



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Facultad de Ciencias

Metales pesados (Fe, Cd y Cr) en pastos
marinos (*Thalassia testudinum*) de la
laguna de Yalahau, Quintana Roo:
evidencia de posible contaminación del agua
subterránea

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

ANA MARÍA MARTÍNEZ VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. MARTÍN MERINO IBARRA

MÉXICO D.F.

MARZO 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Para Alejandra y Carolina,
Antonio y María Luisa

Este trabajo se realizó con el apoyo financiero de la DGAPA a través del proyecto PAPIIT clave IN-202506

Agradezco a los miembros del Comité Tutelar,

Dr. Federico Páez Osuna

Dr. Juan Pablo Carricart Ganivet

Dr. Martín Merino Ibarra

todas sus enseñanzas, comentarios y sugerencias.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la amable y siempre eficiente ayuda y colaboración de Francisco Remolina, director del APFF Yum Balam. Gracias Paco por pensar que el proyecto valía la pena, y por creer que nosotros podíamos realizarlo con algún éxito. También ha sido fundamental la participación de Martín Merino como asesor principal de este trabajo. ¡Gracias Martín!

Agradezco a todo el personal del APFF Yum Balam, en especial a Juan Pérez, subdirector del área, Chepe, Norma y Montserrat. Muchas gracias por todo el apoyo y la amistad. También agradecemos la colaboración y el apoyo de todas las personas de la CONANP dedicadas a conservar las áreas protegidas de la Península de Yucatán, en especial a Alfredo Arellano, Jaime González, Mari Carmen, e Itamar.

Los datos de precipitación son de Francisco G Ruíz Rentería y José Edgar Escalante Mancera, SAHMUAPM (Servicio de Hidrografía y Meteorología de la Unidad Académica de Puerto Morelos) ICMYL (del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología), UNAM CARICOMP (Caribbean Coastal Marine Productivity Project)

Los análisis se realizaron en el laboratorio de Absorción Atómica de la Facultad de Química de la UNAM, por lo que reconozco en particular el trabajo de la Doctora Liliana Saldivar y de la Química María Elena Castilla Madrigal. Este trabajo se realizó con el apoyo financiero de la DGAPA a través del proyecto PAPIIT clave IN-202506.

Agradezco a los miembros del Comité Tutelar, los doctores Federico Páez Osuna, Juan Pablo Carricart Ganivet y Martín Merino Ibarra todas sus aportaciones, y a los miembros del jurado sus valiosos comentarios.

En especial, le agradezco a todos los estudiantes que participaron en la colecta y recolecta de muestras, siempre entusiastas, casi siempre impuntuales: Nicolás, Job, Zeli, Ernesto, Ulises, Berenice, Alejandra, Eric, Humberto, Christian, Francisco, Xaman, Paula, Jonathan, Mario y Laura, por su trabajo, sus ideas, sus risas, su ayuda, su solidaridad, sus constantes muestras de cariño y respeto, hacia el trabajo y hacia el grupo,

¡MUCHAS GRACIAS!

Índice

Agradecimientos

Resumen	2
Introducción	3
<i>Thalassia testudinum, el biomonitor</i>	9
<i>Laguna de Yalahau, el sitio de estudio</i>	15
Objetivos	19
Metodología	20
Resultados y Discusión	24
<i>Hidrología de la laguna</i>	24
<i>Concentración de hierro, cadmio y cromo</i>	26
<i>Dilución por crecimiento</i>	37
<i>Comparación con otros lugares para terminar el diagnóstico</i>	43
Conclusiones	46
Trabajo Futuro	49
Referencias	50
Apéndice A	55
Apéndice B	57

Resumen

La península de Yucatán es única en muchos sentidos. Uno que la distingue es la característica especial de su suelo que permite la formación de cenotes y ríos subterráneos. Esto es importante porque las aguas subterráneas recorren a la península de un lado a otro, posiblemente arrastrando diversos contaminantes. En particular la laguna de Yalahau, nuestro sitio de estudio, ha sido poco investigada, por lo que no está específicamente determinada la afluencia de ríos subterráneos; sin embargo, la hidro-geoquímica de la zona que se conoce desde hace tiempo indica que el Norte de la Península de Yucatán se encuentra dividido en seis regiones. Una de ellas, la zona de fractura Xelha-Holbox, presenta un flujo de aguas subterráneas que aparentemente alcanza a la Laguna de Yalahau en la parte situada más lejos de la boca hacia el sur. Este resultado es muy importante para nuestro análisis porque establece que en la zona existen aguas subterráneas aparentemente ligadas de manera directa con nuestro sitio de estudio, con lo cual realizar el análisis de metales pesados en esta zona es de gran utilidad para detectar la posible contaminación por metales pesados en aguas subterráneas de la región.

En este trabajo se determinó la concentración de cadmio, cromo y hierro en *Thalassia testudinum* colectada en la Laguna de Yalahau. Los dos primeros metales son tóxicos mientras que el hierro es esencial para el desarrollo de la planta. Además se realizaron muestreos en diversas épocas del año, con el fin de analizar el efecto de las lluvias, las escurrentías y la dilución por crecimiento.

Los resultados nos muestran que hay una perturbación por metales en la zona. Lo más probable es que los metales pesados provengan de la localidad cercana, pero también se acarreen a través del agua subterránea. Las implicaciones que tiene el transporte de contaminantes en las aguas subterráneas son enormes, porque implica que el problema de contaminación puede ser regional y no local. Así, un área natural protegida puede ser vulnerable a la contaminación producida por los desarrollos turísticos de la zona y esto pasar desapercibido.

Abstract

For many years, studies carried out have demonstrated high concentrations of some heavy metals in lagoon and estuarine ecosystems in Mexico. Human activities increase the availability of heavy metals, representing a potential problem since some essential trace metals can be toxic at high concentrations. In this work, *Thalassia testudinum* was selected as an indicator seagrass species for trace metal contamination in Holbox Island and the adjacent Yalahau Lagoon, located in the Caribbean Gulf of Mexico, on the coast of northern Quintana Roo. The purpose of this study is to assess the concentrations of Cd, Cr and assessed Fe in *T. testudinum*, in order to investigate the influence of human patterns. The main conclusion from this investigation is that coastal marine pollution in Holbox Island and Yalahau Lagoon is not yet a problem, but point source discharges could represent a future local crisis with respect to Cd and Cr contamination.

