

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

METALES PESADOS EN LA LAGUNA YALAHAU

Tesis de licenciatura

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

Eric Lavoisier Salcedo

MÉXICO, D.F.

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente Prof: LILIANA VIRGINIA RAQUEL SALDIVAR Y OSORIO

Vocal Prof: ADELA CASTILLEJOS SALAZAR

Secretario Prof: ANA MARIA MARTÍNEZ VÁZQUEZ

1er. Suplente Prof: MARGARITA CHAVEZ MARTINEZ

2do. Suplente Prof: ALFONSO DURAN MORENO

Sitio en donde se desarrolló el tema: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

Asesor del tema: ANA MARIA MARTINEZ VÁZQUEZ

Sustentante: ERIC LAVOISIER SALCEDO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su amor y comprensión: a mi hermana Karine y sobre todo a mi madre, Leonor. Tu ejemplo me hace querer superarme cada día. Las quiero mucho.

A Roberto, Esteban, Chino, Crespo, Bora, Pedro, Guillaume, Morris, Pipe y Quique. Todos estos años de amistad son invaluable. Ojalá nos hubiéramos conocido muchos años antes.

Al Moles, Luis, Nicolás, Job, Romualdo, Rodrigo y Omar. Me alegro que la vida nos halla juntado en la universidad. Su amistad significa mucho para mi.

Agradezco en especial a mi directora de tesis, la Dra. Ana Martínez, por su compañía, profesionalismo y paciencia para llevar a cabo este trabajo.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, en particular a los programas PAPIIT-IN202506-2 y PAPIIT-IN222904/15 por su aportación a esta línea de investigación.

A la Comisión de Áreas Naturales Protegidas (CONAMP), en especial al director del Área de Protección de Flora y Fauna Yum-Balam, el Dr. Francisco Remolina por su amplia colaboración.

Al Instituto de Física de la UNAM, más precisamente a las personas del laboratorio Peletron que ayudaron al análisis de las muestras: los doctores Corina Solís, Karim López y Francisco Javier Jaime.

A las doctoras Liliana Saldivar y Adela Castillejos por sus comentarios acerca de este trabajo.

A todos los que conformamos el equipo de trabajo de la Dra. Ana Martínez.

ÍNDICE

RESUMEN	6
JUSTIFICACIÓN	7
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	8
• <u>METALES PESADOS Y LAS ENFERMEDADES QUE PUEDEN PRODUCIR.</u>	8
• <u>LA THALASSIA TESTUDINUM Y LOS METALES PESADOS.</u>	25
• <u>ZONA DE ESTUDIO: ISLA HOLBOX Y LAGUNA YALAHAU.</u>	34
• <u>LLUVIAS Y LA CONCENTRACIÓN DE LOS METALES PESADOS.</u>	36
MATERIALES Y MÉTODO DE MUESTREO	38
OBJETIVO GENERAL	41
OBJETIVOS PARTICULARES	41
HIPÓTESIS	41
RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
• <u>VALIDACIÓN DEL MÉTODO PIXE.</u>	43
• <u>COMPORTAMIENTO DE LA LAGUNA YALAHAU.</u>	45
• <u>CONTAMINACIÓN EN LA LAGUNA DE YALAHAU.</u>	50
CONCLUSIONES	64
ANEXO	65
• <u>MÉTODO PIXE</u>	65
BIBLIOGRAFÍA	72

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es esencialmente realizar un diagnóstico sobre la contaminación por metales pesados en la laguna de Yalahau, en el estado de Quintana Roo, en distintas épocas del año, y tratar de encontrar las posibles fuentes en la zona de estudio.

El área de estudio es la laguna de Yalahau, ubicada en las inmediaciones de la isla de Holbox, Quintana Roo. Debido a la enorme cantidad de recursos naturales presentes en el lugar, esta zona costera se declaró el 6 de Junio de 1994 Área Natural Protegida, por decreto de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), con el nombre de Área de Protección de Flora y Fauna “Yum Balam”.

Los cambios en la concentración de metales pesados pueden dañar o incluso desaparecer algunos de los ecosistemas de la zona. Por lo tanto, es importante analizar el grado de conservación de la región con base en la concentración de algunos metales pesados. Se utilizó el pasto marino *Thalassia testudinum* como bioindicador, con la finalidad de observar la situación de la laguna y posteriormente si así se requiere, hacer estudios de restauración en la zona.

En este trabajo se analiza la contaminación por metales pesados en esta zona. Para ésto, se realizaron análisis mediante la técnica llamada *Photoelectron Induced X-ray Emission* (PIXE). Se utilizó la especie *Thalassia testudinum* (hojas y rizomas con raíces) como bioindicador de estos metales, ya que éste es un pasto marino presente y abundante en zonas tropicales y subtropicales. Se tomaron muestras de ocho sitios a lo largo de la laguna de Yalahau en las inmediaciones de la isla de Holbox, Quintana Roo. El resultado de este estudio nos da la concentración de cada metal pesado medido, y con estos datos tratamos de determinar su enriquecimiento en la zona, su comportamiento estacionario y su procedencia. Así mismo, se hace una distinción entre la absorción de metales esenciales y los que son tóxicos en el pasto marino, y se comprueba la idea de la “dilución por crecimiento” en estos sistemas.

JUSTIFICACIÓN

La contaminación ambiental creada por el ser humano, sobre todo a partir del principio de la era industrial a finales del siglo XIX, se percibe en todos los niveles de la Tierra. Los gases contaminantes emitidos a la atmósfera han provocado que la temperatura global del planeta haya aumentado, lo cual ha llevado a una disminución de la capa de ozono, sequías, deshielo de los polos, aumento de huracanes en número e intensidad, entre muchas otras cosas. Los contaminantes vertidos en el agua han dejado algunos ríos y lagos, junto con sus alrededores, inutilizables para cualquier propósito. La contaminación puesta en el suelo se filtra por los mantos freáticos, intoxicando así la zona en específico además de sus entornos.

Lo anterior ha traído consigo nuevas enfermedades, como por ejemplo la “*Itai-itai*” en Japón en 1950 por envenenamiento por cadmio, o más casos de enfermedades ya existentes, como es el caso del cáncer de piel (relacionado con la disminución de la capa de ozono), y más desastres naturales como ya se mencionó (más huracanes y sequías).

La industria química, en donde los ingenieros químicos tienen un papel particularmente importante, ha contribuido en gran medida a que los contaminantes no cesen de esparcirse en el ambiente. Éstos son muy variados, y parte de ellos son los metales pesados.

Decidí entonces realizar esta investigación sobre la contaminación en metales pesados en una zona de la Republica Mexicana (Laguna Yalahau, Quintana Roo), porque pienso que como ingeniero químico se tienen las herramientas para ayudar a diagnosticar, restaurar y preservar el ambiente, en lugar de degradarlo. Con los conocimientos adquiridos durante mi formación, podré contribuir para promover que se realice un uso responsable de los recursos naturales y de los conocimientos.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

METALES PESADOS Y LAS ENFERMEDADES QUE PUEDEN PRODUCIR.

Se denomina “metal pesado” a aquel elemento químico que posee una masa molar comprendida entre 63.55 y 200.59 g/mol y que presenta una densidad superior a 4 g/cm³. Este término suele estar relacionado con la toxicidad, aunque muchos de estos metales no lo sean especialmente; por ello se les puede dividir entre elementos esenciales y elementos tóxicos.

Para que se les considere esenciales, los elementos deben cumplir cuatro condiciones: primero, que la ingesta insuficiente provoque deficiencias funcionales y reversibles si éste vuelve a estar en las concentraciones adecuadas; segundo, que sin el elemento, el organismo no crezca ni complete su ciclo vital; tercero, que su presencia influya directamente en el organismo y esté involucrado en sus procesos metabólicos; y finalmente cuarto, que el mismo efecto en el organismo no pueda ser conseguido por ningún otro elemento. Tomando únicamente en cuenta los metales pesados medidos en este estudio, son considerados como esenciales para el organismo analizado (*Thalassia testudinum*) el cobre, el zinc y el manganeso.

Desde el punto de vista químico, se consideran como elementos tóxicos el cadmio, el mercurio, el plomo y el cromo, ya que sus cationes son ácidos de Lewis blandos debido a que la relación carga/radio es baja. Estos ácidos de Lewis tienen la tendencia a enlazarse con bases blandas, como por ejemplo los restos cisteinato (contienen el grupo RS⁻, una base blanda) de proteínas, ejerciendo de esta forma su acción tóxica en el organismo. Así, se puede decir que los metales pesados que forman ácidos de Lewis blandos son tóxicos. Cuando se habla de metales pesados se suele incluir al arsénico, aunque propiamente este elemento no es un metal sino un metaloide. La acción tóxica del arsénico se produce por la formación del ión As³⁺.

Habiendo ya dividido a los elementos en 2 grupos, se pueden hacer estudios de la respuesta de un organismo a la concentración de elementos esenciales y de aquellos que son tóxicos. En la Figura 1 se muestra la relación entre la respuesta de un organismo y la concentración de un elemento esencial (Figura 1 a) y tóxico (Figura 1 b).

FIGURA 1 (a)

Relación entre la concentración de un elemento esencial con la respuesta de un organismo.

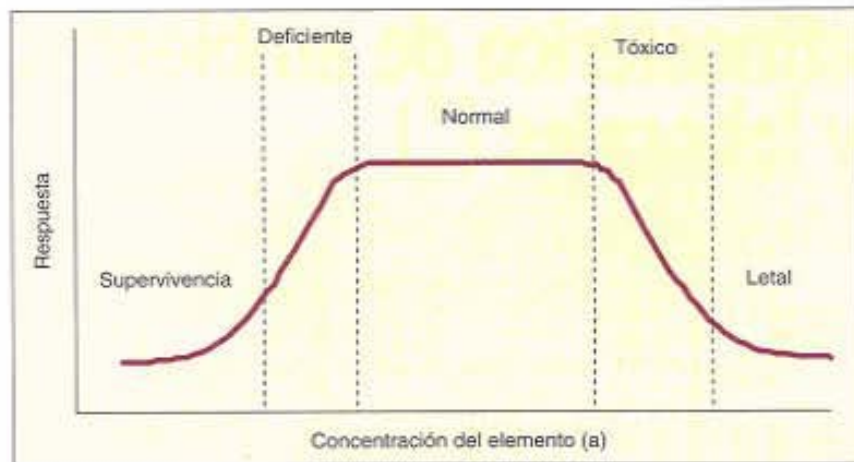
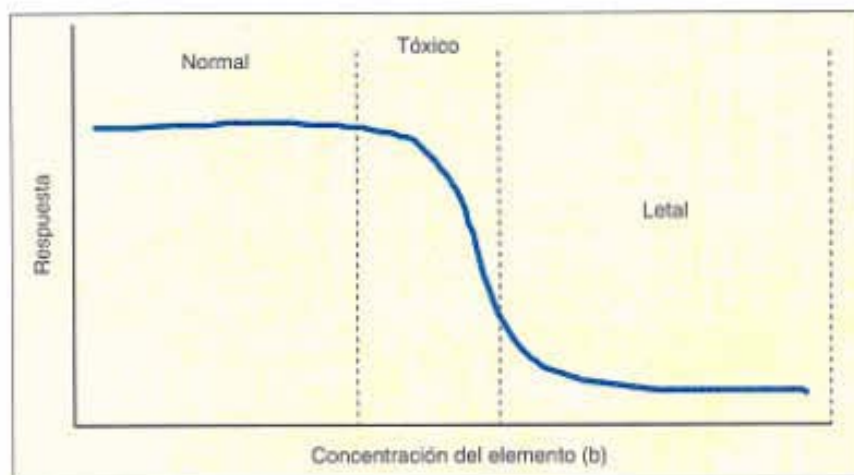


FIGURA 1 (b)

Relación entre la concentración de un elemento tóxico con la respuesta de un organismo.



Para cada elemento esencial existe un intervalo de concentraciones considerado óptimo para un organismo (Figura 1 (a)). En este intervalo se alcanza una concentración con la que se pueden desarrollar correctamente las funciones que dependen de ese elemento. Por debajo de este intervalo se produce la deficiencia, lo que conlleva a la aparición de efectos patológicos o incluso la muerte. Por encima del intervalo óptimo también aparecen efectos patológicos o la muerte, derivados de la toxicidad del elemento.

En el caso de elementos tóxicos, se observa en la Figura 1 (b) que entre menos concentración, mejor será su desarrollo; y que dosis elevadas son letales. Lo mismo que sucede para los elementos esenciales y tóxicos se puede decir para los metales pesados y el metaloide estudiados en este trabajo. Algunos metales son esenciales mientras que otros son tóxicos a cualquier concentración.

Para regular la concentración de los elementos, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, *Environmental Protection Agency* en inglés), así como la Agencia para las Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR, *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* en inglés) y la organización mundial de la salud (WHO, *World Health Organization* en inglés) han determinado una serie de límites permitidos para la concentración de diversos metales pesados. Por encima de estas concentraciones los metales pueden causar graves trastornos en los seres vivos, y finalmente ocasionar la muerte. A continuación se muestra un resumen de los límites permitidos para ciertos metales en distintas condiciones de dureza del agua, la cual es una característica química que está determinada por el contenido en carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, y que mezclada con detergentes, cuando es muy dura (es decir con alto contenido de carbonatos), puede producir sales insolubles e incrustaciones en tuberías. La Tabla 1 reporta los valores límite en sistemas acuáticos. La Tabla 2 contiene las dosis máximas en los humanos.

TABLA 1

Límites permitidos para metales en distintos medios acuáticos

Metal	Dureza del agua (mg Ca/L) (agua dulce)	Límite máximo (µg/L) en sistema de agua dulce	Límite máximo (µg/L) en vida acuática estearina o zonas costeras
As		50	50
Pb	50	1.30 (*)	15 (*)
	150	3.20 (*)	
	200	7.70 (*)	
Cr		0.1 – 0.6	50
Cu	50	6.50 (*)	2.9 (+)
	150	12.00 (*)	
	200	21.00 (*)	
Zn	50	180.00 (#)	76.6 (*)
	150	320.00 (#)	
	200	570.00 (#)	
Ni	50	56.00 (x)	7.1 (x)
	150	96.00 (x)	
	200	160.00 (x)	
Mn		50	50

+: Concentración promedio por 1 hora; x: Concentración promedio en 24 horas *: Concentración promedio en 4 días #: Niveles que no pueden excederse en ningún lapso.

TABLA 2

Dosis máximas en agua para consumo humano

Metal	Límite en agua de consumo humano (µg/L)
As	50 (+)
Pb	15 (#)
Cr	100 (+)
Cu	1300 (+)
Zn	5000 (+)
Ni	100 (*)
Mn	50

*: Criterios para el agua; +: Máximo nivel de contaminación #: Nivel máximo en la sangre.

Como se puede observar tanto en la Tabla 1 como en la 2, los límites de concentración no son constantes para todos ecosistemas ni para todos los metales. Existen distintos confines y también diferentes tiempos de residencia para cada elemento en cada lugar, ya que inclusive hay ocasiones en los cuales no se deben sobrepasar ciertos niveles durante ningún periodo de tiempo. Sin embargo, es importante señalar que el comportamiento visto anteriormente en la Figura 1 sobre metales esenciales y tóxicos es válido en cualquier lugar. El límite que se muestra en las Tablas representan concentraciones permitidas que son muy bajas (todos los niveles máximos son del orden de $\mu\text{g/L}$).

Las consecuencias por sobrepasar esos límites se pueden observar en la Tabla 3 para el ser humano. También se presentan los efectos cuando los metales no se encuentran en las concentraciones necesarias.

TABLA 3

Enfermedades causadas por sobrepasar los límites establecidos de metales

ELEMENTO	DEFICIENCIA	SOBREDOSIS
Arsénico		Cáncer en estómago, intestinos, pulmones y piel, infertilidad en mujeres, anemia
Plomo		Anemia, daño al riñón y al cerebro
Cromo	Trastornos en el metabolismo de la glucosa	Daños en el riñón (Nefritis)
Cobre	Anemia, "tambaleo"	Envenenamiento crónico de Cobre, enfermedad de Wilson-Bedlinton
Zinc	Enanismo, crecimiento retardado de las gónadas, acrodermatitis entero-pática (trastorno de la piel)	Fiebre, diarrea
Níquel		Cáncer de pulmón, laringe, nariz y próstata
Manganeso	Falta de crecimiento en los niños.	"Manganismo", problemas de respiración y de equilibrio.

Como se puede observar en la Tabla 3, ya sea por deficiencia o por sobredosis de estos metales pesados, las enfermedades que acarrear son muchas. Por ejemplo la anemia es engendrada por deficiencia de cobre y cobalto, y por sobredosis de

plomo y arsénico. Estos últimos, al ser elementos tóxicos, no originan padecimientos por deficiencia, como ya se vio anteriormente en la Figura 1 (b). Para el níquel, que es un metal no tóxico, no se han relacionado enfermedades debido a su deficiencia; sin embargo, se ha demostrado que es un elemento esencial por las funciones que este ejerce en el cuerpo humano.

Para este estudio se seleccionaron los siete elementos que se muestran en las Tablas 1, 2 y 3 porque son trascendentales para el funcionamiento del ambiente y del cuerpo humano, y por lo tanto, es importante conocer sus niveles límite en distintos medios (Tablas 1 y 2). También resulta significativo conocer las consecuencias de sobrepasar esos límites para los humanos (Tabla 3). Se buscó además que dentro de estos elementos hubiera esenciales (Cu, Zn y Mn) y tóxicos (Cr, As y Pb) para la vida de los organismos. Así podremos observar la diferencia entre su comportamiento en un sistema biológico.

Con la finalidad de tener información más detallada acerca de los siete elementos analizados en este trabajo, se describirán de manera individual sus características. Se reportarán las concentraciones límite en diferentes circunstancias, y se describirán datos sobre las enfermedades que pueden ocasionar. También se reportará su posible procedencia en el ambiente y a partir de actividades humanas. Esta información proviene de la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR).

- Arsénico.

