fermín, I.; Martínez, G.; Castañeda, J.; González, Á. (2008). *Cuantificación de las concentraciones de metales en tejidos de peces y crustáceos de la Laguna de Unare, estado Anzoátegui, Venezuela.* (18) 1.
45. Martín, R.; Sánchez, D. M.; Gutiérrez, A. M. (1998). *Talanta.* 46, 1115 – 1121.
46. Martínez, C. L. (1998). *Ecología de los sistemas acuícola.* A.G.T. Editor, S.A. México, D.F. 1-24.
47. Martínez, G. y Señor, W., (2001). *Especiación de metales pesados (Cd, Zn, Cu y Cr) en el material en suspensión de la pluma del Río Manzanares, Venezuela,* (26) 002, pp. 53-61.
48. Massart D. L. (1998). *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics: Part B.* Ed. Elsevier Sc.
49. Mester, Z.; Cremisini, C.; Ghiara, E.; Morabito, R. (1998). 359, 133 – 142.
50. Navarro, D. (1996). *Contaminación química en la bahía de Chetumal.* Biol. Caribe SEMARNAP. Del. Quintana Roo. 10 pp.
51. Norma Mexicana NMX-AA-007-1980. (1980). *Determinación de temperatura- Método visual con termómetro,* publicado en el Diario Oficial de la Federación en el año 1980.



52. Norma Mexicana NMX-AA-008-1980. (1980). *Determinación de pH- Método Potenciométrico*, publicado en el Diario Oficial de la Federación en el año 1980.
53. NMX-AA-012-SCFI-2001. (2001). *Análisis De Agua - Determinación de Oxígeno Disuelto en Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método de Prueba (CANCELA A LA NMX-AA-012-1980)*.
54. NOM-052-ECOU93. (1993). *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas nacionales*.
55. NOM-031-SSA1-1993. (1993). *Establece los límites máximos permisibles para el consumo humano en productos de la pesca. Moluscos bivalvos frescos-refrigerados*.
56. NOM-059-ECOL/1994. (1994). *Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos que determinan las especies y subespecies de flora y fauna silvestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección*. Diario Oficial de la Federación, 16/05/1994.
57. NOM-001-ECOL-1996. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y aguas nacionales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*.
58. NOM-129-SSA1-1995. (1995). *Productos de la pesca: secos-salados*. Disposiciones y especificaciones sanitarias.
59. Ortiz, H. M. C. (1997). *Estudio emergente sobre la mortalidad de Bagres en la Bahía de Chetumal*. Secretaria de Infraestructura, Medio Ambiente y Pesca,

- Gobierno del Estado de Quintana Roo, El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal. Chetumal, Q. Roo, 84 p.
60. Osuna-López, J. I.; Izaguirre, F. G.; Armenta, E. B. (2007). *Concentración y distribución de Metales Pesados (Cu, Cd, Mn, Pb y Zn) en el sedimento superficial de la Bahía de Ceuta, Sinaloa, México.*
61. Quintana I.; Mora G. (1994). *Análisis de suero Humano por Espectroscopía Atómica.* Tesis de Diploma, Facultad de Química, Universidad de la Habana, Cuba.
62. Rojas, A.; Morales, B. (2002). *Metales en hueso y sangre de manatíes (Trichechus manatus manatus) de la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México.* Contribución de la ciencia MIC. 133-138.
63. Rosental, R.; Castaigne, A.; PW de Leeuw; Mancía, G. (1996). *Trace metal distribution in different fractions of nearshore marine sediments.* Coast Shelf Science, 305.
64. Sigg, L.; Sturm, M.; Kistler, D. (1987). *Vertical transport of heavy metals by settling particles in Lake Zurich.* Limno Oceanogr 32, 112-130.
65. Singh, A.K.; Hasnain, S. I.; Banerjee, D. K. (1999). *Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar Rier a tributary of the lower Ganga, India.* Environmental Geology 39 (1), 90-98.
66. Tebbutt, H. T. Y. (1999). *Fundamentos de control de la calidad del agua.* Limusa Noriega. (eds), México. 239.
67. Usero, J.; Gamero, M.; Morillo, J.; Gracia, I. (1998). *Environ. Int.* 24, 487.

68. Usero, J.; Morrillo, J.; Gracia. I. (1997). *Contaminación por Metales en sedimentos Acuáticos*. Tecnología del Agua, 166.
69. Vaithiyathan, P.; Ramanathan, A.; Subramanian, V. (1993). *Transport and distribution of heavy metals in Cauvery River*. Water, air, and Soil Pollution 71, 13-28.
70. Wiener, J. G.; Jackson, G. A.; May, T. W.; Cole, B. P. (1984). *Contaminants in the Upper Mississippi River*, In: Wiener, J. C., Anderson, R. V., McConville, D. R. (eds) Butterworth Pub., Stoneham, MA, 139-147.
71. Word, J. and Mearns, A. (1979). *60-meter survey control off southern California*. Southern California Coastal Water Research project. T.M. No. 229.