Introducción

En el arte y la arqueología, la idea de la restauración parece estar resuelta. Restaurar es llegar a recuperar lo que se tenía o su aspecto, la pieza original como quedó al momento de terminarse. En estos casos se reconoce el fin del trabajo, porque también el inicio está bien definido y se admite desde el principio; sin embargo, en la restauración ecológica el asunto no es tan claro. ¿Qué significa restaurar un ecosistema? De acuerdo con algunos autores, *“la restauración ecológica es una actividad intencional que busca la recuperación de un ecosistema con respecto a su salud, su integridad y su sustentabilidad”* (SER Primer, 2002). Estos tres aspectos tampoco son evidentes, por lo que para saltar el problema se simplifican las cosas diciendo que restaurar es regresar los ecosistemas a su estado *“natural”*, donde *“natural”* se refiere a la falta de influencia humana. En los tiempos que corren esto es cada vez más difícil de encontrar, por lo que para volver al estado *natural* tendríamos que de alguna manera quitar a las personas del lugar, o al menos reducir su influencia lo que tampoco se ve tan sencillo cómo hacer. Decir que se debe alcanzar un estado *“natural”* es decir poco o nada, porque incluso la definición de estado natural resulta imprecisa. A pesar de lo que parece, la situación no es siempre tan ambigua, ya que se pueden identificar problemas asociados con diversas actividades específicas como la agricultura (Dobson *et al.*, 1997) y la contaminación ambiental, en los cuales las acciones de restaurar están mejor definidas. Como ejemplo, en la figura 1 se muestra una simulación numérica que representa la relación entre la agricultura y la deforestación de una selva. Se puede observar que la selva desaparece rápidamente al tiempo que aumentan la agricultura, la degradación y la población humana. Esto es un ejemplo de una situación específica que puede resolverse, en la cual resulta más o menos sencillo identificar el problema y analizar el estado que se quiere alcanzar después de las actividades de restauración. Lo que se busca es reparar la selva. Para lograrlo, los expertos consideran que no es suficiente con sembrar los árboles adecuados, porque debe restaurarse tanto la estructura como la función del ecosistema. En este contexto, algunos autores consideran

que en realidad debemos hablar de rehabilitación y no de restauración (Allison, 2004), donde rehabilitar es la actividad humana que ayuda a la restauración natural, como se indica en el esquema de la figura 2.

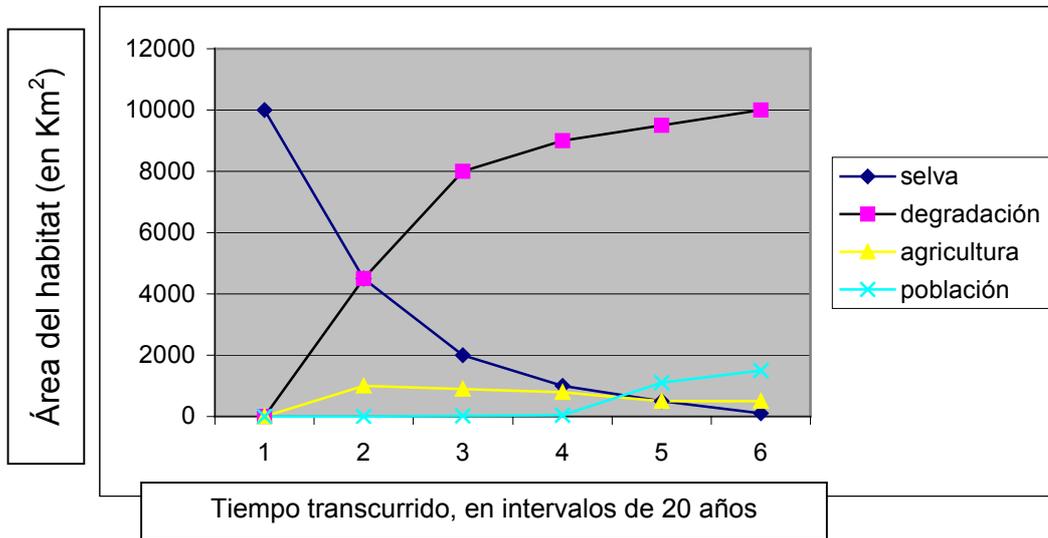


Figura 1. Simulación del estado de un habitat en presencia de actividades agrícolas.

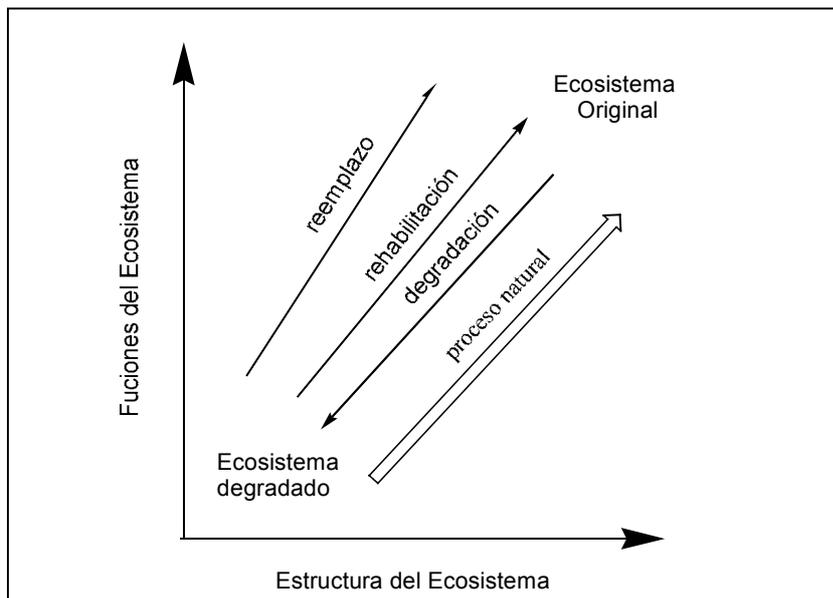


Figura 2. Esquemas de rehabilitación y restauración de un ecosistema (Allison, 2004).

Sea cual fuere el caso, restauración o rehabilitación, lo importante y en lo que hay consenso es que en realidad lo que se busca es tener ecosistemas que, en algo, estén mejor que como estaban cuando se empieza el trabajo. No

podemos pensar en la restauración para obtener sitios prístinos a partir de lugares que ahora están poblados y contaminados, pero si podemos aspirar a reducir la contaminación, controlar la sobrepoblación, manejar los residuos, cuidar los cuerpos de agua y al agua misma, no talar más bosques, sembrar árboles inclusive. Cualquiera de estas acciones se enmarca como un acto de restauración ecológica. La propuesta es hacer algo para revertir algún daño y estar mejor, esto es, llegar a restablecer las funciones del ecosistema.

En el caso de la contaminación las acciones que deben seguirse están más o menos claras porque una parte de la restauración se refiere al manejo de residuos y contaminantes. Eliminar sustancias nocivas del medio es una forma concreta de mejorar un ecosistema. Muchos de los materiales que producen contaminación ambiental son naturales porque no han sido preparados en un laboratorio. Ese es el caso de los metales pesados. Los que encontramos, ya sea como contaminantes o en una mina resguardados, son en su mayoría los que hay y ha habido desde siempre en la corteza terrestre. Salvo ciertas introducciones por meteoritos que alcanzan el planeta, los demás han estado en la Tierra constantemente. El problema de contaminación por estas sustancias surge cuando los organismos están expuestos a grandes cantidades de formas biodisponibles, porque los compuestos se acumulan y concentran en un lugar determinado, y esto ocurre en la mayoría de los casos por los usos y costumbres de la humanidad. A diferencia de otras sustancias como los insecticidas, los metales forman parte de los seres vivos y participan en procesos catalíticos dentro de la célula. Los efectos adversos de los metales dependen no sólo de su presencia, también de las especies químicas que forman y de su interacción con los organismos (Páez-Osuna *et al.*, 1996)

Dentro de este marco de referencia, las pilas y baterías se reconocen como artefactos sumamente contaminantes porque contienen metales pesados. Su uso y desecho hace que los metales se muevan y acumulen en lugares donde naturalmente no estaban, alterando el entorno. Si bien recientemente se comenzaron a manejar las pilas como residuos peligrosos, el desecho de estos materiales, llevado a cabo por años sin control, puede conducir a tener problemas de contaminación serios y con eso aumentar los riesgos en la salud de los habitantes. Se calcula que en los últimos 43 años se han liberado al

ambiente, en el territorio nacional, 635 mil toneladas de pilas, que representan 1232 toneladas de mercurio y 20,169 toneladas de cadmio (Castro y Díaz, 2004).