El primero en aislar el arsénico fue el inglés Alberto Magno en 1250, aunque se conocía desde tiempos más remotos, lo mismo que algunos de sus compuestos, especialmente los sulfuros. Desde los tiempos de Cristo se conocían las propiedades del oropimente (sulfuro de arsénico $[As_2S_3]$) y del rejalgar (AsS), y se sabían los efectos irritantes, tóxicos y corrosivos. Los médicos árabes usaron los compuestos de arsénico en fumigaciones, píldoras y pociones además de aplicaciones externas. Estos compuestos fueron también utilizados como venenos a lo largo de la historia; se cree que

Napoleón murió por envenenamiento con arsenolita (trióxido de diarsénico (As_2O_3)).

En la naturaleza, el arsénico se encuentra libre y combinado con un gran número de minerales. Generalmente se encuentra en forma pentavalente y existen más de 150 minerales que lo contienen, como la arsenolita y la cobaltita (CoAsS). En la clasificación de los elementos por su abundancia en la corteza terrestre figura en el puesto 52.

Por lo general, las aguas superficiales tienen bajos contenidos de arsénico (alrededor de $8 \mu\text{g/L}$). Sin embargo, cuando éstas se encuentran en zonas con clima tropical, la concentración puede llegar a ser muy elevada, como lo observado por ejemplo en Japón, Nueva Zelanda y Estados Unidos. Se han encontrado también concentraciones elevadas en aguas subterráneas para el consumo humano en Argentina, Chile y México, en particular en Laguna Verde (Kumar y Suzuki, 2002). En este último caso, se encontraron concentraciones de $500 \mu\text{g/L}$, lo cual es 10 veces superior al límite máximo en sistemas acuáticos (ver Tabla 1) y superior a la máxima permisible por las normas mexicanas vigentes (NOM-127-SSA1-1994).

La mayor parte del arsénico que está en el ambiente concentrado proviene de la actividad humana, como en el empleo de insecticidas, en cultivos como la vid, el algodón y el tomate. De igual manera, las descargas intensas de este metaloide al medio ambiente a partir de los gases de chimenea y líquidos de descarga industrial provenientes de la fundición de minerales (especialmente los no ferrosos, tales como cobre, plomo y cobalto) provocan que el arsénico se acumule en el suelo.

Dadas sus variadas fuentes, no resulta raro que los vegetales y animales lo capten y que llegue al hombre a través de los alimentos. En Estados Unidos, se determinó que en la dieta promedio se consumen entre 0.05 y 0.16 ppm de arsénico. Algunos alimentos como los mariscos, mostraron concentraciones mucho más altas que oscilaron, según el producto, entre 15.9 y 45.8 ppm. En sistemas de agua dulce no contaminada, su concentración se encuentra entre

1 y 10 $\mu\text{g/L}$, subiendo hasta el intervalo de 100 a 5000 $\mu\text{g/L}$ en áreas con actividades industriales (Smedley y Kinniburgh).

Las intoxicaciones por arsénico pueden ser de tipo aguda o crónica; la de tipo aguda se debe principalmente a la ingestión de alimentos, y sus efectos son daño gastrointestinal (vómito, diarrea), baja de la presión sanguínea, daño renal, pérdida de movimiento voluntario y potencialmente la muerte. Los efectos por intoxicación crónica se deben por lo general a una prolongada exposición ambiental y se pueden dividir en cuatro categorías: la primera se llama intoxicación general y produce anemia, enfisema pulmonar, y pérdida de peso y cabello; la segunda categoría es de tipo carcinógeno, y se produce por contaminación del agua, que al estar en contacto con los humanos provoca cáncer de piel, de pulmón y gastrointestinal; el tercer tipo de intoxicación crónica es mutágeno y causa mortalidad del feto y esterilidad; y finalmente la cuarta categoría de intoxicación crónica es de tipo teratógeno, la cual consiste en una alteración estructural y funcional del desarrollo que impide la formación armónica del feto. En casos extremos, conduce a la muerte del embrión.

La EPA ha clasificado al arsénico inorgánico como grupo A, agente cancerígeno humano. Su concentración máxima permitida en el agua potable es de 50 $\mu\text{g/L}$ (Tabla 2) mientras que el valor recomendado por esta agencia para consumo humano es de 10 $\mu\text{g/L}$.

- Plomo.

No se sabe quien descubrió el plomo, aunque es conocido desde la antigüedad, tanto que incluso se menciona en el Viejo Testamento. Su nombre proviene del latín *plumbum* y fue usado por los romanos para hacer acueductos y en soldaduras, aleado con estaño. Lo extraían principalmente en las Galias y en Hispania.

En la actualidad, el plomo es un elemento especialmente importante debido a su utilización en una gran variedad de procesos industriales y a su toxicidad aguda y crónica. Es relativamente abundante en el aire, el agua, el suelo, las plantas y los animales. Ocupa el lugar 36 en orden de abundancia en la

corteza terrestre. Sus fuentes naturales son la erosión del suelo, el desgaste de depósitos minerales y las emanaciones volcánicas. Desde el punto de vista comercial, los minerales de plomo más importantes son la galeana (sulfuro de plomo, PbS), la cerusita (carbonato de plomo, $PbCO_3$) y la anglesita (sulfato de plomo, $PbSO_4$). De hecho, la galeana es la principal fuente de plomo y se encuentra generalmente asociada con diversos minerales de zinc y, en pequeñas cantidades con cobre, cadmio y fierro.

Su resistencia a la corrosión atmosférica y a la acción de los ácidos, especialmente el sulfúrico, lo hace muy útil en la edificación, en las instalaciones de fábricas de productos químicos, en tuberías y envolturas de cables. En la actualidad se utiliza también en la producción de acumuladores y baterías, y como aditivo antidetonante para gasolina e insecticidas. De hecho, el tetraetilo de plomo ($C_8H_{20}Pb$) se usaba ampliamente en México como antidetonante en las gasolinas hasta los años ochenta, pero debido a que fue clasificado por varias organizaciones como agente cancerígeno en esos años (como por ejemplo la EPA), se tuvo que sustituir por otros compuestos menos dañinos para la salud, como lo es el metil-terbutil-eter (MTBE). Es importante señalar que los ingenieros químicos mexicanos en los años ochenta, con la colaboración del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), tuvieron una gran participación dentro del desarrollo del MTBE. Hoy las gasolinas mexicanas no contienen plomo, y por lo que hace a las áreas metropolitanas de la ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Puebla, León y Tijuana, es un contaminante menor y cada vez más controlado (La Jornada 2005, Fortoul et al., 2004).

El contenido de este metal en casi todos los sistemas acuáticos en los que se ha medido varía entre 1 y 10 $\mu g/L$, cantidad inferior al límite establecido por la WHO (la cual es de 100 $\mu g/L$); sin embargo, en las zonas de agua poco dura (con baja concentración en carbonatos) con pH ligeramente ácido, este puede llegar a disolverse de las tuberías. En estas circunstancias, su contenido en el agua puede llegar hasta 3000 $\mu g/L$, lo cual causa intoxicación. La EPA ha establecido que los niveles de plomo en agua potable no deben pasar de 15 $\mu g/L$.

En el ser humano, la intoxicación depende del tipo de compuesto de plomo que se ingiere. La crónica conduce a una enfermedad conocida como saturnismo, y se presenta generalmente por la absorción de carbonatos y otros compuestos solubles en el agua a través del tracto digestivo. La intoxicación aguda es menos frecuente y suele ser el resultado de la inhalación de partículas de óxido de plomo. La infección por plomo orgánico generalmente se debe a la inhalación del tetraetilo de plomo (antidetonante en las gasolinas mexicanas en los años ochenta, como se explicó anteriormente), el cual es altamente volátil y liposoluble.

El síntoma más común de envenenamiento agudo es el dolor tipo cólico gastrointestinal, aunque este metal tiene efecto también en la sangre (anemia), en el sistema nervioso central (dolor de cabeza, temblor muscular, ataxia y pérdida de memoria), y en el sistema nervioso periférico (insensibilidad al dolor y debilidad muscular).

- Cromo.

El cromo fue descubierto en 1797 por el francés Louis Nicolas Vauquelin (1763-1829) cuando estudiaba un mineral naranja rojizo (crocoita, $PbCrO_4$) encontrado en Siberia por Johann Gottlob Lehmann. Vauquelin lo llamó cromo (del griego *chroma*, color) por los variados colores de sus compuestos.

El cromo no se encuentra en estado libre en la naturaleza, aunque sus compuestos están muy diseminados. Figura en el puesto 21 por su abundancia en la corteza terrestre. Algunos minerales y piedras preciosas deben su color a este metal, como los rubíes y las esmeraldas. Su fuente mineral más importante es la cromita (FeO, Cr_2O_3).

Los compuestos de cromo participan en funciones conocidas en los procesos vitales de algunos organismos, como por ejemplo en el metabolismo de lípidos y de hidratos de carbón. Se les ha encontrado inclusive en cenizas de animales y vegetales. No obstante, también se sabe que estos compuestos tienen efectos nocivos en los seres humanos cuando son expuestos a compuestos de cromo hexavalente (Costa, 2003) en cantidades superiores a las naturales

(hasta 50 µg/L en agua de zonas estearinas, ver Tabla 1). En la historia se reconocen dos eventos de contaminación por cromo, uno en los alrededores de Tokio y otro en la prefectura de Chiba, Japón, en 1960. También en la zona de Lechería en México se presentó un problema por contaminación por cromo en 1976.

En las civilizaciones modernas, el cromo y sus compuestos son muy importantes para diversos usos, como por ejemplo la fabricación de colorantes, pigmentos, plaguicidas, en la galvanoplastia y como mordientes en teñidos de tela. Es primordial considerar su toxicidad en el medio laboral y en el ambiente en general, pues los polvos y los desechos se esparcen en todo el mundo y ocasionan distintos daños a la salud.

Cuando los compuestos de cromo ingresan al organismo humano por exposición temporal, los daños son gastrointestinales, insuficiencia renal, lesiones nasales, cutáneas y hepáticas. Sus sales son reconocidos cancerígenos de pulmón, cavidad nasal y seno paranasal.

La EPA ha establecido un límite de 100 µg de cromo (III) y cromo (VI) por litro de agua potable. La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA, *Occupational Safety and Health Administration* en inglés) ha establecido límites de 500 µg de compuestos de cromo (III) solubles por metro cúbico de aire (500 µg/m³) en el área de trabajo, 1000 µg/m³ de cromo metálico, y 52 µg/m³ de compuestos de cromo (VI) durante jornadas de 8 horas diarias, 40 horas a la semana.

- Cobre.

El cobre era conocido en la prehistoria y fue probablemente el primer metal utilizado para fabricar útiles y objetos decorativos. Los objetos de cobre se han encontrado entre los restos de muchas civilizaciones antiguas, incluyendo las de Egipto, Asia Menor, China, sudeste de Europa, Creta y Chipre. Se cree que su nombre actual deriva del hecho de que los romanos obtuviesen prácticamente todo su cobre de los yacimientos de esta última isla del Mediterráneo.

Los nativos americanos también utilizaban el cobre desde el tercer milenio antes de nuestra Era. El análisis de los objetos de cobre y sus aleaciones, y el estudio de los minerales existentes en las regiones donde fueron encontrados inducen a pensar que ya en el año 6000 antes de nuestra Era el hombre desarrollaba procesos metalúrgicos.

El cobre es un metal rojizo que se encuentra naturalmente en las rocas, el agua, los sedimentos y, en niveles bajos, en el aire. Su concentración promedio en la corteza terrestre es de aproximadamente 50 ppm o, expresado de otra manera, 50 gramos de cobre por 1×10^6 gramos de suelo, ocupando así el lugar 25 en abundancia en la corteza terrestre.

Este metal es minado y procesado extensamente en los Estados Unidos. Sus usos principales son en aleaciones, en cañerías, en láminas de metal y en la manufactura de alambre debido a su propiedad conductora de electricidad y de calor. Sus compuestos se usan comúnmente en agricultura para tratar enfermedades de las plantas, por ejemplo hongos, o para el tratamiento de aguas y como preservativo para la madera, el cuero y las telas.

El cobre puede entrar en contacto con los seres humanos en las minas y en las fábricas que manufacturan o usan cobre metálico o sus compuestos. También puede entrar al ambiente a través de aguas residuales domésticas, o como producto de la combustión de combustibles fósiles y desechos, y la producción de madera y de abonos de fosfato. Como fuentes naturales está el polvo del suelo esparcido por el viento, los volcanes, la vegetación en descomposición, los incendios forestales y el rocío de agua de mar. La inhalación de cobre en niveles altos (superior a $1\text{mg}/\text{m}^3$) puede producir irritación de la nariz y la garganta, en tanto que su ingestión en niveles altos puede producir náusea, vómitos y diarrea. Cantidades muy elevadas de cobre pueden dañar el hígado y los riñones y pueden causar la muerte.

Por ello, la EPA ha determinado que el agua potable no debe contener más de $1300 \mu\text{g}/\text{L}$ (Tabla 2), mientras que el Consejo para Alimentos y Nutrición del Instituto de Medicina (CANIM) recomienda cantidades diarias (RDAs, *Dietary Reference Intakes* en inglés) de 340 microgramos ($340 \mu\text{g}$) de cobre para niños

de 1-3 años, 440 µg/día para niños de 4-8 años, 700 µg/día para niños de 9-13 años, 890 µg/día para niños de 14-18 años y 900 µg/día para adultos.

- Zinc.

El químico alemán Andreas Marggraf en 1746, con su exhaustivo y metódico trabajo "*Sobre el método de extracción del zinc de su mineral verdadero, la calamina*", cimentó la metalurgia del zinc y su reputación como descubridor del metal, aunque este se conocía desde la antigüedad; los romanos ya mezclaban la calamina (silicato hidratado de zinc) con cobre para formar latón.

El zinc se encuentra en el aire, el suelo y el agua, y está presente en todos los alimentos. Posee el lugar 24 en orden de abundancia entre los elementos de la corteza terrestre. En su forma pura elemental, es un metal brillante de color blanco-azulado. El zinc metálico tiene muchos usos en la industria, como el de revestir hierro y otros metales con el objeto de prevenir el enmohecimiento y la corrosión. También se mezcla con otros metales para formar aleaciones como el latón y el bronce. Las aleaciones de zinc y cobre se usan para fabricar las monedas de un centavo en los Estados Unidos, así como para fabricar compartimientos de baterías secas.

El zinc entra al aire, al agua y al suelo como resultado de procesos naturales y de actividades humanas. La mayor parte es el resultado de la minería, la refinación de minerales de zinc, plomo y cadmio, la producción de acero, y la incineración de carbón y de desperdicios. Los desagües de industrias químicas que manufacturan productos de zinc y otros metales lo pueden descargar a las corrientes de agua. Su nivel en el suelo aumenta principalmente a causa de la disposición de los residuos de industrias que manufacturan metales, y de cenizas de carbón generadas por plantas de electricidad. En el aire está presente principalmente en forma de partículas finas de polvo. La mayor parte del zinc en lagos y ríos se deposita en el fondo; sin embargo, una pequeña cantidad puede permanecer disuelta en el agua o suspendida en forma de partículas finas.

La ingestión en demasía (muy superior a 11mg diarios) de este metal a través de los alimentos, el agua o los suplementos alimenticios también puede afectar la salud. Aún durante un período breve, puede producir calambres, náusea y vómitos, y durante varios meses puede producir anemia, daño del páncreas y disminución del tipo de colesterol beneficioso en la sangre.

El consumo de muy poco zinc (muy inferior a 11mg diarios) es un problema para la salud tan importante como su consumo en exceso (Tabla 3). Es necesario en la dieta ya que su deficiencia provoca en el ser humano pérdida del apetito, disminución del sentido del gusto y del olfato y de la función del sistema inmunológico, cicatrización lenta de las heridas y llagas en la piel. Muy poco zinc en la dieta también puede producir órganos sexuales mal desarrollados y retardo del crecimiento en hombres jóvenes.

La Academia Nacional de Ciencias en Estados Unidos (NAS, *National Academy of Sciences* en inglés) recomienda una ingesta diaria (RDA) de 11 mg o lo que es lo mismo, 0.16 mg/kg de peso para un hombre adulto promedio (70 kg). Dosis de 0.13 mg/kg se recomiendan para una mujer adulta promedio (60 kg) debido a que generalmente las mujeres pesan menos que los hombres.

- Níquel.

El uso del níquel se remonta aproximadamente al siglo IV antes de nuestra Era, generalmente junto con el cobre, ya que aparece con frecuencia en los minerales de este metal. Su nombre proviene del alemán *Kupfernickel*, que significa “diablo del cobre”, ya que en el siglo XVIII, mineros de la región alemana de Hartz le atribuían al níquel el que algunos minerales de cobre no pudieran ser trabajados. Fue entonces en 1751 cuando el químico sueco Axel Frederic Cronstedt lo aisló como metal, separándolo del cobre en la niquelina.

El níquel puro es un metal duro, blanco-plateado, que tiene propiedades que lo hacen muy fácilmente combinable con otros metales para formar aleaciones. Algunos de los metales con los cuales se combina son el hierro, el cobre, el cromo y el zinc. Estas combinaciones se emplean para fabricar monedas, joyas y colorear cerámica, y en la industria, para fabricar artículos como válvulas,

intercambiadores de calor, catalizadores y baterías, aunque la mayor parte de este metal se usa para fabricar acero inoxidable. Se combina también con muchos otros elementos como el cloro, el azufre y el oxígeno para formar compuestos mucho más solubles en agua y que tienen un color verde característico.

El níquel se encuentra en todos los suelos. En el fondo del océano forma masas de minerales llamadas “nódulos” del fondo del mar, ocupando así el lugar número 22 en la lista de elementos más abundantes de la corteza terrestre. De hecho, el centro de la Tierra contiene 6% de níquel.

Este metal se libera a la atmósfera cuando se mina y por industrias que lo fabrican o lo usan, como son las plantas de energía que queman petróleo o carbón, o por incineradores de basura, y desgraciadamente, puede ser desechado en aguas residuales.

El efecto más común de la exposición al níquel en seres humanos es una reacción alérgica. Aproximadamente entre el 10 y el 15% de la población es sensible a este elemento. Una persona puede sensibilizarse al níquel cuando joyas y otras cosas que contienen níquel están en contacto directo con la piel. Una vez que un individuo ha sido sensibilizado al metal, el contacto adicional con él producirá una reacción (salpullido en la piel en el área de contacto). Cuando se ingiere en solución acuosa produce lo que sufrieron algunos trabajadores que tomaron accidentalmente agua de una fuente que contenía 250 µg/L (más alto que el límite establecido, ver Tabla 2) de níquel. Ellos sufrieron dolores de estómago y alteraciones en la sangre (aumento de glóbulos rojos) y los riñones (aumento de proteínas en la orina).