La mayoría de los metales que se utilizan en la fabricación de pilas y baterías son tóxicos. La toxicidad de los metales depende de varios factores, como la acidez, la salinidad y la dureza del agua, por un lado; la edad, la talla, los hábitos alimenticios y la madurez de los organismos, por el otro (Páez-Osuna *et al.*, 1996). Los dos metales pesados más tóxicos con los que se han fabricado las pilas son el cadmio y el mercurio (Castro y Díaz, 2004). Para las baterías de automóvil se emplea plomo. El cadmio se acumula en los tejidos y lesiona mecanismos de regulación de iones. Aún niveles bajos de mercurio reducen la biomasa y la diversidad de las comunidades de algas y en crustáceos sus efectos son peores que los provocados por otros metales. Los efectos crónicos del plomo incluyen deformidades, neurotoxicidad, anemia hemolítica e inhibición de la síntesis de la hemoglobina (Páez-Osuna, 1996). Los metales que contienen las pilas y baterías prevalecen en el ambiente, oxidándose y convirtiéndose en compuestos solubles que como tales, alcanzan los cuerpos de agua contaminándolos. Cuando en las zonas costeras se arrojan al mar, el deterioro de la pila o batería es más rápido, liberándose los metales tóxicos con mayor facilidad. Los metales disueltos en el agua entran a la trama trófica, y como muchas otras sustancias, su concentración se magnifica conforme se pasa de un nivel trófico al siguiente. Esto fue lo que ocurrió con el mercurio en la bahía de *Minamata* en Japón, y es lo que ha producido la enfermedad debida a la presencia de altas concentraciones de cadmio y conocida como *itai itai*, en el mismo país (Nogawa, 1981)

El cuarto metal que aparece en la lista de elementos tóxicos es el cromo. Aunque no se utiliza en la fabricación de pilas y baterías, si se emplea en la agricultura en algunos insecticidas y en la manufactura de pigmentos. Su presencia en altas concentraciones altera el metabolismo de los peces y otros organismos acuáticos (Páez-Osuna, 1996)

En México no se han presentado problemas de salud en las costas debido a la presencia de metales pesados, o no se han determinado ni registrado. Antes

de que esto ocurra, algunos grupos de investigación se han dedicado a realizar diagnósticos, midiendo la concentración de metales pesados en distintos organismos reconocidos como biomonitores, y en el sedimento de diversos lugares de las costas mexicanas (Botello *et al.*, 1996; Páez-Osuna *et al.*, 1995, 1996, 2002 y referencias ahí citadas)

Los biomonitores se definen como especies capaces de acumular contaminantes en los tejidos. Algunos ejemplos son los corales, las ostras, los mejillones, las almejas, los camarones, las algas y los pastos marinos. Con las algas y los pastos en particular se ha demostrado que la abundancia en los tejidos está controlada por la concentración en el agua (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2001; Whellan III *et al.*, 2005), lo que también parece ser un resultado con otros organismos.

Como parte de los estudios de diagnóstico se ha determinado la concentración de metales en las bandas de crecimiento de esqueletos de coral. En muestras provenientes del arrecife *El Verde* en Veracruz (México) se encontraron niveles de plomo superiores a los reportados en *St Croix* y en Florida (Horta-Puga & Ramirez-Palacios, 1996). Otro estudio con muestras de Cancún y de Majahual reveló en 2002 un aumento en la concentración de plomo como uno de los efectos de la presencia de la ciudad de Cancún (Medina-Elizalde *et al.*, 2002). Además de los corales que dan una imagen relacionada con el momento de exposición, se han analizado ampliamente los bivalvos en programas de monitoreo ambiental debido a su capacidad para concentrar metales pesados hasta niveles que son varios órdenes de magnitud más elevados que los que se encuentran en el agua. En particular las ostras son excelentes biomonitores de las costas tropicales y subtropicales (Páez-Osuna & Ruiz-Fernández, 1995). En un trabajo realizado en la laguna Urias en Mazatlán se encontró un aparente incremento en la concentración de Cd y Pb, pero la concentración en estos lugares es menor que en las costas de España y Brasil. (Frías *et al.*, 2005). En ostras de la costa del Pacífico mexicano, colectadas durante 1996, se encontraron niveles bajos de cobre y zinc, pero concentraciones elevadas de plomo (Páez-Osuna *et al.*, 2002). Por otro lado, en un estudio con camarones provenientes de la laguna de Altata- Ensenada del Pabellón en el Golfo de California se registró que para cadmio hay niveles más altos (un orden

de magnitud mayores) que lo encontrado en las costas sureñas de Sinaloa (Páez-Osuna & Ruiz-Fernández, 1995). Años después se encontraron cantidades aún mayores también en camarones (Frías-Espéricueta *et al.*, 2005), y en peces provenientes del mismo sitio se detectaron concentraciones de mercurio cercanas a los valores máximos permisibles por la norma (Ruelas-Isunza & Páez-Osuna, 2004 y 2005). Además, en sedimentos de la zona del puerto de Ensenada en Baja California se encontraron altas concentraciones de mercurio que pueden alcanzar la trama alimentaria si se disuelven en el agua. Los autores encontraron que la presencia de condiciones reductoras tiene importantes implicaciones en la especiación y biodisponibilidad de los metales pesados. (Carreón-Martínez *et al.*, 2001). En todos estos trabajos se alerta sobre los posibles peligros de contaminación por mercurio, y los riesgos de afectación a los organismos.

Todos estos estudios, y otros (Martínez *et al.*, 2006) indican un aumento gradual en la concentración de metales pesados en las costas mexicanas. Otros escritos muestran la misma situación particularmente en el Golfo de México (Vázquez, 2002; Valdespino, 2005; Ruiz, 2005; Lavoisier, 2006; Rosas, 2006). El análisis de sedimentos señala un incremento paulatino (Cedillo, 2006), y en general, lo que Villanueva y Botello registraron en 1998 es un aumento en la concentración de metales en las costas y los estuarios mexicanos, en los últimos 25 años (Villanueva & Botello, 1998). Esto nos marca la importancia de la contaminación por metales pesados, lo que justifica la realización de otros diagnósticos en zonas de interés como el que se presenta en este trabajo para el cadmio y el cromo en el Caribe Mexicano.

Thalassia testudinum, el biomonitor

Los biomonitores son organismos capaces de acumular contaminantes como el cadmio y el cromo. Dentro de los utilizados con frecuencia se encuentran los pastos marinos, porque su colecta es sencilla, están fijos al suelo lo que permite fácilmente determinar los puntos de muestreo, y suelen ser abundantes en los sitios de interés. Además se ha mostrado que capturan metales pesados

de su entorno, reflejando la concentración de estos elementos tóxicos que hay en el agua de su ambiente (Whellan III *et al.*, 2005).

Los pastos marinos son las únicas plantas con flores y frutos que viven en el mar (fanerógamas marinas). Son además el único ejemplo de vegetales que evolucionaron del mar a la tierra firme para después regresar al océano y vivir sumergidos (den Hartog, 1997). Tienen un buen sistema de anclaje por medio de las raíces y rizomas, por lo que crecen fijos al fondo y crean extensas comunidades que toman el aspecto de verdes praderas bajo el agua donde parece poder pastar cualquier herbívoro; sin embargo, estos pastos marinos también llamados *ceibadales* en la región del Caribe, no son el alimento predilecto de muchos animales debido a su constitución fibrosa. Su importancia radica en ser el *hábitat* de múltiples especies marinas de diverso tamaño y en diferentes fases de desarrollo (den Hartog, 1970). Se han registrado doce géneros de fanerógamas marinas en el mundo, con cuarenta y nueve especies distribuidas desde las regiones frías hasta el Ecuador. En México están representados seis géneros, que incluyen nueve especies de las plantas vasculares marinas del mundo (den Hartog, 1977).

Las comunidades de pastos están entre los hábitats costeros marinos más cercanos a la costa y por lo tanto, de los desarrollos sociales. En México se encuentran bien distribuidos en estuarios, marismas, lagunas costeras y en zonas someras de las plataformas continentales, generalmente en aguas de poca turbulencia. En la zona del Pacífico mexicano se encuentran cuatro especies de pastos, entre ellas *Zostera marina*, que utilizan como alimento las comunidades indígenas *seris* del Golfo de California. En las costas del Golfo de México están distribuidas siete especies, siendo probablemente la más abundante *Thalassia testudinum* que también se encuentra en el Caribe Mexicano, donde ha sido ampliamente estudiada (Gallegos *et al.*, 1992; 1993; Duarte, *et al.*, 1994; Marbá *et al.*, 1994; van Tussenbroek, 1994a; 1995).

En *T. testudinum* se identifican dos partes importantes: las hojas y los rizomas con raíces (figura 3). Los rizomas con raíces están enterrados en la arena, aproximadamente a veinte centímetros de la superficie. En general hay un rizoma horizontal del que salen rizomas verticales. En los rizomas verticales

nacen las hojas. Las hojas se observan debajo del agua en forma de praderas como se muestra en la figura 3.

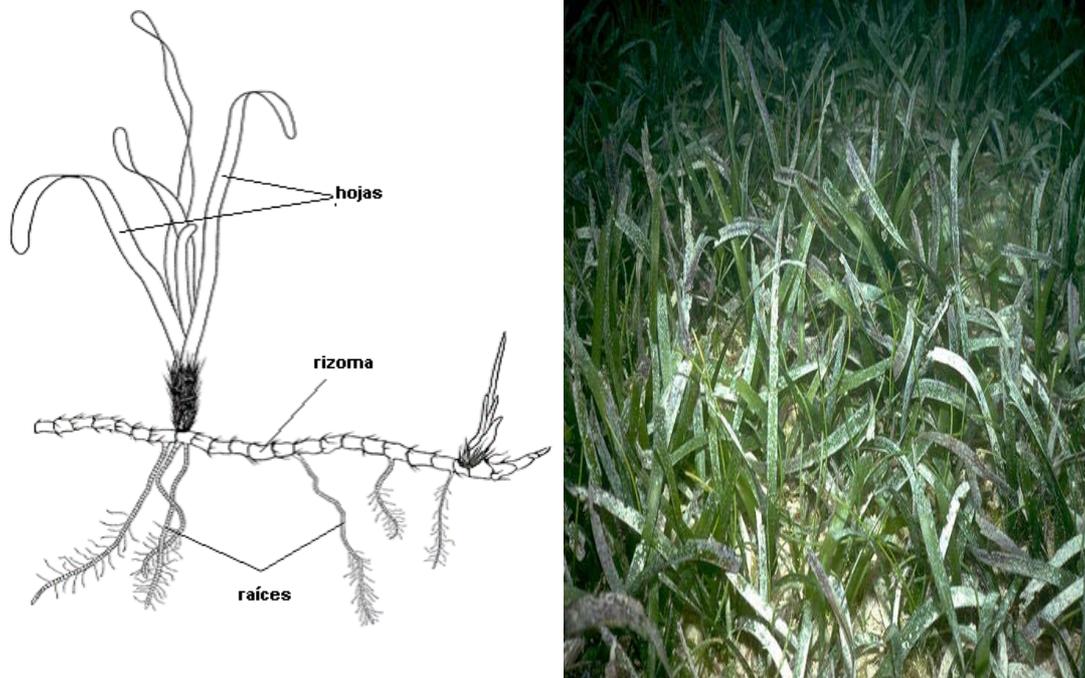


Figura 3. Secciones de *Thalassia testudinum* y fotografía de una de sus praderas.

Aparentemente las plantas crecen lentamente. Las hojas salen del rizoma vertical dejando una huella, que puede utilizarse para determinar la edad de la planta. También se pueden analizar condiciones ambientales utilizando estos rizomas, porque estas plantas responden a la cantidad de sedimento que las rodea. Si por alguna causa son enterradas, el rizoma vertical crecerá rápidamente para que la planta pueda ser iluminada por el sol, hacer la fotosíntesis y sobrevivir. Ese crecimiento acelerado se detecta en las cicatrices que dejan las hojas al nacer. La distancia entre estos nodos o huellas muestra ciclos anuales, que permiten calcular o estimar la producción anual de hojas. Con esto se ha podido determinar que la producción promedio es de 15 hojas por año por rizoma en la zona del Caribe (Marbá, *et al.*, 1994).

En general, los análisis de metales pesados en este pasto marino se hacen en cada una de las secciones de la planta por separado, porque la forma en la que adquieren los metales es distinta (Whellan, III, 2005). Además, las hojas se reemplazan con una tasa promedio de quince hojas al año (en el Caribe mexicano), mientras que las raíces y rizomas se mantienen a través de los

años. Por esta razón y en general se registra la concentración de metales pesados en raíces y rizomas por un lado, y en hojas por el otro.

Los primeros trabajos que incluyen concentraciones de metales pesados en pastos marinos se enfocaron en determinar los niveles basales de metales en diversas especies (Nienhuis, 1986). En este caso se registró el análisis de nueve especies diferentes, y se incluyó el promedio para cada tipo de pasto, como se muestra en la Tabla 1. Los autores presentaron estas concentraciones como los niveles basales de los distintos tipos de pastos marinos, y son los que en este trabajo utilizaremos como referencia de sitios no contaminados.

Tabla 1. Niveles basales de metales en pastos marinos de localidades A- templadas, B- subtropicales, C- tropicales (valores promedio en $\mu\text{g/g}$ de peso seco) (Nienhuis, 1986).