Las secuelas más graves por exposición al níquel, como por ejemplo bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y cáncer de los pulmones y de los senos nasales, han ocurrido en personas que han respirado polvo en refinerías o en plantas de procesamiento de níquel, en donde los niveles del metal eran mucho más altos que los niveles ambientales normales (10 mg/m³).

El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS, *Department of Health and Human Services*, en inglés) de los EE.UU. y la EPA han determinado que

es razonable predecir que el níquel metálico es carcinogénico, así como sus compuestos y sus polvos.

- Manganeso.

Los compuestos de manganeso se conocían antiguamente; los egipcios y los romanos los empleaban ya sea en la coloración o en la decoloración del vidrio. Asimismo, se ha encontrado manganeso en las menas de hierro utilizadas por los espartanos, y se piensa que tal vez sea debido a esto la especial dureza de sus aceros. En 1774 el sueco Johan Gottlieb Gahn (1745-1818) lo aisló por primera vez como metal aunque había sido identificado como elemento unos meses antes por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele.

El manganeso es un metal abundante (lugar número 12 en la naturaleza) que se encuentra combinado frecuentemente con el acero. Sus fuentes naturales son los suelos, los sedimentos, y las rocas sedimentarias. El mineral más importante es la pyrolusita (MnO_2), y es debido a las propiedades magnéticas de éste último que el manganeso obtiene su nombre (del latín *magnes* (magnético)).

El manganeso y sus compuestos se utilizan para la fabricación de aleaciones de metales, para secar baterías, y en la industria química para hacer pinturas, barnices, tintas, cerámicas y fertilizantes. La industria del acero contribuye en gran medida a las cantidades de manganeso en el ambiente.

Este es un elemento esencial para los micro organismos, las plantas y los animales, y por lo tanto, se encuentra presente en casi la totalidad de los organismos. La cantidad promedio en el cuerpo de un adulto es de 12 mg. La deficiencia así como el consumo excesivo de manganeso puede acarrear problemas en la salud humana (Tabla 3); un consumo promedio en el adulto varía entre 2 y 10 mg por día. El agua potable contiene casi siempre menos manganeso que la cantidad límite recomendada por la EPA (50 $\mu g/L$, ver Tabla 2) y contribuye a la dieta con aproximadamente 0.07mg del metal por día. El manganeso no es considerado como agente cancerígeno.

- Vanadio y Níquel.

El descubrimiento del vanadio se atribuye al químico sueco Nils Gabriel Sefström (1787-1845) quien, en 1830, le dio el nombre de la diosa de la belleza en la mitología escandinava, *Vanadis*. Sin embargo, el mineralogista español Andrés Manuel del Río (1764-1849) lo descubrió primero en 1801 en la ciudad de México, cuando estudiaba el “plomo pardo” de Zimapán llamándole primero pancromo y más tarde eritronio, confundiéndolo de esta manera con un tipo de cromo.

La relación entre la concentración de vanadio y de níquel puede representar problemas de contaminación debido al petróleo. Cuando el cociente entre las concentraciones del vanadio y el níquel (V/Ni) se encuentra entre 3.25 y 6.78 se indica presencia de petróleo en la zona. Esta relación es muy importante porque el petróleo es una fuente de contaminación de las más frecuentes y que provoca severos daños a los ecosistemas marinos. Alrededor de 3 millones de toneladas de petróleo son vertidas al mar cada año (Villanueva y Botello, 1992).

Una vez establecidas las características de los metales en estudio, sus concentraciones permitidas y los efectos que producen las altas concentraciones en los seres humanos y en los sistemas acuáticos, queda clara la importancia de determinar la presencia de metales pesados en distintos ecosistemas. Una forma de medir estos metales es a través de bioindicadores (organismos que acumulan metales pesados). En este caso, se recolectó y analizó la cantidad de metales en un pasto marino llamado *Thalassia testudinum*, del cual se habla con más detalle a continuación.

LA THALASSIA TESTUDINUM Y LOS METALES PESADOS.

La medición de contaminantes por métodos fisicoquímicos es importante debido a que se pueden cuantificar, aunque no permite obtener conclusiones visibles (cualitativas) sobre los efectos que tienen en los seres vivos. Para obtener estos resultados, se utilizan los llamados bioindicadores, que complementan a los métodos fisicoquímicos ya que aportan información sobre las consecuencias de la contaminación sobre los organismos.

Desde hace mucho tiempo, los animales y las plantas se han utilizado como indicadores para prevenir los efectos no deseados sobre el ambiente y los seres vivos. Por ejemplo, los mineros llevaban canarios a las minas y si éstos perdían el sentido, los alertaba de la presencia de gases inodoros y mortales. Hace un centenar de años, la desaparición de los líquenes de los árboles en los pueblos y ciudades se consideró un signo de mala calidad del aire. En los últimos treinta años, se ha perfeccionado el uso de organismos vivos (a los que llamamos bioindicadores) para conocer la calidad del ambiente y proteger a los seres humanos, los animales y las plantas.

Además de los bioindicadores existen los bioacumuladores. Tienen la misma función que un bioindicador, con la diferencia de que no hay efectos visibles tras una exposición a la contaminación, es decir, lo único que hace es acumular el contaminante sin cambiar su aspecto físico, a diferencia del bioindicador que se ve afectado por el contaminante, como ocurrió con los canarios que se morían en presencia de gases tóxicos.

Se utilizó en este trabajo un pasto marino llamado *Thalassia testudinum* como bioacumulador, debido a que cumple con todos los requisitos para serlo: es de tamaño razonable para un fácil manejo, es sedentario (o sea que acumula la contaminación que hay en una zona determinada), es fácilmente colectable ya que se encuentra a poca profundidad y sus sedimentos son blandos, y es abundante en el área de estudio (Brix y Lyngby, 1983).

La *Thalassia testudinum* es una de las principales especies que hay en estuarios y arrecifes. Se encuentra distribuida desde la Florida hasta el Golfo de México, el Caribe, las Bermudas, Centro América y Venezuela (Eiseman, 1980). De hecho,

hacia el lado occidental de la isla de Cuba es por mucho la especie de pasto marino más abundante, formando aproximadamente el 97% de los pastos presentes en la región. Su distribución a estos territorios se encuentra limitada por varios factores, como la temperatura (aproximadamente 30°C), la salinidad (25 a 40%), la profundidad (1 a 5 metros bajo el nivel del mar), la turbidez y el movimiento de las olas. Una combinación de turbidez alta con baja salinidad del agua disminuye el crecimiento de las camas de *T. testudinum*. De igual manera, agua demasiado salada y profunda, como lo es la del Pacífico, impide el crecimiento de este pasto marino. En cambio, un agua poco salada y no muy profunda, como lo es la del Caribe, favorece el crecimiento del pasto (de allí que la *Thalassia testudinum* se encuentre en abundancia en esta zona).

Las comunidades de estos pastos son sumamente importantes, ya que en esos sitios se captura material orgánico e inorgánico, por lo que son un buen lugar para la crianza de diversas poblaciones de peces e invertebrados. Por sus hojas anchas, también alberga epífitas. Además, la *Thalassia testudinum* es una fuente de alimento directa para una gran variedad de especies de invertebrados macrobentónicos (Noriega, 2001).

Anatómicamente (Figuras 2 y 3), este pasto marino tiene rizomas y tallos horizontales, que suelen estar en el sedimento, y hojas que se desarrollan a partir del rizoma. Su tejido consta de espacios con aire que ayudan a la flotación de las hojas y permiten el intercambio gaseoso en toda la planta. Ésta es dioica (unisexual, se reproduce por si misma) y la floración es común durante todo el año pero no en todas las plantas, produciendo frutos con 4 ó 5 semillas.

FIGURA 2

Recolección de *Thalassia testudinum*

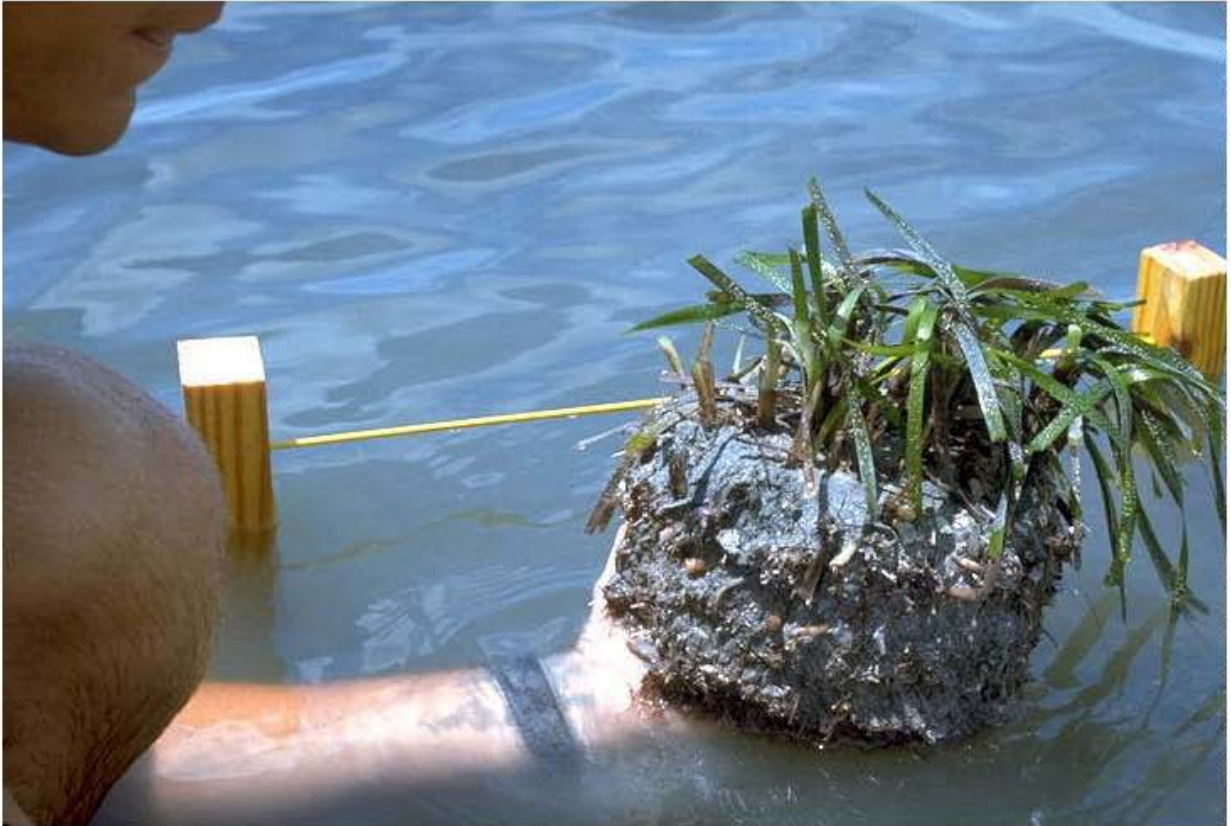
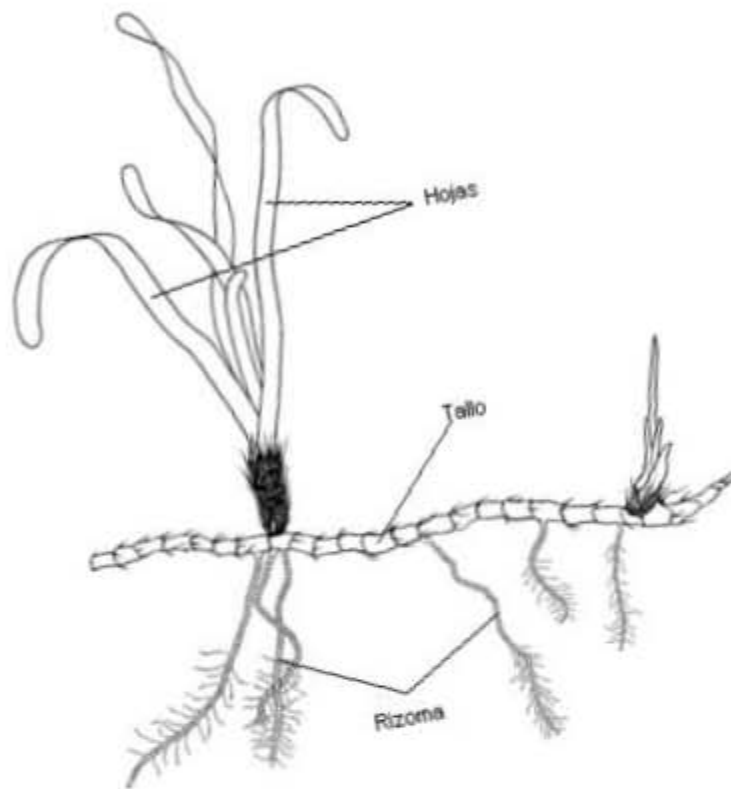


FIGURA 3

Distintas partes anatómicas de la *Thalassia testudinum*



Se han hecho algunos análisis de metales pesados sobre este tipo de pasto marino, como se muestra en la Tabla 4. Lo reportado por otros autores muestra que la *Thalassia testudinum* puede utilizarse como bioindicador y bioacumulador de metales pesados. Los datos de la tabla siguiente pueden utilizarse para compararlos con nuestros resultados, y alcanzar así conclusiones sobre la posible contaminación de nuestro lugar de estudio. Cabe mencionar que la comparación directa se podrá hacer sólo con los otros datos reportados para *Thalassia testudinum*, pero los resultados para otros pastos sirven como marco de referencia.

TABLA 4

Concentración en ppm de metales pesados en diversos pastos marinos encontrados por diferentes autores.

Sitio	Especie	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Referencia
Golfo de México	<i>Tres especies</i>	H			4.9	22			Pulish, 1976, 1980
		R			4.3	29			
Estados unidos	<i>Thalassia testudinum</i>	H	8.0	4.5	25	7.0		6.0	Montgomery y Price, 1979
Dinamarca	<i>Zostera marina</i>	H			4.8	78		1.1	Brix et al. 1983
		R			3.3	55		1	
	<i>Nueve especies</i>	H			3.9 - 7	15 - 14		1.7 - 2.8	
		R			2.6 - 6.8	6.0 - 27.0		1.1 - 6.1	
Indonesia	<i>Thalassia hemprichii</i>	H			7	23		2.8	Nienhuis, 1986
		R			2.9	14		3	
Golfo de México	<i>Thalassia testudinum</i>	H		11	13	18			Botello 1993, no publicado
		R		8	20	21			
Turquía	<i>Zostera marina</i>		13.6					32.1	Guven et al. 1993
Australia	<i>Zostera capricorni</i>	H			11.5				Prange y Dennison, 2000
		R			2.1	24.2			
Estados unidos	<i>Thalassia testudinum</i>	H					1.84		Fourqurean y Cal, 2001
Sistema arrecifal Veracruzano	<i>Thalassia testudinum</i>	H		7.7	2.8	41.6		8.7	Noriega, 2001
		R		2.2	1.4	32.8		7.5	
Golfo de México	<i>Thalassia testudinum</i>	H	95-256		12.1-7.1	24.6	1.08- .97	0.81-1.21	Whelan III et al., 2005
		R	21.0-45		7.96-4.9	24.1-23.4	1.47-1.21	0.75-1.2	

De estos diez autores, dos concluyeron que había contaminación en su zona de estudio; el primero de ellos es Brix en 1983. Midió concentraciones en la *Zostera marina*, en un sitio de Dinamarca llamado Limfjord. Sus resultados deben de ser tomados con precaución, ya que el lugar en donde realizó su estudio tiene una conexión con el Mar del Norte, del cual pueden provenir desechos de áreas industriales (según Salomons y Forstner, 1984). La concentración encontrada de zinc es la mayor en la tabla. Para este tipo de pasto marino, el plomo y el zinc se acumulan más en hojas que en raíces y rizomas, mientras que el cobre no se acumula en ninguna parte del pasto, por lo cual cuando se encuentra una gran cantidad de cobre en la *Zostera marina* se piensa que hubo un evento reciente que aumentó su concentración.

Un segundo autor que encontró notable contaminación en metales pesados fue Noriega, en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) y utilizando la *Thalassia testudinum* como bioacumulador. Las actividades humanas e industriales en la zona costera de Veracruz incrementaron significativamente los niveles de metales pesados en el SAV. Consecuentemente, las concentraciones de plomo y zinc resultan ser de las más altas reportadas.

Es de notarse también que las concentraciones más altas de cobre y de níquel son reportadas por Botello en el Golfo de México. Guven cita en Turquía la concentración más alta para el cromo y el plomo. En cambio, los datos reportados por los autores para el arsénico no tienen diferencia significativa entre si.

Los pastos marinos tienen cierto nivel de metales pesados natural, como lo determinó Nienhuis en 1986 para el cobre, el zinc y el plomo en pastos marinos de Indonesia, en particular la *Thalassia hemprichii*. Sus datos son de los más bajos reportados, y sus conclusiones afirman que no había contaminación en su zona de estudio. Estos valores se consideraran como los valores de referencia en este estudio. Los valores reportados por Pulish en 1976 y 1980 en el Golfo de México para tres especies de pastos parecen ser un buen referente también en cuanto a niveles base de cobre y zinc, ya que los valores encontrados en ese lugar son siempre de los más bajos.

Es importante señalar que cada pasto marino tiende a acumular más algunos metales que otros, y a tomarlos a través de distintas partes de su organismo. En nuestro caso, y como ya se ha mencionado varias veces, se utilizó *Thalassia testudinum* como bioacumulador de metales pesados. De lo reportado podemos decir que la *Thalassia testudinum* es muy activa para tomar el cobre, el manganeso y el zinc por las hojas de acuerdo con Whelan III (2005). El plomo se absorbe tanto en hojas como en raíces (Shroeder y Thorhaug, 1980). El zinc no se traspa de las hojas hacia las raíces. Lo que se encuentre de este elemento en las raíces del pasto proviene de los sedimentos. Whelan III en 2005 y Shroeder y Thorhaug en 1980 demostraron que lo que se encuentre de manganeso en las hojas de este tipo de pasto procede del agua directamente.

Uno de los investigadores, presentado dentro de la Tabla 4, y que utilizó la *T.testudinum* como bioacumulador para su estudio, fue Whelan III en el 2005. Aparte de concluir que su zona de estudio no resultó estar contaminada (la Laguna Madre en Texas), reportó que la *Thalassia testudinum* absorbe cierto tipo de metales pesados, según la época del año en la que se encuentra. Whelan III concluyó que los pastos marinos absorbían más unos metales que otros según condiciones de temperatura, tipo y tiempo de exposición de luz. Estos resultados se presentan a continuación en la Tabla 5, y fueron corroborados anteriormente por Shroeder y Thorhaug en 1980.

TABLA 5

Unidades de variación estacionaria en las hojas y raíces de la *Thalassia testudinum* en la Laguna Madre (Whelan III *et al.*, 2005) (unidades en ppm)

	VERANO		INVIERNO		
Elemento	Hojas				Porcentaje de cambio
	Promedio	Desv. Est	Promedio	Desv. Est	
Cu	12.1	3.1	7.1	0.5	-41
Zn	24.1	5.7	24.6	5.7	2
Mn	256	96	95	69	-63
Fe	287	77	169	49	-42
As	1.04	0.2	1.97	0.3	89
Pb	0.81	0.1	1.29	0.4	59
Elemento	Raíces				Porcentaje de cambio
	Promedio	Desv. Est	Promedio	Desv. Est	
Cu	7.96	3.8	4.9	0.3	-38
Zn	25.4	4.3	23.4	5.3	-8
Mn	45	17	21	16	-53
Fe	418	84	113	38	-73
As	1.47	0.7	1.21	0.9	-18
Pb	0.75	0	1.2	0.7	60

En este trabajo midieron la concentración de cuatro metales esenciales, el cobre, el zinc, el manganeso y el hierro, y dos elementos tóxicos, el arsénico y el plomo. Las mediciones las hicieron en invierno (16.6° C) y en verano (28.7° C). A partir de estos datos, calcularon el porcentaje de cambio que había entre los niveles de cada metal en raíces y en hojas, en las dos épocas del año, restando el valor del verano al del invierno, dividiendo esto por el del verano y multiplicándolo todo por 100 (ver fórmula a continuación). Entonces, un valor de porcentaje negativo indica una mayor concentración en verano que en invierno para cada metal.

$$\% \text{ de cambio} = \frac{[\text{invierno}] - [\text{verano}]}{[\text{verano}]} \times 100$$

Como se puede observar en la Tabla 5, los metales esenciales suelen ser absorbidos en mayor medida en el verano que en el invierno, ya que el único valor positivo en porcentaje de cambio (y casi nulo) de este tipo de elemento fue el del zinc en hojas. En cambio sucede lo opuesto para metales tóxicos, cuyos valores en este rubro son casi todos positivos, menos el del arsénico en raíces, el cual por cierto, tiene algunas propiedades que ayudan al metabolismo del cuerpo y no forma un ácido de Lewis blando, como ya se mencionó antes, aunque sigue siendo un metaloide tóxico.

Esto quiere decir que los pastos marinos absorben pasivamente los elementos tóxicos y absorben más rápido en época de crecimiento los esenciales. Este comportamiento entre los dos tipos de metales se explica a través de la dilución por crecimiento que hay hacia los tóxicos durante el verano; en esta época del año, los pastos aprovechan que la temperatura es alta y que hay abundante luz para su fotosíntesis, por lo cual son más activos en absorber elementos esenciales para su crecimiento. Al crecer más, diluyen la concentración de los elementos tóxicos. En invierno, éstos incrementan su nivel en comparación al del verano porque la *T. testudinum* ya no crece tanto y ya no toma tantos metales esenciales, debido a que las condiciones ya no son las propicias para la fotosíntesis (Schlacher-Hoenlinger y Schlacher, 1998; Pulich et al., 1976; y Campanella et al. en 2001). En estas condiciones no se presenta la dilución por crecimiento de los metales tóxicos.

Es importante señalar que según Whelan III, la dilución por crecimiento en la *Thalassia testudinum* se aplica tanto en las hojas como en las raíces. En resumen, los metales esenciales presentaron mayores concentraciones cuando el pasto se encuentra en una etapa de crecimiento, mientras que los tóxicos estarán en concentración menor debido a la dilución por crecimiento.

En este estudio, serán tomados como elementos esenciales el cobre, el zinc y el manganeso, y como elementos tóxicos el cromo, el arsénico y el plomo.

ZONA DE ESTUDIO: ISLA HOLBOX Y LAGUNA YALAHAU.

Se seleccionó la laguna de Yalahau como la zona de estudio debido a que el bioacumulador que se utilizó en este trabajo, la *Thalassia testudinum*, se encuentra presente en abundancia. La zona tiene una gran importancia ecológica, por lo que el estudio de la presencia de contaminantes es fundamental.

Ésta laguna está limitada al norte por la isla Holbox y al sur por la comunidad de Chiquilá, en el estado de Quintana Roo. Se ubica en coordenadas geográficas en el paralelo 21°13' latitud norte y el meridiano 87°10' longitud oeste, al noroeste de la península de Yucatán (Figura 4). Esta Laguna esta parcialmente aislada del océano por un gran banco de arena, que forma la isla de Holbox. El turismo en este pueblo de 1200 habitantes (INEGI, 2000) se ha incrementado en los últimos años; sin embargo, la infraestructura de la isla no se ha desarrollado de la misma manera; consecuentemente, las hermosas aguas transparentes que la rodean, donde abundan los delfines y los tiburones ballena, grandes extensiones de humedales y selvas tropicales ricas en flora y fauna, está empezando a sufrir cierto deterioro.

La zona se encuentra dentro del área de protección de Flora y Fauna Yum Balam ("señor jaguar" en maya), la cual fue establecida en 1994. El área ocupa 154 000 hectáreas, de las cuales 60,000 son selva en donde viven cinco especies de felinos silvestres tropicales de México: el jaguar, el puma, el ocelote, el margay (pequeño tigrillo) y el yaguarundi o gato de selva, todos en peligro de extinción. Algunas veces, en la reserva, se ha roto la armonía del hábitat debido a la carencia de alimento. Es por eso que la gente de la reserva de Yum Balam inició un programa que invita a los pobladores a avisar a los técnicos de la reserva cuando detecten la presencia de un felino. Cuando es detectado lo capturan y lo llevan a otra área de la zona, contribuyendo así a la conservación de las especies y al desarrollo sustentable de las comunidades locales.

García (1988) describe el clima de la región como tipo Aw, el cual, según la clasificación climática de Koeppen, corresponde al de un clima de sabana tropical cálido, con lluvias en todas las épocas del año, pero con un máximo en verano (julio, agosto) y un mínimo en primavera (marzo, abril). Hay escasa oscilación de

temperatura, con un promedio anual de 26.3°C, y un mes más caliente (mayo). La temporada de huracanes comprende los meses de junio a noviembre, de los cuales agosto y septiembre son los meses de más alta incidencia.

Para este trabajo se realizarán dos muestreos: en julio y en octubre de 2004. Con esto se puede analizar el efecto de las estaciones en la concentración de los metales pesados.

FIGURA 4

Laguna Yalahau e isla Holbox



Parte de los resultados que se presentan en este estudio fueron reportados previamente por J. Valdespino (2005). En ese trabajo se relacionó la concentración de metales con la contaminación de la laguna en general y con el basurero de la comunidad de Holbox en especial. No se encontró contaminación por metales pesados ni por la extracción del crudo proveniente de Venezuela en la laguna Yalahau, pero Valdespino encontró que existe un foco de perturbación en el basurero de la comunidad de Holbox.

En este trabajo se analizará un metal adicional (Mn) y se relacionará la concentración de elementos tóxicos y esenciales con la etapa de crecimiento del pasto para analizar y corroborar la dilución por crecimiento. También, se le dará

otro enfoque a los datos de precipitación y escurrientías obtenidos en 2004 (los cuales son los mismos que los de Valdespino) según lo estudiado por Herrera en 2005, como se explica a continuación.

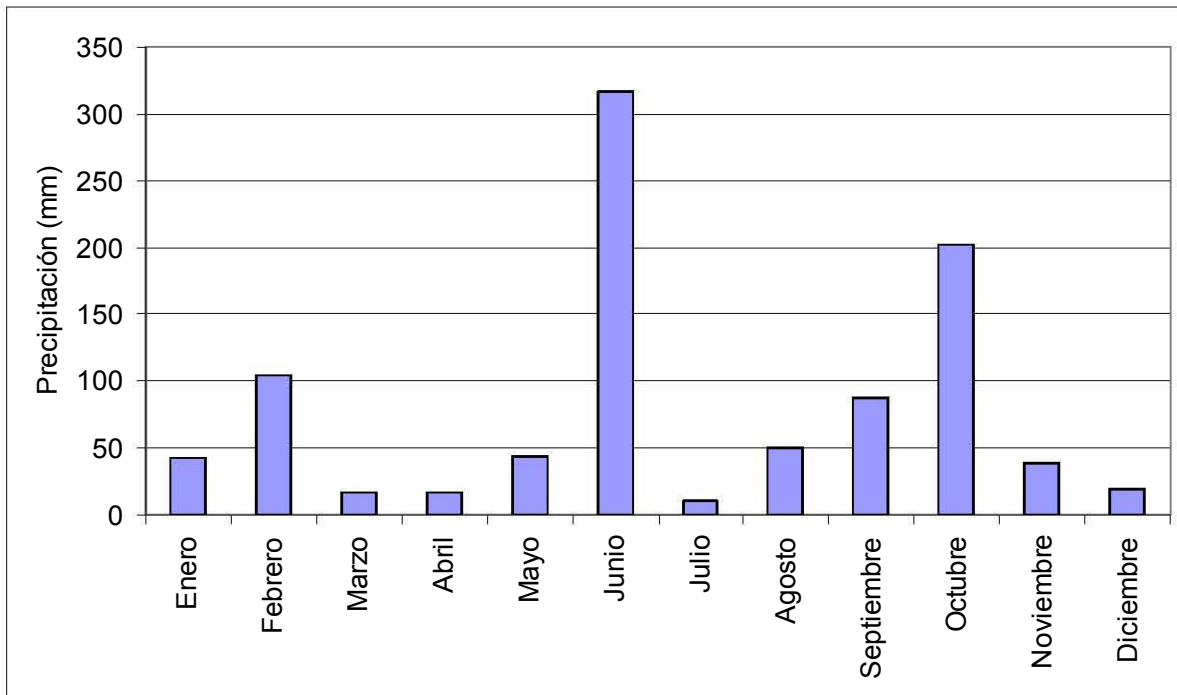
LLUVIAS Y CONCENTRACIÓN DE LOS METALES PESADOS.

La concentración de los metales en el agua (océanos, mares y lagunas) no es constante a lo largo del año. Esta varía según la cantidad y el tiempo de precipitación en un determinado lugar (que en este caso es la laguna de Yalahau). Con la finalidad de relacionar las precipitaciones con la concentración de metales en nuestra zona de estudio, contamos con los datos reportados por el servicio de hidrografía y meteorología de la unidad académica de Puerto Morelos (SAHMUAPM) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la UNAM. Estos datos indican que durante el mes de junio se reportó mucha precipitación (más de 300 mm, el mes con más precipitación en el año), mientras que en julio se reportó muy poca (10 mm, el mes con menos precipitación en el año). En el otro mes de muestreo, octubre, se reportó una precipitación media de 180 mm de agua (ver Figura 5).

Es importante decir que estos datos corresponden a las precipitaciones en Puerto Morelos, pero podemos suponer que este comportamiento fue el mismo en la isla de Holbox, ya que estas dos playas están muy cerca en el estado de Quintana Roo (ver Figura 4. Puerto Morelos esta un poco más al sur que Cancún). Entonces, se puede estimar que el muestreo de julio se identifica como un periodo de secas precedido por uno de fuertes lluvias (es importante recordar junio fue el mes con más precipitaciones en el 2004), mientras que el de octubre se identifica plenamente como uno de lluvias.

FIGURA 5

Precipitación acumulada en el año 2004 para Puerto Morelos



Habiendo ya dividido nuestros dos muestreos en época de secas (julio) y en época de lluvias (octubre), es esencial conocer la respuesta de los pastos marinos a las precipitaciones en la laguna para poder realizar un buen análisis de los datos.

Se sabe que el efecto de las lluvias sobre los pastos marinos no es inmediato, ya que se tiene que considerar el tiempo que tardan las hojas en crecer. Las hojas de la *Thalassia testudinum* crecen en 3 ó 4 meses, por lo que las hojas de julio representan lo que ocurrió tres meses antes, en abril o marzo. Lo mismo podemos decir de octubre que en realidad representa lo sucedido en mayo o junio. Así, para el pasto, el muestreo de julio representa su crecimiento en época de secas, mientras que el de octubre es considerado como época de lluvias. El muestreo y análisis de los pastos marinos se hizo en colaboración con el grupo del profesor Jorge Herrera, del CINVESTAV de Mérida. Con sus resultados se determinó que durante el mes de julio el pasto no se encontraba en la etapa de crecimiento, mientras que durante octubre se registró una etapa de crecimiento activo.

Con base en estos resultados se hizo la interpretación de los datos de concentración de metales pesados.

MATERIALES Y MÉTODO DE MUESTREO

En este trabajo se recolectaron muestras de *Thalassia testudinum* en 8 sitios distintos de la laguna Yalahau (Figura 6), colindante con la isla de Holbox y sus inmediaciones, al norte de Quintana Roo. Todos estos sitios fueron georeferenciados (Tabla 6) con la finalidad de muestrear en los mismos lugares en distintas épocas del año, que en nuestro caso fueron dos, una en julio y otra en octubre de 2004 como ya se mencionó.

FIGURA 6

Laguna Yalahau y la isla de Holbox con la costa de Quintana Roo. Se indican los 8 puntos de muestreo.

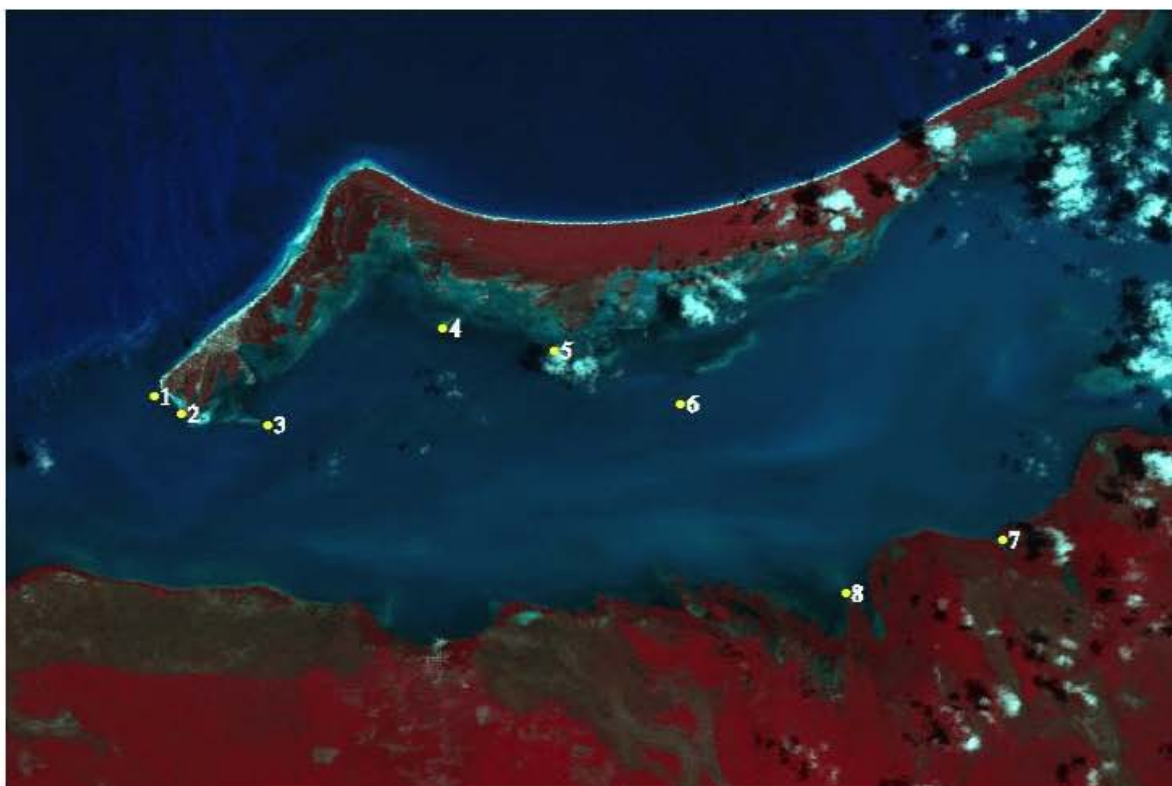


TABLA 6

Localización y nombre común de los sitios en donde se realizó el muestreo del pasto marino

Sitio	Coordenada geográfica	Nombre común
1	N 21° 30.999' W 087°23.880'	Isla pasión
2	N 21° 30.255' W 087°23.525'	Basurero
3	N 21° 29.890' W 087°22.208'	Boya Recalada
4	N 21° 31.044' W 087°19.248'	Isla Pajaros
5	N 21° 30.427' W 087°17.576'	Punta Catalán
6	N 21° 29.291' W 087°15.776'	Medio de la laguna
7	N 21° 26.351' W 087°11.174'	Yalikin
8	N 21° 25.847' W 087°13.742'	Río Bomba

Cabe mencionar que el punto 2 esta situado exactamente a la salida del basurero de la comunidad de Holbox, y que los puntos 7 y 8 están muy metidos en el manglar. Estos últimos puntos de muestreo se localizan en las inmediaciones de la salida de un río subterráneo. Los demás puntos están relativamente en medio de la laguna.

Se recolectaron manualmente una cantidad aproximada de 50 gramos de pastos marinos en cada uno de los ocho sitios (Figura 6). La mayoría de estos pastos se encontraban a profundidades bajas (0.5 metros), por lo cual se podía acceder a ellos simplemente caminando en la laguna. En un par de sitios en donde los pastos presentaban mayor profundidad (2 a 3 metros) fue necesario bucear.