		A	B	C
Cd	hojas	0.62	0.7	0.16-0.68
	Raíces	0.3	0.5	0.12-0.25
Cu	hojas	4.8	4.9	3.90-7.00
	Raíces	3.3	4.3	2.60-6.80
Pb	hojas	1.1	Nd	1.70-2.80
	Raíces	1.0	nd	1.10-6.10
Zn	hojas	78.0	22	15-24
	Raíces	55.0	29	6-27

A pesar de que *T. testudinum* se considera que cumple con todas las características que debe tener un biomonitor (abundancia y fácil recolección, adsorción de los contaminantes en cuestión y no ser una especie en peligro de extinción), existen pocos trabajos sobre la concentración de cadmio en esta especie. Schroeder y Thorhaug (1980) encontraron concentraciones de cadmio en *T. testudinum* que se consideran altas, como las que se muestran en la Tabla 2, recolectadas en la bahía de Guayanilla en Puerto Rico. En la misma tabla se muestran valores recientes para poblaciones de Florida en Estados Unidos (Lewis, *et al.*, 2006) Como se observa, los valores son similares. Estos últimos resultados los usaremos como referencia de sitios con mayor influencia antropogénica. No se han encontrado otros trabajos reportados sobre el tema de cadmio en *T. testudinum*, por lo que utilizaremos estos dos límites de

comparación, suponiendo que uno indica una situación normal y el otro es un reflejo de zonas con mayor influencia antropogénica.

Tabla 2. Concentración de cadmio (en $\mu\text{g/g}$ de peso seco) en *Thalassia testudinum* de la Bahía Guayanilla. Los valores se consideran altos por los mismos autores (Schroeder & Thorhaug, 1980). Se registran valores de Florida, también considerados por los autores como altos (Lewis, *et al.* 2006).

Bahía de Guayanilla, Puerto Rico		
Hojas	Raíces	Rizomas
1.3	1.8	0.8
Florida, Golfo de México		
Hojas	Raíces y Rizomas	
< 1.2	< 1.3	

No hay niveles de referencia de concentración de cromo en pastos marinos. En *T. testudinum*, Montgomery y Price (1979) registraron en hojas una concentración de 4 ppm para un sitio con gran influencia antropogénica. Lewis y colaboradores (2006) encontraron en hojas de *T. testudinum* de Florida concentraciones menores a 0.2 ppm, y en hojas y rizomas una concentración de cromo entre 0.2 y 0.8 ppm. No se han encontrado más trabajos reportados sobre el tema de cromo en *T. testudinum*. Esos datos los utilizaremos como referencia de lugares con influencia antropogénica.

En estudios recientes (Whellan III *et al.*, 2005) sobre el comportamiento de los pastos marinos y su relación con la concentración de metales pesados se registraron concentraciones de diversos metales en *T. testudinum*, con la idea de analizar los posibles mecanismos de absorción de estos elementos. Para lograrlo estudiaron muestras de dos épocas del año, verano e invierno, y encontraron que los metales que son esenciales para la planta, como el manganeso, el hierro y el cobre, se presentan en mayores concentraciones durante la etapa de crecimiento de la planta (verano), mientras que aquellos que no son esenciales se encuentran más concentrados en la época de bajo crecimiento (invierno). De estos resultados se deduce que los metales esenciales se absorben activamente por la planta, por lo que la mayor actividad metabólica tiene como consecuencia un aumento en la concentración de estos

metales. Por otro lado, los que no son esenciales se absorben de manera pasiva y conforme la planta crece se presenta un efecto al que llaman “dilución por crecimiento”, que se refiere a la disminución de la concentración de metales no esenciales en épocas de crecimiento debido al desarrollo acelerado de la planta. Con esto se tiene más tejido vegetal y en proporción hay menos cantidad de metal, es decir, está “diluido” en el tejido vegetal. Estos efectos son importantes en el momento de hacer un diagnóstico con esta especie.

En la zona de estudio que contempla este trabajo se han analizado pastos marinos para determinar la cantidad de hierro (Duarte *et al.*, 1995) en *T. testudinum*, en muestras colectadas a lo largo del Golfo de México y el Mar Caribe. Estos resultados ponen en evidencia la importancia del hierro como nutrimento potencialmente limitante en el crecimiento de los pastos, además de que se encontraron diferencias en la concentración de hierro de los pastos que crecen en sedimentos carbonatados como el de la Península de Yucatán, y aquéllos que crecen en suelos de características terrígenas como el del Golfo de México, como se observa en los datos de la Tabla 3.

Tabla 3. Niveles de hierro en *Thalassia testudinum* del Mar Caribe y del Golfo de México (valores en $\mu\text{g/g}$ de peso seco) (Duarte *et al.*, 1995)

Fe en <i>Thalassia testudinum</i>	Mar Caribe	Golfo de México
Hojas	62.5-80.6	71-533
Raíces y rizomas	93-94	

Estos valores sirven de referencia para nuestros resultados, ya que también se analizará la presencia de hierro en algunas de las muestras, con el objeto de estudiar el efecto de “dilución por crecimiento”. Para el análisis de la “dilución por crecimiento” se necesita medir la concentración de un metal esencial en distintas estaciones del año, y compararla con la presencia de metales no esenciales durante las mismas épocas. Esto lo haremos determinando y comparando las concentraciones de hierro, cadmio y cromo.

Además de analizar el efecto de la dilución por crecimiento, para la concentración de hierro en la zona se cuenta con valores de referencia sobre la cantidad de hierro que está presente en los pastos de la región, con lo cual

podemos comparar nuestros resultados. Una mayor presencia de hierro puede indicar posibles lugares contaminados. En resumen, el hierro en los cuerpos de agua de la zona del Caribe es un nutriente limitante que difícilmente se presentará en concentraciones que sean tóxicas para la vida acuática en general, pero un aumento en su concentración puede indicarnos regiones con mayor influencia antropogénica. De esta forma la concentración de hierro funcionará además como un indicador de contaminación.

Laguna de Yalahau, el sitio de estudio

El sitio de estudio de este trabajo es la laguna Yalahau, situada al noreste de la Península de Yucatán (Figura 4). Es una laguna costera de grandes dimensiones, la mayor de la península, que está parcialmente aislada del océano por una franja costera conocida como la isla Holbox. Tanto la isla como la laguna se encuentran en el estado de Quintana Roo, entre los paralelos 21°12'60" y 21°13'60" latitud norte y los meridianos 87°10'80" y 87°12'90" longitud oeste, en el Golfo de México. La laguna se encuentra formalmente donde termina el Golfo de México, pero está fuertemente afectada por el Mar Caribe ya que se encuentra justo en la frontera entre ambos.