En cada una de las plazas, se aseguró tomar plantas separadas por lo menos 10 metros las unas de las otras y se colocaron en una bolsa debidamente marcada con el sitio del cual provenían. Esto limita los cálculos de las medidas de dispersión, pero asegura la independencia y aleatoriedad de las muestras, con lo que podemos considerar que son representativas. Los pastos recolectados fueron separados en hojas y raíces con rizomas, después lavados con abundante agua del lugar (agua de mar) y puestos a bordo de la embarcación en bolsas de plástico

selladas y marcadas. Las epifitas calcáreas que estaban presentes sobre algunas de las hojas de los pastos fueron removidas rascándolas con las uñas y lavando las hojas nuevamente con abundante agua de mar. En todos los casos se evitó utilizar instrumentos metálicos, como navajas, para no influir en las mediciones posteriores.

Después de que las muestras fueron secadas bajo los rayos del sol, se trasladaron al laboratorio de la doctora Corina Solís en el Instituto de Física de la UNAM, en donde se les quitó el agua residual restante en una estufa a una temperatura constante de 60 – 80 °C durante 48 horas, hasta peso invariable. Se evitó recurrir a temperaturas más altas que las mencionadas para no eliminar algunos metales pesados durante el proceso de secado, como el cadmio o el mercurio. En este caso no fue necesario hacerle una digestión a las muestras, ya que se pueden detectar los metales pesados con la técnica propuesta sin necesidad de lo anterior. Las hojas y las raíces con rizomas secos fueron posteriormente triturados con una moladora de café y separados por su tamaño de molido mediante un tamizado, con el fin de obtener un tamaño de partícula homogéneo (esto es parte de la preparación para obtener una muestra “perfecta” para la medición en PIXE, ver anexo). Las muestras que resultaron tener menor tamaño de partícula fueron pesadas (aproximadamente 0.5 gramos) y hechas pastillas, sometiéndolas a una presión de 40 toneladas durante 2 minutos. Se elaboraron 3 replicas por muestra para su análisis con el método PIXE (*Photoelectron Induced X-ray Emission*).

El análisis se llevó a cabo con el acelerador PELETRON MEC 9SDH de 3 MV del Instituto de Física de la UNAM. Las muestras fueron bombardeadas al aire con protones de 3 MeV con una corriente de 50 nA durante 6 minutos. Se detectaron los Rayos X emitidos con un detector de germanio Canberra LEGe. Además, se colocó un filtro de aluminio de 38 µm de espesor frente al detector para disminuir los conteos en la parte de baja energía del espectro PIXE, ya que sólo se estaban midiendo metales pesados y traza (ver anexo). La calibración del sistema de detección se llevó a cabo utilizando pastillas de material certificado de sedimento lacustre Buffalo River NIST AIEA SL-7 y Peach Leaves NIST 1547a.

OBJETIVO GENERAL

Analizar los niveles de metales pesados medidos en el pasto marino *Thalassia testudinum*, y correlacionar estos valores con la etapa de crecimiento del pasto, todo con el fin de obtener una medida del grado de contaminación por metales pesados y sus posibles causas.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar la concentración de metales pesados en *Thalassia testudinum*, y correlacionar estos valores con la etapa de crecimiento del pasto.
- Determinar el patrón de comportamiento de los niveles de metales pesados a lo largo de la laguna, para localizar posibles fuentes de contaminación.
- Con base en la concentración de metales pesados que se encuentren a lo largo de los ocho puntos de muestreo, determinar la existencia de ríos subterráneos o basureros como posibles fuentes de contaminación.

HIPÓTESIS

La hipótesis principal es que se trata de un sitio con baja concentración de metales pesados, comparativamente con otros lugares, ya que esta laguna se encuentra dentro de un área natural protegida (Yum Balam). En la zona no se pueden efectuar actividades humanas que pudieran dañar al medio ambiente. Además, la isla de Holbox que se encuentra en la laguna es un poblado pequeño, que vive del ecoturismo y de la pesca, es decir, vive directamente del ecosistema, por lo que se podría pensar que se encuentra en buen estado; sin embargo, actividades como la

pesca podrían explicar un posible enriquecimiento de metales pesados en la zona, ya que se necesitan pilas para linternas y para sistemas geoposicionadores, los cuales son frecuentemente utilizados para saber en donde se encuentran los bancos de peces, y son tiradas al agua continuamente.

Otra posible causa en cuanto a altas concentraciones de metales pesados en la laguna es una mala disposición de la basura. Como ya se ha dicho, desgraciadamente no hay una buena infraestructura en la isla y la basura se encuentra tirada al aire libre en las calles, en las casas y en el basurero, el cual está al este de la isla, a las orillas de la laguna.

Además, la presencia de ríos subterráneos en la Península de Yucatán puede ser una fuente importante de contaminantes para la laguna.

Para utilizar los pastos marinos como bioindicadores es necesario conocer su comportamiento ante la presencia de metales pesados. De esta forma, las hipótesis por comprobar, relacionadas con la concentración de metales pesados y su correlación con el crecimiento del pasto, se pueden enunciar de la siguiente manera:

- Si los metales son esenciales para el crecimiento de los pastos, entonces presentarán absorción activa por parte de las hojas.
- Si la absorción es activa, entonces la concentración de metales esenciales en las hojas será mayor cuando el pasto esté en época de crecimiento.
- Si los metales son tóxicos para la planta, entonces presentarán absorción pasiva por parte de las hojas.
- Si la absorción es pasiva, se observará una dilución por crecimiento con la cual, la concentración de los metales tóxicos será menor durante la época de crecimiento del pasto.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

VALIDACIÓN DEL MÉTODO PIXE.

La técnica PIXE no está avalada como oficial en México, por lo cual es necesario que las mediciones de las concentraciones obtenidas por este medio sean confiables. Para esto se establecieron los porcentajes de recuperación de concentraciones de dos muestras estándar certificadas, mismas que se utilizan en la calibración del método: una de hojas de durazno (Tabla 7) y la otra de sedimento lacustre buffalo (Tabla 8).

TABLA 7

Porcentaje de recuperación en trazas de hojas de durazno NIST 1547a.

Num. atómico	Elemento	Concentración certificada (ppm)	Concentración PIXE (ppm)	% de recuperación
25	Mn	98 (4.9)	98 (19)	100
26	Fe	218 (10)	216 (19)	99.1
28	Ni	0.69 (0.03)	1.4 (0.26)	202.9
29	Cu	3.7 (0.19)	4 (1.7)	108.1
30	Zn	17.9 (0.9)	20.3 (0.6)	113.4
35	Br	11*	10.4 (1.6)	94.5
38	Sr	53 (2.65)	58.2 (9.6)	109.8

*: Valores no certificados

TABLA 8

Porcentaje de recuperación en trazas en sedimento lacustre Buffalo estándar AIEA SL-7.

Num. atómico	Elemento	Concentración certificada (ppm)	Concentración PIXE (ppm)	% de recuperación
23	V	95 (4)	107.73 (16.1595)	113.4
24	Cr	135 (5)	108.2 (16.23)	80.1
25	Mn	555 (19)	550.7 (82.6)	99.2
26	Fe	42100 (1000)	42881.6 (6432.24)	101.9
27	Co	14 (0.6)	18.3 (2.745)	130.7
28	Ni	44.1 (3)	42.8 (6.42)	97.0
29	Cu	98.6 (5)	104.4 (15.66)	105.9
30	Zn	438 (12)	445.2 (66.78)	101.6
	Ga	15*	17.9 (2.685)	119.3
33	As	23.4 (0.8)	24.8 (3.72)	106.0
35	Br	7*	10 (1.5)	148.8
37	Rb	100*	105.7 (15.855)	105.7
38	Sr	130*	140.6 (21.09)	108.2
82	Pb	161 (17)	171.9 (25.785)	106.8

*: Valores no certificados

De las Tablas 7 y 8 podemos decir que los porcentajes de recuperación del método PIXE son buenos, ya que se acercan casi todos al 100%. Los únicos resultados que se alejaron del 100% fueron para el porcentaje de recuperación del níquel (más de 200% en hojas de durazno), del cobalto (130% en sedimento buffalo) y del bromo (casi 150% en sedimento buffalo). Aparte de estos tres resultados, los demás están en un buen intervalo de coincidencia con los valores estándar, por lo cual se puede concluir que las mediciones por PIXE son confiables.

Además, esta técnica de medición ya ha sido comparada con otras consideradas oficiales en México, como por ejemplo con la técnica de absorción atómica en el trabajo de Valdespino en 2005. Aquí se reporta que los resultados de las dos técnicas son similares. Asimismo, el procedimiento PIXE ha sido ampliamente explicado y probado en el artículo de la doctora Corina Solís en la revista "*Nuclear instruments and methods physics research*" en 1999, y en la tesis de doctorado de Alibech Mireles en 2004.

Por lo tanto y con base en lo anterior, podemos considerar que los resultados de la concentración de los metales pesados en *Thalassia testudinum* obtenidos mediante la técnica PIXE son confiables.

COMPORTAMIENTO DE LA LAGUNA YALAHAU.

En las Tablas 9 y 10 se mencionan los resultados del análisis de metales pesados en *Thalassia testudinum* de las muestras recolectadas durante los muestreos de julio y octubre en la laguna de Yalahau, así como la temperatura en cada uno de los 8 sitios.

Como se puede observar a continuación en las Tablas, el único sitio cuya temperatura fue mayor en octubre que en julio fue el sitio 1, por lo cual, se considerará que el muestreo de julio es el más caliente de los dos. Por lo tanto, es en esa época que se produciría la ya mencionada dilución de los metales tóxicos en la *Thalassia testudinum*, de acuerdo con Whelan III. Si la temperatura fuera el factor determinante, julio sería entonces el mes de crecimiento de los pastos; sin embargo, es primordial recordar que Whelan III realizó su estudio en la Laguna Madre en Texas, lugar en donde hay una gran abundancia de nutrientes a lo largo del año y en donde la temperatura del agua varía hasta 10°C de una época a otra. En nuestro caso, la Laguna Yalahau se encuentra en la península de Yucatán, lugar en el cual hay escasos nutrientes a lo largo del año, debido a que es una zona calcárea. Además, la temperatura tiene una variación muy pequeña, de 2 ó 3 grados de una época a otra. El crecimiento de la *Thalassia testudinum* depende

entonces de la cantidad de elementos o nutrientes que llegan a la Laguna Yalahau a través de las precipitaciones y no de la temperatura. Por esta razón y de acuerdo con los resultados de Herrera, la época de crecimiento de los pastos es en octubre, ya que es en ese mes en donde captan la mayor cantidad de nutrientes debido a las lluvias del mes de junio (como se explicó anteriormente). Con base en esto, se espera tener una mayor concentración de metales esenciales (Mn, Cu y Zn) en octubre en las hojas de la *Thalassia testudinum*. Asimismo, en la Laguna Yalahau, el mes de crecimiento de la *T. testudinum* en donde se producirá la dilución por crecimiento de los elementos tóxicos es el mes de octubre.

TABLA 9

Resultados de metales pesados en *Thalassia testudinum* durante el mes de julio
(en ppm)

Hojas promedios											
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Promedio	Des. Est.
23	V	7.00	4.85	1.30	3.75	0.22	1.60	n.d	6.32	3.16	2.7
24	Cr	3.00	2.25	4.80	5.85	0.72	10.12	2.79	5.68	4.4	2.9
25	Mn	13.45	27.65	35.90	21.45	69.65	50.26	52.95	136.25	50.9	39.1
28	Ni	1.00	3.80	6.10	2.65	n.d	2.06	2.26	6.50	3.04	2.3
29	Cu	7.10	5.45	13.90	14.25	4.60	8.17	5.03	10.79	8.66	3.9
30	Zn	19.95	32.90	32.25	36.40	11.20	14.98	17.80	62.21	28.46	16.5
33	As	1.78	1.62	6.70	5.60	1.1	3.35	0.92	2.72	2.97	2.1
82	Pb	6.6	8.20	1.95	15.90	13.4	1.35	1.27	7.57	7.03	5.51
V/Ni		7.03	1.28	0.21	1.42	+	0.78	n.d	0.97	1.04	
Raíces promedios											
23	V	3.94	2.43	3.36	7.44	5.77	0.88	2.07	9.90	5	2.9
24	Cr	3.55	2.50	5.98	3.57	4.34	3.76	3.52	6.40	4.2	1.3
25	Mn	3.05	4.16	4.49	3.46	5.98	12.45	7.01	7.93	6.1	3.1
28	Ni	1.15	2.46	3.97	3.29	1.89	2.17	0.48	2.23	2.2	1.1
29	Cu	7.04	4.70	11.80	7.82	3.88	8.48	14.01	8.08	8.2	3.4
30	Zn	16.44	12.78	12.85	16.71	7.91	25.61	19.75	21.93	16.7	5.7
33	As	n.d	3.15	3.19	6.40	1.45	n.d	3.83	1.85	2.5	2.1
82	Pb	8.78	2.49	7.83	2.05	8.2	6.7	3.7	8.33	6.01	2.8
V/Ni		3.43	0.98	0.85	2.26	3.06	0.40	4.36	4.45	2.27	
Temperatura °C		26.34	30.65	30.32	33.04	33.24	31.21	32.56	32.47		

TABLA 10

Resultados de metales pesados en *Thalassia testudinum* durante el mes de octubre
(en ppm)

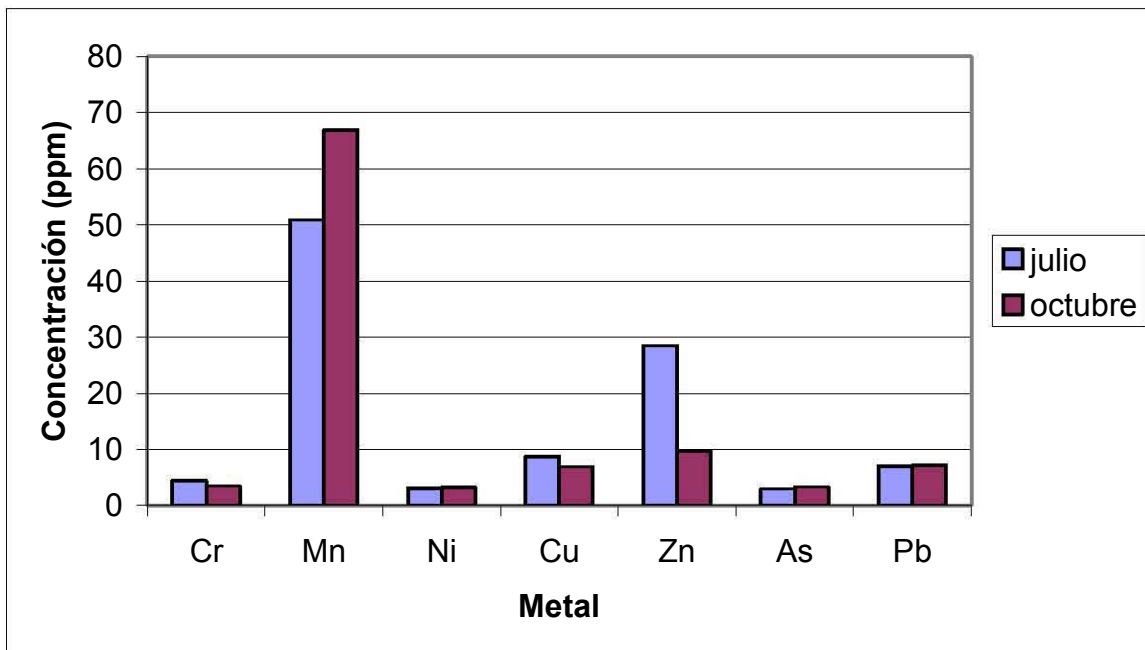
Hojas promedios											
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Promedio	Des. Est.
23	V		13.31	0.79	2.60	n.d	3.97	0.66	8.10	4.2	4.4
24	Cr		4.58	0.71	14.14	n.d	n.d	4.27	3.13	3.5	4.7
25	Mn		24.34	29.63	23.40	97.94	37.83	74.67	180.19	66.9	57.4
28	Ni		3.50	2.78	6.35	2.66	3.33	1.65	2.24	3.2	1.4
29	Cu		8.37	7.69	6.75	6.44	7.30	6.05	4.85	6.9	1.1
30	Zn		13.35	10.09	11.93	4.71	6.23	10.01	11.58	9.7	2.9
33	As		2.26	2.73	7.00	1.97	3.83	1.63	1.24	3.3	1.9
82	Pb		18.20	7.14	5.86	3.74	11.90	2.05	6.97	7.17	5.59
	V/Ni		3.80	0.29	0.41	n.d	1.19	0.40	3.61	1.31	
Raíces promedios											
23	V	3.78	10.15	n.d	3.08	5.83	n.d	2.10	n.d	3.1	3.4
24	Cr	16.13	10.84	13.20	13.86	n.d	n.d	4.25	1.96	7.7	6.6
25	Mn	57.56	32.37	18.37	17.16	7.01	8.49	11.56	9.58	20.3	17.1
28	Ni	6.15	7.53	6.63	8.03	3.20	1.01	1.70	3.45	4.7	3.1
29	Cu	5.54	5.78	5.03	6.27	4.13	12.91	2.29	6.76	6.1	3.7
30	Zn	16.37	11.70	10.20	6.86	6.95	5.37	3.40	6.69	8.4	5.1
33	As	3.31	1.88	5.47	2.16	1.59	0.33	n.d	1.45	2	1.8
82	Pb	1.27	2.10	4.65	4.57	4.77	5.20	3.40	8.22	4.19	2.03
	V/Ni	0.61	1.35	n.d	0.38	1.82	n.d	1.24	n.d	0.66	
	Temperatura °C	29.04	28.94	29.13	29.66	30.71	29.68	30.50	31.21		

En las Tablas 9 y 10 se presenta la relación entre la concentración de vanadio y de níquel (V/Ni) para los dos muestreos y tanto para hojas como para raíces en todos los sitios. Hay que recordar que, según Villanueva y Botello (1992), un cociente entre las concentraciones de estos dos elementos que se encuentre entre 3.25 y 6.78 indica presencia de petróleo crudo en la zona.

Se puede notar en las dos Tablas que se acaban de presentar, que existen 5 valores en total que están dentro del intervalo antes mencionado: en julio para los sitios 1, 7 y 8 en raíces, y en octubre en los sitios 2 y 8 para hojas, por lo cual el sitio 8, que está cerca de la salida de un río subterráneo, podría tener contaminación relacionada con el petróleo; sin embargo, cabe mencionar que los cocientes de la laguna en general no están dentro de los parámetros encontrados por Botello en 1992 en el Golfo de México, por lo que podemos concluir que no existe influencia de la extracción de petróleo en la laguna en general.