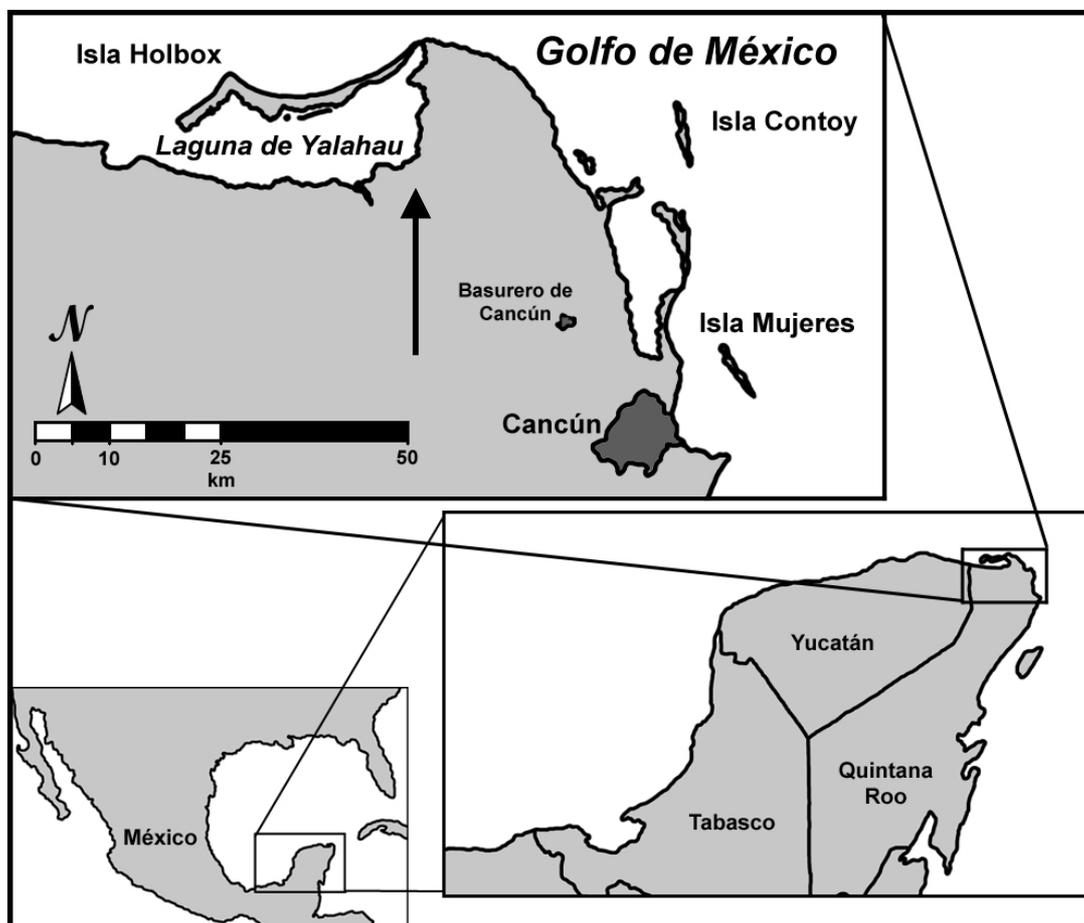


Figura 4. Localización del sitio de estudio, en la Península de Yucatán. La flecha indica la fractura Holbox-Xelha (Perry et al., 2002)

El clima es tropical, con temporada de lluvias en el verano. La temperatura media del aire en los meses más fríos es de 18°C y su intervalo de oscilación es de 5 y 7 grados (Jiménez-Sabatini *et al.*, 1998).

El lugar es un sitio de reproducción del tiburón ballena (*Rhincodon typus*) y muchas otras especies. El ecosistema adyacente es un manglar. La laguna está delimitada por la isla de Holbox, que ocupa un área de 80 km² y está situada en posición paralela a la costa. Tiene una población de 1200 habitantes (INEGI, 2000) y una infraestructura urbana limitada. Los caminos no están pavimentados y no hay vehículos motorizados (sólo bicicletas y carros de golf). Los únicos edificios existentes, aparte de las viviendas de los moradores, son pequeñas tiendas locales, el palacio municipal, una escuela, pequeños hoteles y una planta de diesel para producir electricidad. En la isla de Holbox existe un basurero a cielo abierto. Durante la época de lluvias, las escorrentías arrastran la basura y sus lixiviados hacia la zona de la laguna. El análisis de metales pesados en esta zona nos permite hacer un diagnóstico local sobre los efectos del basurero.

La laguna Yalahau y la isla Holbox forman parte del Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam. Esta zona fue declarada protegida en 1994 (CONANP, 1994) y comprende un área de 154,000 hectáreas. En la región que abarca el área natural protegida viven aproximadamente 16,000 personas, acomodadas en pequeñas localidades. Gracias a su baja densidad de población y a su leve desarrollo industrial, la zona se considera un lugar con poca influencia antropogénica.

La calidad del agua en la laguna (Tran *et al.*, 2002) indica que ésta es una zona relativamente poco afectada por la presencia humana, pero ellos no registraron datos sobre metales pesados. Con el estudio de metales pesados como el hierro, el cadmio y el cromo en este lugar se realiza esta parte del diagnóstico, de una zona de gran importancia ecológica ya que es un área natural protegida con diversas especies endémicas que se encuentran en peligro de extinción.

Debido a las características únicas del suelo en la península, se sabe que existen cenotes y diversos ríos subterráneos que la atraviesan (QRSS, 2006), arrastrando de un lado a otro diversos contaminantes. En particular la laguna

de Yalahau ha sido poco estudiada, por lo que no está específicamente determinada la afluencia de ríos subterráneos; sin embargo, la hidrogeoquímica de la zona se conoce desde hace tiempo (Perry *et al.*, 2002). En el trabajo de revisión que Perry y sus colaboradores registraron en 2002 indican que el Norte de la Península de Yucatán se encuentra dividido en seis regiones hidro-geoquímicas/fisiográficas. Una de ellas es la zona de fractura Xelha-Holbox. En este trabajo detectan aguas subterráneas a través de la relación entre la concentración de sulfatos y la de cloruros. Con trazadores de estroncio determinaron la dirección de flujo de las aguas subterráneas. Así registran que hay un flujo de aguas subterráneas a lo largo de la fractura Xelha-Holbox, que aparentemente llega a la Laguna de Yalahau en la parte situada más lejos de la boca hacia el sur, en la región más cercana del continente y más alejada de la isla Holbox. Este resultado será muy útil para nuestro análisis porque establece que en la zona existen aguas subterráneas que están aparentemente ligadas de manera directa con la laguna, con lo cual, realizar el análisis de metales pesados en esta zona es de gran utilidad para detectar la posible contaminación por metales pesados en aguas subterráneas de la región.

En este trabajo presentamos un estudio de la hidrología de la laguna. Los datos necesarios para este análisis se obtuvieron en colaboración con el grupo del Dr. Jorge Herrera del CINVESTAV-Mérida. La hidrología de la laguna es el marco ambiental básico mínimo que se requiere para cualquier estudio de contaminación en los cuerpos de agua. Así relacionamos la presencia de metales pesados en los pastos marinos con la hidrología de la región.

A partir de esta información surgen las siguientes preguntas, que le dan sentido a este trabajo: ¿cómo es la contaminación por metales pesados en un área natural protegida que tiene poca influencia antropogénica?; ¿qué tipo de influencia (local o regional) es la que se tiene en la zona?; ¿cuáles son los efectos de la presencia de la ciudad de Cancún en la región?; ¿se puede corroborar el efecto de la dilución de metales pesados por crecimiento en *Thalassia testudinum*?; y ¿qué ventajas y qué desventajas tiene utilizar este pasto marino como un biomonitor?.

Para contestar estas preguntas, y para generar información sobre la contaminación por metales pesados en la zona, en este trabajo se determinó la concentración de cadmio, cromo y hierro en muestras de *T. testudinum* recolectadas en la Laguna de Yalahau. Los dos primeros metales son tóxicos mientras que el hierro es esencial para el desarrollo de las plantas. Se realizaron muestreos en diversas épocas del año, con el fin de analizar el efecto de las lluvias, las escurrentías y la dilución por crecimiento.

A continuación se presentan los objetivos del trabajo, la metodología empleada, los resultados, la discusión y las conclusiones alcanzadas. Los resultados y la discusión están divididos en secciones, comenzando con el análisis de la hidrología de la laguna para después presentar la concentración de hierro en la zona y su comparación con otros estudios que han determinado la cantidad de hierro en *T. testudinum* de la misma zona. Con esto validamos la metodología y analizamos el comportamiento general de la concentración de silicatos y hierro en los sitios de muestreo.

Más adelante mostramos la concentración de cadmio y cromo, y sus variaciones estacionales, para continuar analizando el efecto de la dilución por crecimiento. Se termina con una comparación de la concentración de cadmio y cromo con otros datos registrados previamente para continuar con las conclusiones del trabajo. Al final se incluye un apéndice que describe los detalles de la técnica analítica empleada (absorción atómica), otro que incluye el artículo derivado de este trabajo (enviado para su publicación a la revista *Environment International*) y uno más que incluye la descripción detallada de la zona.

Objetivos

- Realizar un diagnóstico de contaminación por metales pesados en la zona marina de un área natural protegida con poca influencia antropogénica;
- Identificar y describir los principales rasgos hidrológicos de la zona, en particular la importancia relativa de las distintas fuentes de agua (lluvias y agua subterránea);
- Evaluar la contaminación por metales pesados en dos escalas: la regional, que pudiera provenir del flujo de agua subterránea; y la local, derivada de las poblaciones pequeñas situadas en el área;
- Investigar si se presenta la dilución por crecimiento en la concentración de hierro, cromo y cadmio de la zona;
- Evaluar las variables espaciales y temporales de Fe, Cd y Cr en las raíces y hojas de praderas de *T. testudinum* de la laguna Yalahau;
- Examinar las ventajas y desventajas de utilizar *T. testudinum* como un biomonitor de contaminación por metales pesados;
- Generar información sobre la contaminación por metales pesados en la zona, que pueda utilizarse para mejorar el manejo del área natural protegida Yum Balam.

Metodología

Los sitios de muestreo se indican en la tabla 4 con los detalles de su localización, señalando también el nombre común de la zona y su profundidad. En la figura 5 se muestra una foto aérea con los lugares geo- referenciados.

Se seleccionaron las praderas más abundantes en cada estación, y se recolectaron pastos en cuatro o cinco puntos, dentro de un área aproximada de 2 m². Las muestras de cada sección de la pradera, que consistieron de aproximadamente 15 individuos, se mezclaron y se analizaron juntas. No se recolectó un solo individuo de cada pradera ya que se está tomando una muestra representativa y mezclada de cada sitio. La colecta se hizo a mano. En cada lugar, tres personas recogieron muestras de diferentes puntos de la misma pradera, y todas las muestras se juntaron en una sola que representa a la estación. A partir de esa mezcla se hicieron los análisis por triplicado.

En el momento del muestreo se lavaron las hojas *in situ* raspándolas con las uñas para quitar las epifitas (Prange y Dennison, 2000; Whellan III *et al.*, 2005). La limpieza se hizo cuidadosamente para quitar por completo los sedimentos y las epifitas, ya que su presencia puede alterar notablemente los resultados. Se estima que más del 95% de las epifitas se quitaron de las hojas. Las muestras se secaron al sol, y se transportaron para su análisis al laboratorio en bolsas de plástico debidamente etiquetadas.

En el laboratorio, las muestras se terminaron de secar hasta peso constante. Se separaron las hojas de las raíces y rizomas, para hacer el tratamiento independiente. Se pesaron aproximadamente 2 gramos de hojas, y 2 gramos de raíces y rizomas. La digestión de las muestras se hizo (de acuerdo a la metodología USEPA SW 846-3050) primero con ácido nítrico concentrado y después con una disolución de peróxido de hidrógeno. Nuestro procedimiento ha sido utilizado (Whellan III *et al.*, 2005) y si garantiza la recuperación de los metales incorporados en los tejidos de la planta.

Tabla 4. Localización y nombre común de los sitios donde se realizó el muestreo del pasto marino *Thalassia testudinum*.

Sitio	Nombre	Localización	Profundidad (m)
1	Isla Pasión	N 21°30.997'- W 87°23.880'	2.5
2	Basurero	N 21°30.255'- W 87°23.525'	1.8
3	Boya Recalada	N 21°29.890'- W 87°22.208'	1.2
4	Isla Pájaros	N 21°31.044'- W 87°19.248'	1.4
5	Punta Catalán	N 21°60.427'- W 87°17.576'	0.5
6	Cetro laguna	N 21°29.291'- W 87°15.776'	1.1
7	Yalikin	N 21°26.351'- W 87°11.174'	1.2
8	Río Bomba	N 21°25.847'- W 87°13.742'	< 0.5

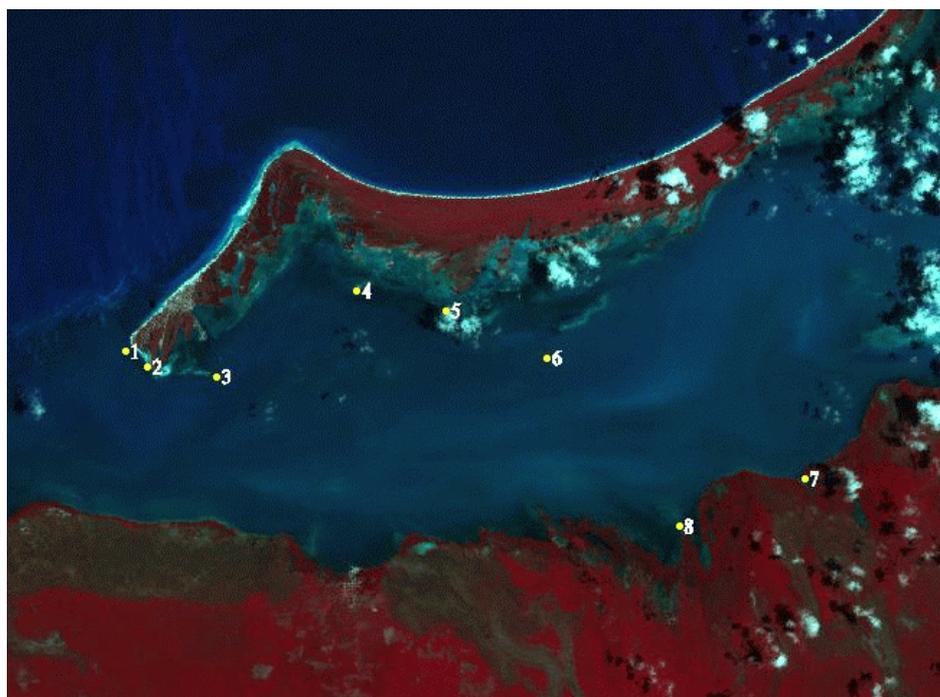


Figura 5. Foto aérea de la Isla Holbox, con los sitios de muestreo geo- referenciados.

Los análisis de absorción atómica se realizaron en el laboratorio de absorción atómica de la Facultad de Química de la UNAM. Se analizó cada muestra por triplicado. Si la desviación porcentual entre las muestras era mayor al 5%, se repetía el análisis. Para validar la metodología se utilizó una disolución de

referencia de hojas de orquídea (NIST). En la tabla 5 se reporta el porcentaje de recuperación de los metales que se analizaron para este estudio. En el apéndice se encuentran los detalles de la técnica de absorción atómica.