Con la finalidad de observar mejor los resultados de las Tablas 9 y 10, se presenta en la Figura 7 la concentración promedio en hojas de metales pesados en *Thalassia testudinum* en los muestreos de julio y octubre, mientras que la Figura 8 muestra los resultados promedio para raíces.

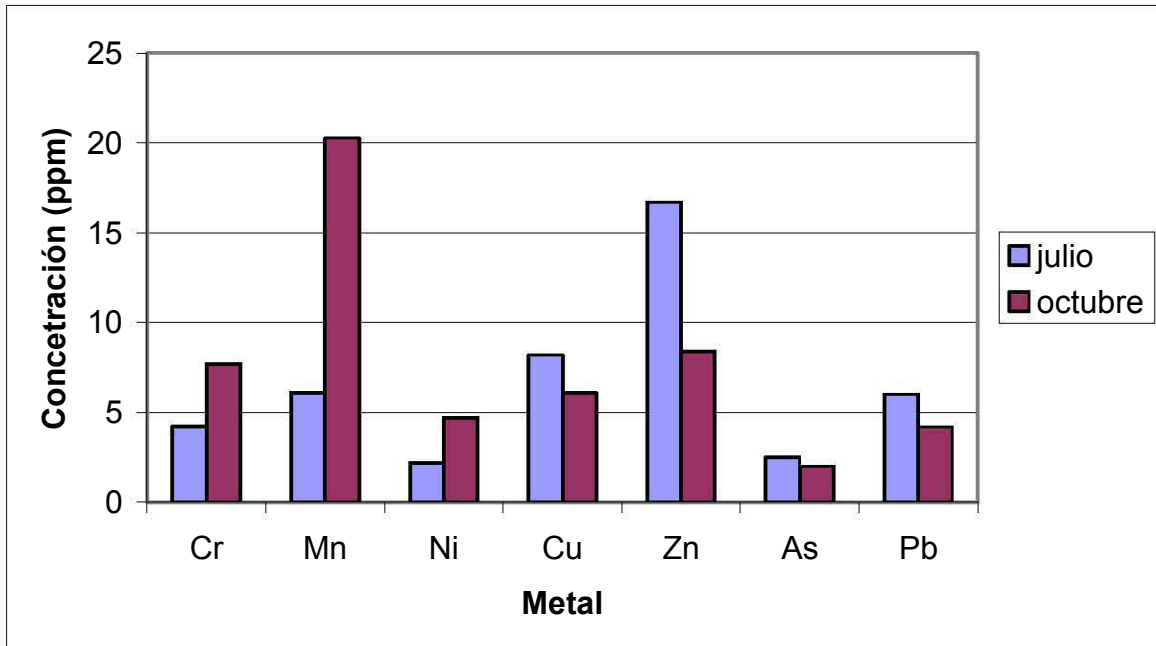
FIGURA 7
Concentración promedio de metales en hojas de *Thalassia testudinum* en la laguna de Yalahau



En lo que a hojas se refiere (Figura 7), se puede ver que de los tres metales esenciales para la *Thalassia testudinum* (Mn, Cu y Zn) sólo el manganeso tiene una mayor concentración durante el mes de crecimiento (octubre). De los tres elementos tóxicos (Cr, As y Pb), sólo el cromo presenta una menor concentración en el mes de crecimiento de los pastos, según lo esperado por la dilución de crecimiento, aunque no hay mucha variación entre los muestreos para estos tres elementos tóxicos. Esto se podría deber en parte a que no hubo una gran aportación de cobre y zinc en las escurrentías traídas por las lluvias del mes de junio en el mes de octubre, por lo cual los pastos marinos no pudieron captar mucho cobre ni zinc para su crecimiento. Al no haber mucho aporte de elementos esenciales, no pudo haber dilución hacia elementos tóxicos, razón por la cual los datos del cromo, arsénico y plomo son casi iguales en los dos muestreos. Por otra

parte, el zinc y el cobre podrían haberse presentado en una mayor concentración en julio porque la temperatura fue mayor que en octubre, aunque la diferencia entre las temperaturas es baja. El níquel no presentó o presentó poca variación en las hojas de la *Thalassia testudinum* entre los dos meses de muestreo.

FIGURA 8
Concentración promedio de metales en raíz de *Thalassia testudinum* en la laguna de Yalahau



En lo que a raíces se refiere se puede ver en la Figura 8 que de los tres metales esenciales (Mn, Cu y Zn), sólo el manganeso presenta una mayor concentración en octubre que en julio. El cobre y el zinc presentan el mismo comportamiento que en las hojas. De los tres elementos tóxicos, el cromo presenta también una mayor concentración en octubre, y el arsénico y el plomo presentan niveles mayores en julio, aunque varían muy poco. Estos dos últimos elementos presentan una dilución por crecimiento en octubre mientras que el cromo no muestra este comportamiento. El níquel tiene la misma tendencia que el cromo.

CONTAMINACIÓN EN LA LAGUNA DE YALAHAU.

Al no contar con valores oficiales para la *Thalassia testudinum* que determinen si la concentración de metales encontrada representa un riesgo para el ecosistema o la salud humana, es necesario comparar los valores encontrados en este estudio con otros citados anteriormente por otros autores. Esta comparación se hará de manera individual para cada uno de los metales, entre todos los sitios y las demás fuentes ya citadas. Se sombreadrán los resultados de nuestro trabajo en las tablas que estén por encima de los datos de los demás autores.

- **Arsénico.**

En las Tablas 11 y 12, se reportan las concentraciones de arsénico encontradas en este estudio junto con la de dos otros autores: Whelan III, quien realizó su estudio en la parte baja de la Laguna Madre y Fourqurean y Cal, quienes lo hicieron en seis estuarios de la costa este de Florida. Es importante mencionar que los resultados presentados en estas tablas se obtuvieron todos sobre la especie de pasto marino *Thalassia testudinum*, por lo que se podrá realizar una comparación directa entre los datos.

TABLA 11

Concentración de arsénico de hojas de *Thalassia testudinum*

	HOJAS (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	1,78	1,62	6,70	5,60	1,1	3,35	0,92	2,72
octubre		2,26	2,73	7,00	1,97	3,83	1,63	1,24
Fourqurean y Cal, 2001	1,84							
Whelan III et al., 2005	1,08 - 1,97							

TABLA 12

Concentración de arsénico de raíces de *Thalassia testudinum*

	RAÍCES (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	n.d.	3,15	3,19	6,40	1,45	n.d.	3,83	1,85
octubre	3,31	1,88	5,47	2,16	1,59	0,33	n.d.	1,45
Whelan III et al., 2005	1,21 – 1,47							

Después de analizar los resultados, se encontró que la mayoría de los datos de éste estudio están por encima de los reportados por otros autores, ya que la mitad de los datos de este estudio en hojas son mayores a la de estos literatos y sobre todo porque 11 de 16 resultados en raíces están muy por arriba de lo reportado anteriormente por Fourqurean y Cal así como por Whelan, quienes mencionan que sus zonas de estudio no están contaminadas, por lo que podemos decir que existe cierto enriquecimiento en nuestro ecosistema de este metaloide.

La ganancia en arsénico se hace notar sobre todo en los sitios 3 y 4, ya que en ambos su concentración fue muy superior, tanto en hojas como en raíces; se tiene una lectura en hojas de 6.70 ppm en el sitio 3 en julio y de 7.00 ppm en el 4 en octubre contra 1.97 ppm encontrados por Whelan III. En raíces se obtienen 5.47 ppm en octubre para la plaza 3 y 6.40 ppm para la 4 en julio contra 1.47 ppm de Whelan III. Esto quiere decir que el basurero de la comunidad de Holbox (sitio 2) puede afectar los niveles de este metal en los pastos marinos, ya que sus niveles son comparables o más altos que los reportados. Por lo tanto, el enriquecimiento de este metal podría explicarse directamente a través de las actividades humanas realizadas por esta comunidad en la laguna.

Por otro lado, se puede ver en la Tabla 11 que los niveles de arsénico son mayores en octubre que en julio: de los 7 datos comparables en hojas, 5 tienen un valor más grande para el mes de octubre. Esto parece mostrar que la absorción de arsénico por la *T. testudinum* no se comporta como la de elementos tóxicos, ya que se esperaría que tuviera una dilución por crecimiento en octubre (mes de crecimiento de los pastos). Se necesitarán más estudios para determinar las fuentes de contaminación de este metaloide y su comportamiento estacional en la *Thalassia testudinum*.

- Plomo.

En las Tablas 13 y 14 se presentan las concentraciones de plomo encontradas en este trabajo así como en otros: Nienhuis en Indonesia (*Thalassia hemprichii*), Brix en Dinamarca (*Zostera marina*), Montgomery y Price en Estados Unidos

(*Thalassia testudinum*), Whelan III en el Golfo de México (*Thalassia testudinum*) y Noriega en el SAV (*Thalassia testudinum*).

TABLA 13

Concentración de plomo en hojas de *Thalassia testudinum*

	HOJAS (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	6.6	8,20	1,95	15,90	13.4	1,35	1,27	7,57
octubre		18,20	7,14	5,86	3,74	11,90	2,05	6,97
Nienhuis, 1986	2,8							
Brix et al. 1983	1,1							
Montgomery y Price, 1979	6							
Whelan III et al., 2005	0,81 - 1,29							
Noriega, 2001	8,7							

TABLA 14

Concentración de plomo en raíces de *Thalassia testudinum*

	RAÍCES (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	8.7	2,49	7,83	2,05	8.2	6.7	3.7	8.33
octubre	1,27	2,10	4,65	4,57	4,77	5,20	3,40	8,22
Nienhuis, 1986	6,1							
Brix et al. 1983	1							
Whelan III et al., 2005	0,75 - 1,2							
Noriega, 2001	7,5							

Según estos últimos resultados, la mayor concentración de todas y por mucho es la del mes de octubre para el sitio 2 en las hojas de la *Thalassia testudinum*, aunque es necesario mencionar que se realizó la lectura de una sola replica de este sitio y de esta parte del pasto, ya que se tuvieron perdidas durante el estudio. Este dato se debe de tomar con precaución.

Brix en 1983 encontró los niveles más bajos de plomo analizando la *Zostera marina*, aunque haya concluido que su zona de estudio estaba en general contaminada debido a los desechos industriales provenientes del mar del norte (según Salomons y Forstner, 1984). De acuerdo con Shroeder y Thorhaug, la especie de pasto marino analizada, *Thalassia testudinum*, tiende a acumular plomo, por lo cual se podría pensar que es normal que los niveles de este metal en la *T. testudinum* sean más altos que los de la *Zostera marina*. Al comparar con

sitios no contaminados como los de Whelan III y Montgomery y Price (quienes utilizaron nuestra clase de pasto para su estudio), la laguna Yalahau presenta niveles de plomo mucho más altos, tanto en hojas como en raíces: en total, sólo 3 sitios tienen valores comparables a los de Whelan III (sitios 6 y 7 en hojas en el mes de julio y sitio 1 en raíces en el mes de octubre). Lo mismo ocurre cuando se comparan niveles de referencia de este metal obtenidos por Nienhuis en 1986 con los de la laguna: estos últimos son comparativamente más elevados en lo que a hojas se refiere (menos los sitios 3, 6 en julio y el 7 en los dos meses), en tanto que los valores de las raíces son relativamente iguales o más bajos, menos los sitios 1, 3 y 5 en julio y el sitio 8 en los dos meses.

En cambio, si se comparan las concentraciones obtenidas durante nuestros dos muestreos con las concentraciones en *Thalassia testudinum* en una zona contaminada, como lo es el SAV (Noriega, 2001), se puede observar que estas se encuentran dentro del mismo intervalo o ligeramente más bajas, particularmente en lo que a hojas se refiere (menos los datos de los sitios 2 y 6 en octubre, y 4 y 5 en julio en hojas que son mucho más altos que los de Noriega). Todo esto parece demostrar entonces que nuestro sistema marino presenta un exceso de plomo, ya que nuestras concentraciones son más altas que zonas limpias o de referencia, y son comparables a las de zonas contaminadas.

Es de notarse que el sitio número 7 es el más limpio de todos por mucho, tanto en hojas como en raíces, teniendo valores por debajo y comparables a los lugares de referencia o en donde no se había encontrado contaminación. Es de advertirse también que los sitios 2, 4 y 5 son por mucho los más contaminados en la parte de las hojas, que los sitios 1, 3 y 5 lo son en la parte de la raíz y que el sitio 8 lo es en ambas partes. Se puede suponer entonces que el basurero de la Isla de Holbox (sitio 2) a través quizás de baterías, y los desechos de actividades industriales que llegan a la salida del río subterráneo (sitio 8) son los causantes de los altos niveles de plomo en la laguna Yalahau.

Por otro lado, se puede observar en la Tabla 13 que una mitad de los sitios aumentan la concentración de metal en las hojas durante el mes de octubre (4 de 7 datos), lo cual no es totalmente el comportamiento esperado, ya que siendo un

metal tóxico, se espera que se presente una dilución por crecimiento en el mes de octubre en hojas; pero en lo que a raíces se refiere, 7 de los 8 datos son más altos en julio. Esto demuestra una dilución por crecimiento para el plomo en las raíces de la *T. testudinum* (aunque este comportamiento se esperaba nada más en las hojas). Con base en esto, los niveles en el mes de julio deben ser más altos que en octubre. Los valores que no siguen este comportamiento, y que presentan una mayor concentración en octubre que en julio, se podrían explicar con las constantes aportaciones de plomo proveniente del basurero y de la descarga del río subterráneo.

- Cromo:

En las Tablas 15 y 16 se reporta la concentración de cromo encontrada en este trabajo. En comparación, se presentan los trabajos de Montgomery y Price en 1979 (*Thalassia testudinum*), Guven en 1993 (*Zostera marina*) y Prange y Dennison en 2000 (*Zostera capricorni*).

TABLA 15
Concentración de cromo en hojas de *Thalassia testudinum*

	HOJAS (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	3,00	2,25	4,80	5,85	0,72	10,12	2,79	5,68
octubre		4,58	0,71	14,14	n.d.	n.d.	4,27	3,13
Montgomery y Price, 1979	8							
Guven et al, 1993	13,6							
Prange y Dennison, 2000	5							

TABLA 16
Concentración de cromo en raíces de *Thalassia testudinum*

	RAÍCES (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	3,55	2,50	5,98	3,57	4,34	3,76	3,52	6,40
octubre	16,13	10,84	13,20	13,86	n.d.	n.d.	4,25	1,96
Prange y Dennison, 2000	12,8							

Al comparar los resultados de la laguna con los de otros sitios se observa que están relativamente bajos, aunque siempre dentro del mismo intervalo de valores. Cabe señalar que la mayoría de los sitios con los cuales nuestros resultados se están comparando se consideran como contaminados. Este es el caso de los sitios de Guven en Turquía y de Prange y Dennison en Australia, ya que este último se encuentra en una zona industrial. De allí se puede decir que hay cierto enriquecimiento en nuestro ecosistema debido a este metal, aunque es importante señalar que en el mes de octubre, en los sitios 5 y 6 no se encontraron trazas de cromo ni en hojas ni en raíces.

El incremento de cromo se nota sobre todo en las raíces de la *Thalassia testudinum*, ya que sobresalen los sitios 1, 2, 3 y 4 con altos valores en el mes de octubre, y también en el sitio 4 en hojas en el mes de octubre y el 6 en hojas en el mes de julio. Estos valores de octubre están por encima de los valores de la zona industrial de Prange y Dennison, lo cual quiere decir que hay contaminación en estos sitios en el mes de octubre.

Al ser el cromo un elemento tóxico, se esperaría tener una mayor concentración en las hojas en los sitios durante el mes de julio que durante el mes de octubre, pero se tiene más bien un comportamiento dividido, ya que la mitad de los datos son más elevados en julio (4 de 7). Entonces, no se puede tener una explicación de este comportamiento a través de la dilución por crecimiento. Cabe mencionar que el cromo no fue un elemento analizado por Whelan III, por lo que es necesario realizar más estudios para entender el comportamiento estacionario de este metal en la *Thalassia testudinum*.

- Cobre:

En las Tablas 17 y 18 se presenta la concentración de cobre encontrada en este trabajo así como la de Nienhuis (*Thalassia hemprichii*), de Brix (*Zostera marina*), de Pulísh (*tres especies de pasto*), de Montgomery y Price (*Thalassia testudinum*), de Botello (*Thalassia testudinum*), de Prange y Dennison (*Zostera capricorni*), y de Whelan III (*Thalassia testudinum*).

TABLA 17

Concentración de cobre en hojas de *Thalassia testudinum*

	HOJAS (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	7,10	5,45	13,90	14,25	4,60	8,17	5,03	10,79
octubre		8,37	7,69	6,75	6,44	7,30	6,05	4,85
Nienhuis, 1986	7							
Brix et al. 1983	4,8							
Pulish, 1976, 1980	4,9							
Montgomery y Price, 1979	25							
Botello 1993, no publicado	13							
Whelan III et al., 2005	7,1							
Prange y Dennison, 2000	11,5							
Noriega, 2001	2,8							

TABLA 18

Concentración de cobre en raíces de *Thalassia testudinum*

	RAÍCES (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	7,04	4,70	11,80	7,82	3,88	8,48	14,01	8,08
octubre	5,54	5,78	5,03	6,27	4,13	12,91	2,29	6,76
Nienhuis, 1986	6,8							
Brix et al. 1983	3,3							
Pulish, 1976, 1980	4,3							
Botello 1993, no publicado	20							
Whelan III et al., 2005	4,9							
Prange y Dennison, 2000	2,1							
Noriega, 2001	1,4							

Evaluando los datos obtenidos en este estudio para la laguna contra los niveles base de cobre que se encontraron en los trabajos de Nienhuis y Pulish, se puede decir que son más altos (destacando los sitios 3, 4 y 8 en hojas en julio y los sitios 3 y 7 en raíces en julio y 6 en octubre) pero que se encuentran dentro del intervalo de las concentraciones base (sitios 5 y 7 en hojas, y 1 y 2 en raíces en ambos meses por ejemplo). Los niveles más altos encontrados, como son los de Montgomery y Price, y Botello, quien considera que la Laguna de Términos en Campeche esta particularmente enriquecida en cobre, son mucho más altos que

los de nuestro estudio, pero los niveles más bajos encontrados, como son los de Noriega y a pesar que determinó que el SAV es un ecosistema contaminado, son mucho más bajos que los de la laguna.

Comparando nuestros resultados contra los de un sitio no contaminado, como lo es de Whelan III en Estados Unidos, encontramos que en general todos nuestros valores son más altos, pero si los comparamos contra los de un sitio contaminado, como lo es de Botello en Campeche, vemos que nuestros valores son frecuentemente más bajos.

Por lo tanto, tenemos concentraciones de cobre en la laguna Yalahau razonablemente dentro de niveles base, más altos que en zonas no contaminadas y más bajos que en zonas contaminadas, por lo cual, no se puede decir que haya enriquecimiento de este metal en la zona.

Siendo el cobre un metal esencial, y siendo octubre un mes de crecimiento de la *Thalassia testudinum*, las hojas deberían de tener una mayor concentración en este mes que en julio; sin embargo, solamente 3 de 7 datos en hojas son mayores en octubre. Se puede decir entonces que las escurrientías de este mes no aportaron gran cantidad de cobre a la Laguna Yalahau, razón por la cual los pastos no pudieron captar una mayor cantidad de este metal para su crecimiento.

- Zinc:

En las Tablas 19 y 20 se reporta la concentración de zinc encontrada en este estudio, aunada a la de los siguientes literatos: Nienhuis (*Thalassia hemprichii*), Brix (*Zostera marina*), Pulish (*Tres especies de pastos*), Montgomery y Price (*Thalassia testudinum*), Botello (*Thalassia testudinum*), Whelan III (*Thalassia testudinum*), Prange y Dennison (*Zostera capricorni*), y Noriega (*Thalassia testudinum*).

TABLA 19

Concentración de zinc en hojas de *Thalassia testudinum*

	HOJAS (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	19,95	32,90	32,25	36,40	11,20	14,98	17,80	62,21
octubre		13,35	10,09	11,93	4,71	6,23	10,01	11,58
Nienhuis, 1986	24							
Brix et al. 1983	78							
Pulish, 1976, 1980	22							
Montgomery y Price, 1979	7.0							
Botello 1993, no publicado	18							
Whelan III et al., 2005	24,1 - 24,6							
Prange y Dennison, 2000	37							
Noriega, 2001	41,6							

TABLA 20

Concentración de zinc en raíces de *Thalassia testudinum*

	RAÍCES (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	16,44	12,78	12,85	16,71	7,91	25,61	19,75	21,93
octubre	16,37	11,70	10,20	6,86	6,95	5,37	3,40	6,69
Nienhuis, 1986	27							
Brix et al. 1983	55							
Pulish, 1976, 1980	29							
Botello 1993, no publicado	21							
Whelan III et al., 2005	23,4 – 25,4							
Prange y Dennison, 2000	24,2							
Noriega, 2001	32,8							

Primeramente, es notorio que el zinc se acumula más en las hojas que en las raíces en los pastos marinos. Prácticamente todos nuestros resultados (menos los sitios 6 y 7 en el mes de julio y los sitios 3 y 5 en el mes de octubre) y el de casi todos los demás autores así lo corroboran (menos Nienhuis, Pulish y Botello), y esto va de acuerdo con lo que concluyen Parker (1963) y (1966), y Schroeder y Thorhaug (1980) para la *Thalassia testudinum*, los cuales además, dicen que este elemento no se traspasa a las raíces, por lo que se encuentre allí proviene de los sedimentos.

En un segundo lugar, al comparar nuestros datos con los de referencia, que en este caso son los de Nienhuis y Pulish, se observa que todos con excepción de las muestras de hojas en julio de los sitios 2, 3, 4 y 8 son más bajos, tanto en raíz como en hojas. Se observa exactamente lo mismo si se evalúan nuestros resultados con sitios no contaminados, como el de Whelan III, y aunque los resultados para los sitios 2, 3, 4 y sobre todo 8 son altos en las hojas de julio, es obvia la diferencia que existe con los sitios contaminados por actividades antropogénicas, como el SAV de Noriega, el Limfjord de Brix debido a las actividades industriales del Mar del Norte y la zona urbanizada en Australia de Prange y Dennison. Los valores en zinc de los sitios contaminados son mucho más altos que los encontrados en la Laguna Yalahau en general.

Se puede concluir que no existe o que existe poca contaminación por este metal en nuestro ecosistema de estudio, y que sus niveles podrían ser tomados como base para la zona.

En este estudio, el zinc se comporta totalmente distinto a lo que se tenía esperado: como es un metal esencial en el crecimiento de la *Thalassia testudinum*, lo tendría que haber absorbido más en octubre que en julio. En cambio, todos los datos de las hojas en julio son más altos que en octubre (Tabla 19). De hecho, este metal se comporta completamente como si fuera un metal tóxico para el pasto, ya que lo capta menos en época de crecimiento que en épocas en donde no crece tanto. Este comportamiento se puede deber a que las escurrentías del mes de octubre no aportaron gran cantidad de zinc a la laguna Yalahau, razón por la cual los pastos no pudieron captar una mayor cantidad de este metal para su crecimiento. Se necesitarán más estudios en la zona para conocer el motivo de este comportamiento estacionario en la *Thalassia testudinum*. Es importante mencionar que en estudios con sistemas biológicos siempre se puede encontrar un comportamiento aleatorio en los datos porque son muchas las variables que participan y afectan los sistemas en la naturaleza.

- Níquel:

Se presentan las concentraciones de níquel encontradas en la Laguna de Yalahau junto con las de otros literatos, como Montgomery y Price (*Thalassia testudinum*), Botello (*Thalassia testudinum*) y Noriega (*Thalassia testudinum*) en las Tablas 21 y 22.

TABLA 21

Concentración de níquel en hojas de *Thalassia testudinum*

	HOJAS (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	1,00	3,80	6,10	2,65	n.d	2,06	2,26	6,50
octubre		3,50	2,78	6,35	2,66	3,33	1,65	2,24
Montgomery y Price, 1979	4,5							
Botello 1993, no publicado	11							
Noriega, 2001	7,7							

TABLA 22

Concentración de níquel en raíces de *Thalassia testudinum*

	RAÍCES (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	1,15	2,46	3,97	3,29	1,89	2,17	0,48	2,23
octubre	6,15	7,53	6,63	8,03	3,20	1,01	1,70	3,45
Botello 1993, no publicado	8							
Noriega, 2001	2							

Evaluando los resultados obtenidos en todos los sitios contra los datos de los demás autores, se observa claramente que la gran mayoría de los nuestros son más bajos, aunque cabe mencionar que todos los autores consideraron su zona de estudio contaminada, menos Montgomery y Price. Botello inclusive hace hincapié en que su sitio de trabajo, la laguna de Términos en Campeche, esta particularmente enriquecida en níquel.

En lo que a hojas se refiere, los datos de éste estudio están dentro del intervalo de Montgomery y Price, el cual no considera su sitio contaminado. En lo que a raíces

se refiere, Noriega encuentra un resultado bajo en el contaminado SAV, por lo que la mayoría de los valores de éste trabajo están por arriba de este (10 de 16 datos). Se puede decir entonces que no hay contaminación a nivel hojas en los pastos, ya que solamente 3 datos resultan ser más altos que el de otro reportado en un sitio no contaminado (Montgomery y Price) (sitios 3 y 8 en el mes de julio y 4 en el mes de octubre). En cambio, se puede constatar que hay enriquecimiento a nivel sedimento, ya que cuatro datos están muy cerca de lo reportado por Botello, que está particularmente enriquecido en níquel (sitios 1, 2, 3 y 4 en raíces en octubre). Esto es notable en el sitio 2 en octubre, en donde el valor en níquel es alto. Se puede deber a que las escurrentías del mes de octubre filtraron este metal hasta los sedimentos al lado del basurero, ya que hay que recordar que el níquel se utiliza en baterías desechables y que están tiradas al aire libre en ese lugar. El níquel presenta un comportamiento dividido en cuanto a ser tomado por la *Thalassia testudinum* en una época más que en otra (Tabla 21); esto es lo esperado, ya que este metal no es un elemento esencial ni tóxico para este tipo de pasto marino.

- Manganeso:

En las Tablas 25 y 26 se presentan las concentraciones de manganeso halladas en este estudio y las encontradas por Whelan III (*Thalassia testudinum*) en 2005 en la Laguna Madre en Texas.

TABLA 25

Concentración de manganeso en hojas de *Thalassia testudinum*

	HOJAS (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	13,45	27,65	35,9	21,45	69,65	50,26	52,95	136,25
octubre		24,34	29,63	23,4	97,94	37,83	74,67	180,19
Whelan III et al., 2005	95 - 256							

TABLA 26

Concentración de manganeso en raíces de *Thalassia testudinum*

	RAÍCES (ppm)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
julio	3,05	4,16	4,49	3,46	5,98	12,45	7,01	7,93
octubre	57,56	32,37	18,37	17,16	7,01	8,49	11,56	9,58
Whelan III et al., 2005	21 - 45							

Es de notarse que prácticamente todos los resultados obtenidos en este estudio de manganeso en las hojas son mucho más grandes que los de las raíces (con excepción de los sitios 1 y 2 en raíces en el mes de octubre). Se puede decir a partir de esto que la *Thalassia testudinum* toma más este metal a través de sus hojas que a través de sus raíces.

En lo que a las hojas se refiere, los datos de los 7 primeros sitios están por debajo del intervalo de datos encontrados por Whelan III (menos en el sitio 5 en octubre). Los resultados del octavo sitio están dentro de este intervalo.

En lo que a raíces se refiere, el único dato que está por arriba del intervalo de datos de Whelan III es para el sitio 1 en octubre, que por cierto se encuentra cerca del basurero de la comunidad de Holbox. Todos los demás resultados están por debajo del intervalo, menos el del sitio 2 en octubre, que está dentro y que se encuentra también cerca del basurero. Se puede decir entonces que hay cierto aporte en manganeso por parte del basurero a nivel sedimento; sin embargo, es importante decir que Whelan III no encontró contaminación en su zona de estudio, por lo que podemos decir que no hay contaminación por manganeso en la Laguna Yalahau. Al estar prácticamente todos nuestros valores por debajo de los intervalos de Whelan III, podemos inclusive concluir que nuestros datos se pueden tomar como de referencia para la zona.

El manganeso es un elemento esencial, aunque su comportamiento no lo demuestra así: las concentraciones en las hojas en octubre deberían de haber sido más elevadas que en julio; sin embargo, nada más la mitad de los datos así se comporta. Los datos de las raíces son más elevados en octubre que en julio, menos el del sitio 6. Se puede decir que la *Thalassia testudinum* absorbió

activamente el manganeso en sus raíces en época de crecimiento. Cabe recalcar que este comportamiento se espera en las hojas del pasto marino, y no en las raíces, por lo que se necesitaran hacer más estudios para explicar esta conducta. Es importante volver a señalar que el comportamiento aleatorio en los sistemas biológicos es frecuente porque son muchos los factores que afectan a los sistemas en la naturaleza.

CONCLUSIONES

- Comparativamente con otros sitios ya estudiados, no existe contaminación en la laguna de Yalahau. Algunos niveles de metales pueden considerarse inclusive como de referencia en la zona, como es el caso del zinc y del manganeso.
- Existe un enriquecimiento local sobre todo en cuanto a arsénico, plomo, cromo y níquel posiblemente causado por la mala disposición de la basura en el basurero de Holbox.
- Además, se encontró otro enriquecimiento local situado a la salida del río subterráneo, en donde se concentran plomo, cromo y manganeso después de que las lluvias acarreen estos metales, que a su vez se pueden producir por actividades antropogénicas.
- Con el análisis del comportamiento global de los metales pesados en la Laguna de Yalahau, se concluye que solamente el manganeso presentó absorción activa por parte de las raíces y las hojas de la *T. testudinum*. Los metales tóxicos no presentaron absorción pasiva por parte de las hojas del pasto marino. Sólo el plomo presentó dilución por crecimiento por parte de las raíces de la *T. testudinum*. Esto se explica por el bajo aporte de los metales hacia la laguna.
- Se comprobó que la fuente de contaminación por metales pesados en la Laguna de Yalahau no provienen del petróleo.
- Estando la Laguna de Yalahau en buenas condiciones en cuanto a metales pesados se refiere, y siendo esta una zona protegida, es importante tomar medidas preventivas antes que correctivas para conservar este ecosistema.
- Es trascendental para nuestro país que científicos sigan sobre esta línea de investigación y que se cuente con el apoyo de la sociedad en general, para poder alcanzar un desarrollo sustentable y una mejora en la calidad de vida del planeta.

ANEXO

MÉTODO PIXE.

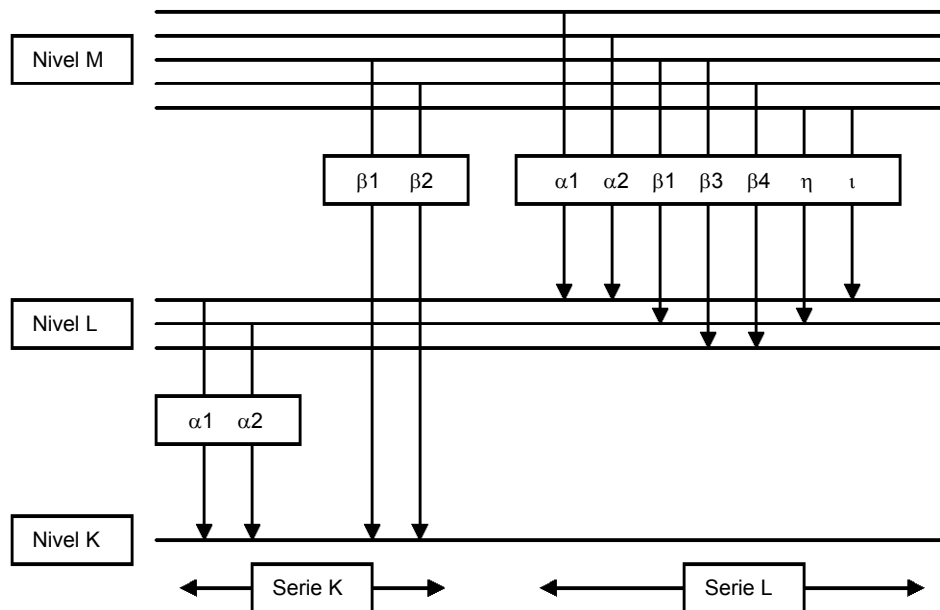
- **Funcionamiento del método PIXE.**

Particle Induced x-ray Emission (PIXE), es una técnica poderosa de análisis elemental no destructiva, de gran alcance y utilizada en hoy en día rutinariamente por geólogos, arqueólogos, conservadores del arte y otros para ayudar a dar respuesta a cuestiones de proveniencia, de fecha y de autenticidad de sitios u obras.

La teoría cuántica indica que los electrones de un átomo deben ocupar niveles de energía cuantificados para ser estables. El bombardeo con iones de suficiente energía (generalmente protones meV) producidos por un acelerador de estos hacia un átomo, causará la ionización de sus niveles energéticos internos. Los electrones de los niveles externos bajaran entonces para sustituir las vacantes que dejaron los electrones de la cáscara interna. En ese momento, el exceso de energía será liberado mediante Rayos X, aunque solamente se permitan ciertas transiciones entre niveles, de acuerdo otra vez con la teoría cuántica, así como se muestra en la Figura 9 para elementos medios y pesados.

FIGURA 9

Transiciones permitidas para la ocupación de vacantes en átomos medios y pesados



El espectro de Rayos X está entonces determinado por los niveles de energía de los electrones en el átomo, y por consiguiente, de acuerdo a las transiciones que se pueden admitir entre estos, por lo cual cada espectro es característico de cada elemento, permitiendo así la identificación del mismo.

Cuando los electrones de transición provienen de la capa L y van hasta la capa K se les denomina K_{α} y cuando provienen de la capa M se les llama K_{β} . Y de igual manera, las transiciones de electrones hasta la capa L cuando provienen de la capa M se les nombra L_{α} , luego L_{β} , y así sucesivamente.

Un detector de energía dispersa se utiliza para registrar y medir la intensidad de estos Rayos X, para después convertirlas en concentraciones elementales. Cabe mencionar que el espectro de Rayos X es complicado, ya que algunas de las energías de transición son bastante parecidas, como por ejemplo la K_{α} y la K_{β} , por lo que aparecen en el espectro como un solo pico, así como algunas transiciones de poca intensidad.

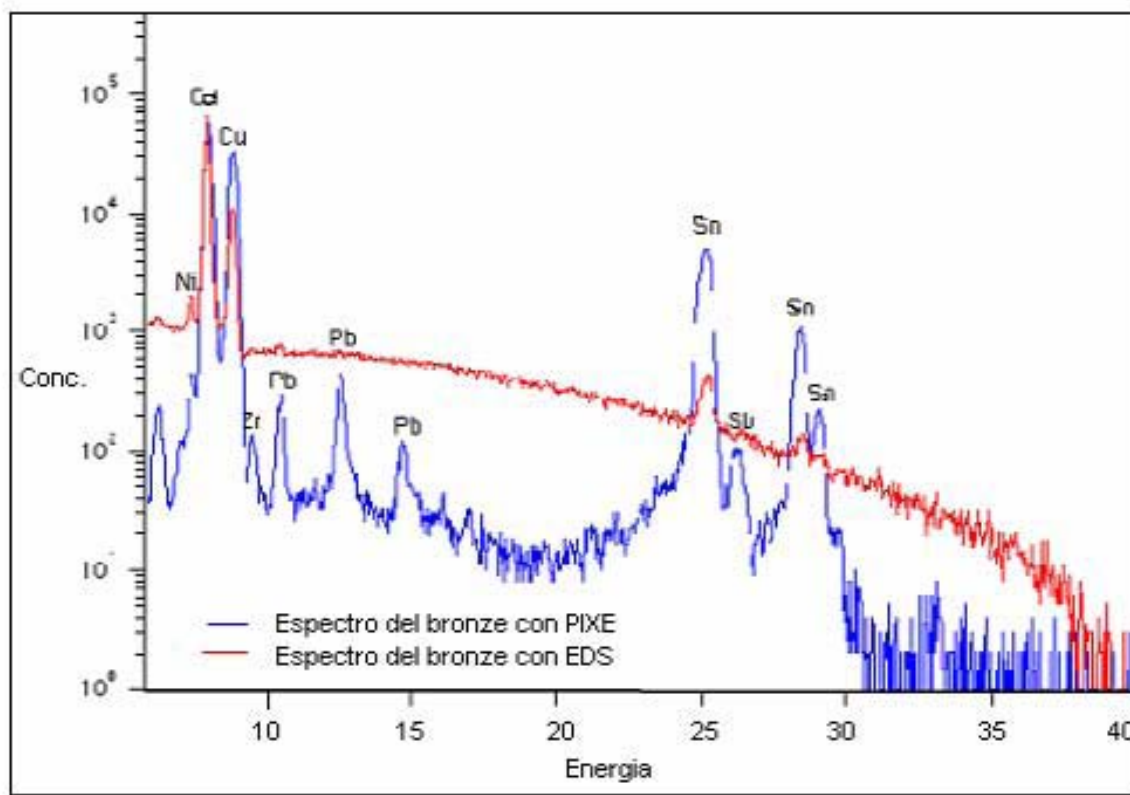
- Las ventajas del método PIXE

Alta sensibilidad:

Comparada con otras técnicas analíticas como por ejemplo la de espectroscopia de energía dispersa (EDS, *Energy Dispersive Spectroscopy* en inglés), PIXE ofrece mejores picos de elementos sobre el fondo de base, el cual determina principalmente el límite de detección de cualquier elemento, y consecuentemente, mejor sensibilidad hacia los elementos buscados, como se puede ver en los espectros de la Figura 10. Esta sensibilidad depende de un número de factores, tales como la composición de la matriz, la eficacia del detector y traslapeo máximo. La concentración de los elementos se da entonces en unidades de ppm.

FIGURA 10

Comparación entre espectros obtenidos mediante las técnicas PIXE y EDS



Mediciones a presión atmosférica:

Es posible sacar un as de protones meV del ambiente de alto vacío del acelerador hacia el medio ambiente del laboratorio. Esta tecnología permite realizar mediciones de un artefacto valioso o de cualquier tipo de material a presión atmosférica, fuera de los límites de un compartimiento en condiciones específicas para cada caso, como en otras técnicas. Una posible desventaja sobre este accionar es que los Rayos X de baja energía de los elementos más ligeros pueden ser atenuados en el aire. Sin embargo, se puede purgar el área entre la muestra y el detector con helio para reducir al mínimo este efecto.

Capacidad para medir varios elementos al mismo tiempo:

El análisis se realiza para cualquier elemento del sodio al uranio en un solo espectro en este sistema. Los Rayos X de los elementos por debajo del sodio en la tabla periódica no se pueden considerar porque se absorben ya sea en la ventana del detector, en la atmósfera entre la muestra y el detector, o a través de algún otro filtro usado. Para el análisis de cierto elemento en específico, se elige un filtro de cierto material para atenuar los Rayos X en las energías de los elementos deseados, permitiendo que el detector los mida con mayor sensibilidad. Estos filtros causan generalmente una insensibilidad a elementos más ligeros, pero permitirán simultáneamente el análisis de cualquier elemento por encima del límite de absorción del filtro.

El as de electrones es no-destructivo:

Las corrientes que causa el as de protones salidos del acelerador generalmente alcanzan solamente algunos milivoltios de calefacción sobre la muestra. La situación puede ser mejorada aún más cuando se purga con helio el espacio entre la ventana del detector y la muestra analizada, ya que el calor puede converger hacia el ambiente. Esto nos permite finalmente poder analizar una muestra varias veces si es que así se desea.

- El uso de estándares

Debido a la carencia del conocimiento exacto de los parámetros críticos del sistema tales como la eficiencia absoluta del detector, la atenuación del filtro de Rayos X y la corriente exacta del as, muchos sistemas de PIXE confían en estándares para determinar las composiciones exactas de las muestras, como en el presente caso. Muchas veces es fácil desarrollar un estándar interno para ser utilizado en una medición en particular.

- Preparación de las muestras

El espécimen ideal debe ser plano y de composición uniforme. Por ejemplo, los cascotes de cerámica se deben machacar, mezclar y tamizar. En nuestro caso, se machacaron, mezclaron y tamizaron hojas y raíces de *Thalassia testudinum* ya secas, para después ser prensadas y quedar como pastillas perfectamente planas. Puesto que la mayoría de los Rayos X emanan de la superficie de la muestra (con unos micrones de espesor), esta debe de ser homogénea para tener medidas justas.

- El beneficio de utilizar filtros de Rayos x.

Los picos de Rayos X de los elementos mas pesados pueden ocupar mucha de la capacidad de los detectores. En ciertos casos, los Rayos X dominantes de baja energía pueden entonces adquirir menor importancia de la que tienen, de modo que el detector vea solamente las contribuciones debido al rastro de una energía más alta o a los elementos de menor importancia. En esos casos, la corriente del as se puede variar para tener mayor sensibilidad hacia un elemento deseado, mientras se mantiene al detector a la misma intensidad que antes de aumentar la corriente. En algunos casos, filtros de un solo elemento pueden ser utilizados para atenuar solo un elemento dominante de la matriz, permitiendo todavía la lectura relativamente buena del resto de los Rayos X. Una buena regla en estos casos es introducir un filtro absorbente más ligero que el elemento dominante de la matriz

por 2 números atómicos. Es decir, que el mejor filtro para una matriz de Fe sería una hoja de Cr.

En conclusión, se pueden utilizar filtros en los detectores para cualquier elemento principal de la matriz que se requiera atenuar.

- Sobre el sistema

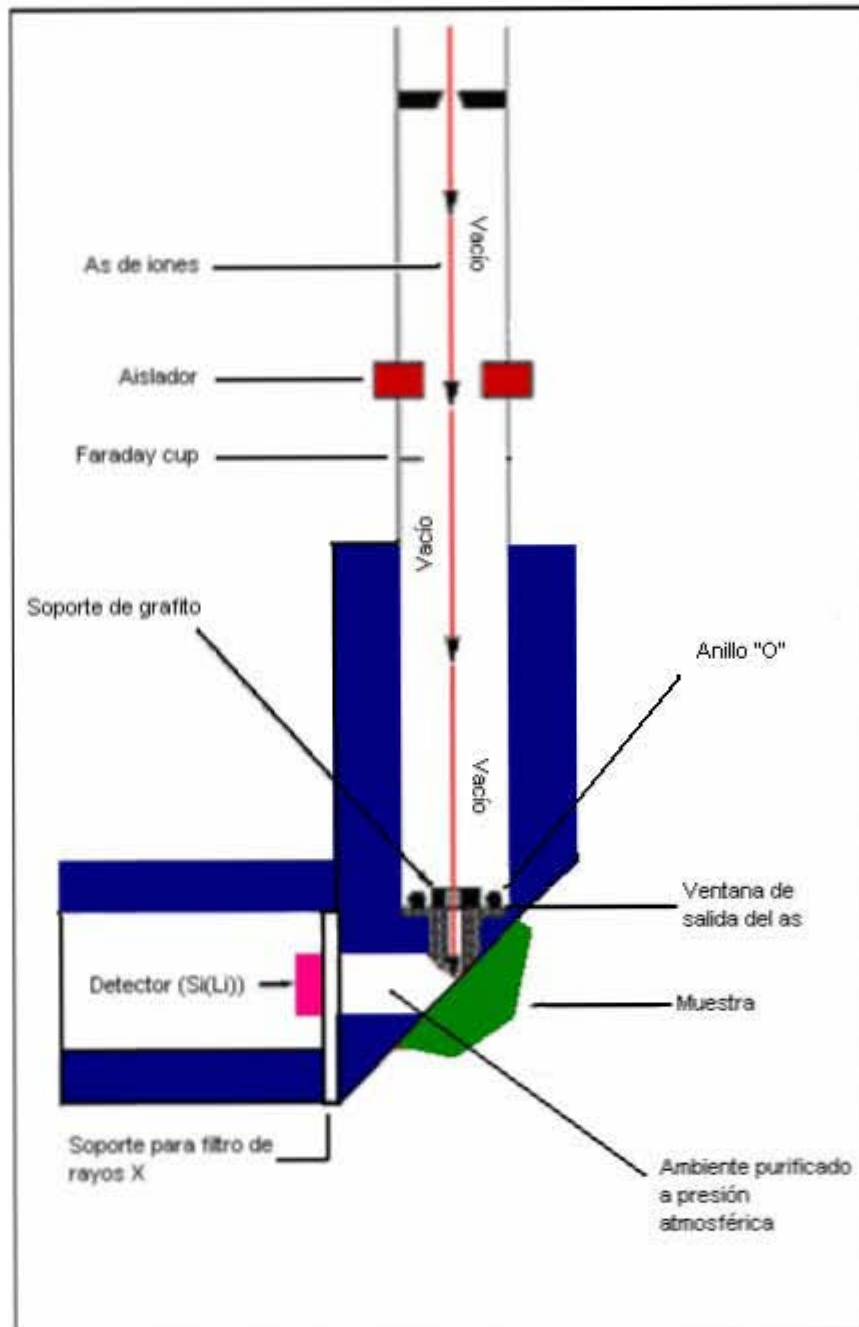
El as de protones es producido por un acelerador de iones *peletron* y es traído a través de una placa de grafito con una serie de agujeros espaciados de 0.3 milímetro uno de otro. Una fina capa de polímero, en forma de anillo “O”, sella esta placa para proporcionar una barrera de vacío a través de la cual pasa el as.

El bloque de grafito proporciona tanto un soporte como un aislamiento de calor al filtro, aumentando así su vida útil bajo bombardeo de protones. Un dispositivo de Faraday proporciona una supresión extra de electrones al as de protones.

La colocación exacta de la muestra en relación con el as es lograda con la ayuda de un rayo láser de HeNe que se coloca de manera collinear con este primero. La muestra se monta en un bloque con una inclinación de 45 grados con respecto al as de iones incidente. El área de muestreo puede ser purgada con helio cuando se quiera buscar elementos ligeros con PIXE.

Un detector de Rayos X de Si(Li) se coloca 90 grados con respecto al as de iones incidente y se utiliza para determinar energías e intensidades pico de Rayos X. Varios filtros de Rayos X son utilizados para atenuar los picos dominantes y así permitir mayor sensibilidad hacia elementos buscados. Un paquete de software se utiliza entonces para analizar y convertir datos espectrales en concentraciones elementales. Esto se muestra en la Figura 11.

FIGURA 11
Sistema PIXE



BIBLIOGRAFÍA

Libros y artículos

1. Albert, Lilia A. (2001). Curso básico de toxicología ambiental, UTEHA, Noriega editores.
2. Ali, M (2004): PIXE and RIXRF comparison for applications to biological simple analysis. *Nuclear instruments and methods in physics research*. 222, 567-576.
3. Brix, H and Lyngby, J.E. (1983). The distribution of some metallic elements in eelgrass (*zostera marina*) and in sediment in the Limfjord, Denmark.
4. Brix, H., Lyngby, J.E. and Schierup, H.H. (1983). Eelgrass (*zostera marina*) as an indicator organism of trace elements in the Limfjord, Denmark.
5. Caccia, Valentina G.: Millero, Frank J. y Albert Palanques (2003); The distribution of trace metals in Florida bay sediments. *Marine pollution bulletin* 46, 1420-1433.
6. Campanella, L; Conti, Me; Cubadda, F. y C. sucapane (2001): Trace metals in seagrass, algae and molluscs from an uncontaminated area in the Mediterranean. *Environmental pollution*. 111, 117-126.
7. Costa, Max, 2003; Potential hazards of hexavalent chromate in our drinking water. *Toxicology and applied pharmacology*. 188, 1-5.
8. Denker, A; Opitz-Coutureau, J; Campbell, J.L; Maxwell, J.A y T. Hopman (2004). High energy PIXE; quantitative analisis. *Nuclear instruments and methods in physics research*. 219-220, 130-135.
9. Diario oficial de la federación (1994): Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Limites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
10. Fortoul, Teresa I.; Saldivar O., Liliana; Espejel-Mayab, Guadalupe; Bazarro N., Patricia; Mussali-Galantea, Patricia; Avila-Casadoa, Maria; Laura y Maria-Rosa Avila-Costa. Inhalation of cadmium, lead or its mixture (2004).

- Effects on the bronchiolar structure and its relation with metal tissue concentrations. *Environmental toxicology and pharmacology*. 19, 329-334.
11. Fourqurean, J. y Cai, Y. (2001). Arsenic and phosphorus in seagrass leaves from the gulf of México. *Aquatic botany* 71, 247-258.
 12. Furness, Robert W. y Rainbow, Philip S.; Heavy metals in the marine environment. *Editorial CRC, EU 2000*. 104.
 13. Guven, C.K., Saygy, N. y Ozturk, B. (1993). Survey of metal contents of Bosphorus algae, *zostera marina* and sediments. *Botanica marina*, 36, 3, 175-175.
 14. Herrera, Jorge (2005). Comunicación personal.
 15. INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). Gobierno federal de México, 1998.
 16. Johansson and J.L. Campbell, and K.G. Malmqvist (1995). Particle Induced X-ray Emission spectrometry (PIXE) (WILEY).
 17. Kohno, M; Yoshida, T; Sugihara, H y N. Hagino (1956). Report on the so called itai-itai disease first report. *J. Jap Society Orthopedics*. 30, 100-101.
 18. Krauskopf, K.B. & Bird, D.K. (1995). Introduction to Geochemistry. MacGraw-Hill, NY, 647 pp.
 19. Kun-Soep Lee; Short, Frederick T. y David M. Burdick (2004): Development of a nutrient pollution indicator using the seagrass, *Zostera marina*, along nutrient gradients in the three New England estuaries. *Aquatic Botany*, 78, 197-216.
 20. Martín-Guirao, Lázaro; Martín Atucha, Arnaldo; Lloret Barba, Javier; Martínez López, Emma y Antonio J. García Fernández (2005). Effects of mining wastes on a seagrass ecosystem: metal accumulation and bioavailability, seagrass dynamics and associated community structure. *Marine Environmental*. 60, 317-337.
 21. Mireles Díaz, Alibech (2004). Desarrollo y optimización de técnicas de preparación de muestras y de análisis cuantitativo de elementos traza en frutas y verduras mediante PIXE. *Tesis, instituto de física, UNAM*.

22. Montgomery, R. and Price, T. (1979). Release of trace metals by sewage sludge and the subsequent uptake by members of a turtle grass mangrove ecosystem. *Environmental science and technology*. 13, 5.
23. Nicolaidou, A., and Nott, J. (1998). Metals in sediments, seagrass and gastropods near a nickel smelter in Greece: Possible interactions. *University of Athens*.
24. Nienhuis, P.H., (1986). Background levels of heavy metals in nine tropical seagrass species in Indonesia. *Delta institute for hydrobiological research, Netherlands*.
25. Noriega, E. (2001). Metales pesados en *Thalassia testudinum* en el sistema arrecifal veracruzano. *Tesis de licenciatura, UNAM*.
26. Parker, P.L., Gibas, A. and Lawler, R. (1963). Cobalt, iron and manganese in Texas bay. *Publications of the institute of marine science, University of Texas* 9, 28-32.
27. Parker, P.L., (1966). Movement of radioisotopes in the marine bay: cobalt-60, iron-59, manganese-54, zinc-65 and sodium-22. *Publications of the institute of marine science, University of Texas* 11, 102-107.
28. Prange, J. y Dennison, W. (2000). Physiological responses of five seagrass species to trace elements. *Marine pollution bulletin*.
29. Pulish, W.M., Barnes, S., and Parker, P.L. (1976). Trace metal cycle in seagrass communities.
30. Pulish, W.M. (1980). Heavy metal accumulation by selected *Halodule wrightii*. Population in the coperus Christi Bay area.
31. Ruiz, E. (2005). Presencia de fierro y de cromo en *Thalassia testudinum* en el golfo de México y el mar caribe. *Tesis de licenciatura UNAM*.
32. Salomons, W. and Forstner, U. (1984). Metals in the hydrocycle. *Springer-Verlag, Berlin*.
33. Scheiner, B.J., Doyle, F.M. & Kawatra, S.K. (Eds.). (1989). Biotechnology in Minerals and Metal processing. *Society of Mining Engineers Inc., Littleton (CO)*, 209 pp.

34. Schroeder, P.B. and Thorhaug, A. (1980). Trace metal cycling in tropical-subtropical estuaries dominated by the seagrass *Thalassia testudinum*. *Amer. Journal Bot.* 67:7, 1075-1088.
35. Sharma, Virender K; Rhudy, Kurtis B; Koenig, Robert y Felipe G. Vazquez (1999). Metals in sediments of the upper Laguna madre. *Marine pollution bulletin* 38:12, 1221-1226.
36. Solís, C; Oliver, E; Andrade, A; Ruvalcaba-Sil, J.L; Romero, I; y H. Celis (1999). PIXE analysis of Zn enzymes. *Nuclear instruments and methods physics research B: 150*, 222-225.
37. Valdespino Saenz, J. (2005). Determinación de metales pesados en *Thalassia testudinum* en dos zonas de la península de Yucatán. *Tesis de licenciatura UNAM*.
38. Van Tussendroek, Brigitta I.; Galindo Carlos A. y Judith Márquez (2000). Dormancy and foliar density regulation in *Thalassia testudinum*. *Aquatic Botany* 68, 281-295.
39. Villanueva, F.S. y A. V. Botello (1998). Metal pollution in coastal areas of Mexico. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 157, 53-94.
40. Whelan III, T., Espinoza, J., Villareal, X., Cottogoma, M. (2005). Trace metal partitioning in *Thalassia testudinum* and sediments in the lower laguna madre, Texas. *Environment internacional*.

Paginas de internet

1. http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/2/yumbalam.html?id_pub=2
2. <http://www.medicalnewstoday.com/medicalnews.php?newsid=9056>
3. http://www.sms.si.edu/irlspec/Thalas_testud.htm
4. http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_toxfaqs.html
5. <http://www.uclm.es/users/higuera/MAM/MAM7.htm>
6. <http://club.telepolis.com/geografo/clima/koppen.htm>