Tabla 5. Recuperación del material de referencia, hojas de orquídea de alta pureza. (Concentración en ppm)

Cadmio	0.95
S.D.	0.23
Valor reportado	1.25
% de recuperación	76.0
Cromo	26.0
S.D.	1.99
Valor reportado	30.0
% de recuperación	86.8
Hierro	2.8
S.D.	0.02
Valor reportado	3.0
% de recuperación	94.4

Además se analizaron muestras de agua recolectadas en los mismos sitios de muestreo. Se determinó la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) y de silicatos (SiO_4^{4-}), utilizando los métodos estándar para agua de mar (Parsons, *et al.* 1984). Estos análisis se hicieron en el laboratorio del Dr. Jorge Herrera en el CINVESTAV-Mérida.

Con el objeto de determinar las variaciones estacionales, las muestras se colectaron durante tres épocas del año: junio del 2004, enero y mayo del 2005. Las muestras de agua corresponden sólo a la época de lluvias (junio de 2004) y de secas (enero de 2005). La cantidad de lluvia mensual en la época de lluvias varía entre 100 y 320 mm, mientras que durante la época de secas es en promedio de 40 mm al mes (Ruíz & Escalante, 2004). El efecto de las condiciones ambientales en las plantas acuáticas no es inmediato, si consideramos que la vida media máxima de la hoja es de 90 días (van Tussenbroek, 1995). Esto significa que las hojas de junio comienzan a crecer dos o tres meses antes, en marzo o abril, que es la época de secas. Las hojas

de enero mientras tanto se desarrollaron en octubre o noviembre, que es la época de lluvias, a pesar de que en la gráfica se muestra que junio fue el mes de más precipitación. Para el muestreo de mayo, las hojas se formaron durante enero y febrero, que son meses caracterizados por la presencia de “nortes”. En este sentido, respecto a las hojas, las muestras de junio representan su crecimiento durante la época de sequías, mientras que las muestras recolectadas en enero incorporan el crecimiento de las hojas durante las lluvias. Las de mayo representan la época de “nortes”. Así se incorporan tres épocas características de la zona, como se puede observar en la figura 6, donde se muestra la precipitación acumulada en 2004, como un ejemplo de lo que ocurre en la región.

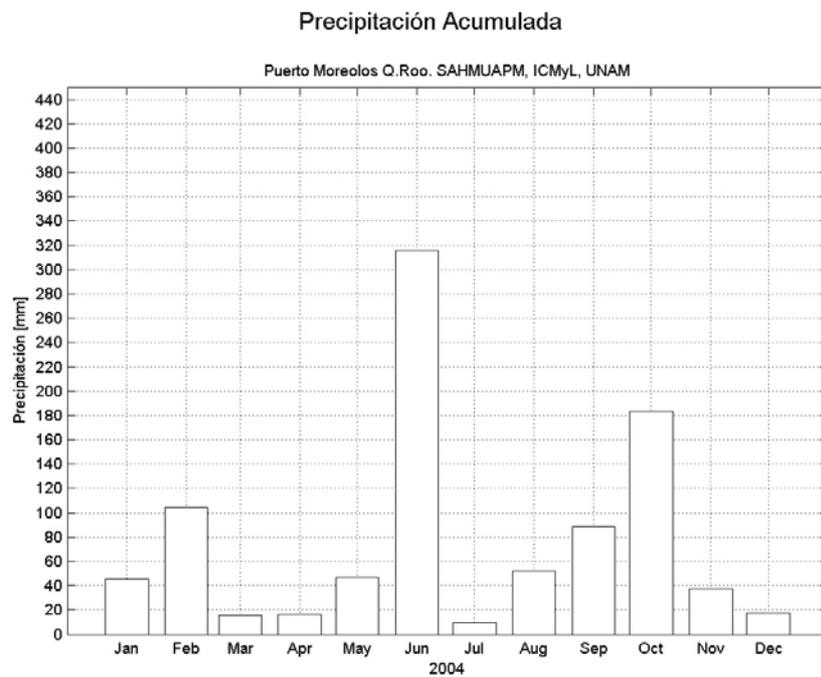


Figura 6. Lluvia acumulada en la zona durante 2004. (Ruiz & Escalante, 2004)

Resultados y Discusión

Hidrología de la Laguna

La salinidad de la región muestra una laguna que va de marina (34.6) a hipersalina (46.1). La zona de menor salinidad es la cercana a la boca de la laguna, y no se encontraron cambios estacionales. Perry *et al.* (2002) indicaron que el agua subterránea no es necesariamente menos salina que el agua de mar. Por lo mismo, los datos de salinidad no indican ni descartan la entrada de aguas subterráneas a la laguna. Lo que muestran es a Yalahau como una laguna de evaporación, cuya concentración de sales es más alta hacia el interior.

En relación a la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos, la presencia de silicatos parece indicar la entrada de agua subterránea (Smith *et al.*, 1999). En la figura 7 se muestra la concentración de silicatos encontrada en este trabajo. De acuerdo con estos resultados se observa que los sitios 5, 6 y 7 tienen alta influencia de aguas subterráneas, lo que coincide en general con lo encontrado por Perry *et al.*, (2002), quienes señalaron un afluente de aguas subterráneas hacia la laguna proveniente de la zona más interna de la península. En estas estaciones hay influencia de aguas subterráneas que provienen del continente. El agua subterránea aparentemente corre por la fractura Holbox-Helxa proveniente del sur de la península. Esto lleva a pensar que la ciudad de Cancún puede tener influencia en la zona, ya que esta ciudad representa el núcleo poblacional más grande en esa región. La escasa variación del patrón que se produce con la concentración de silicatos entre la época de lluvias y de secas indica que el aporte de aguas subterráneas a la laguna es significativamente mayor a los de la lluvia y escurrimientos superficiales.

La concentración de nitrógeno inorgánico disuelto ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$) muestra que las concentraciones más altas se encontraron en las estaciones 2 y 5 durante las secas (5 y 5.2 μM , respectivamente), y en las estaciones 2 y 7 durante las lluvias (6.5 y 6.3 μM , respectivamente). La concentración de nitrógeno inorgánico disuelto estuvo dominada por la concentración de amonio.

El amonio está relacionado con la remineralización de materia orgánica y con la presencia de aguas de descarga (Newton & Midge, 2005), por lo que la concentración registrada en la estación 2 puede indicar la entrada local de aguas residuales provenientes del basurero de Holbox, mientras que las concentraciones registradas en las estaciones 5 y 7 pueden relacionarse con procesos biogeoquímicos en la interfase agua-sedimento, dada la poca profundidad en esta zona de la laguna (< 1.5 m), o con el agua subterránea. En relación a la concentración de nitratos y a pesar de que la concentración de este nutriente no muestra una clara distribución espacial, sus valores son mayores en la época de lluvias. En otras lagunas costeras de la península, este nutriente junto con la presencia de silicatos se ha relacionado con la entrada de agua proveniente del acuífero (Herrera-Silveira, 1994; Medina & Herrera-Silveira, 2004) Los resultados que aquí mostramos sugieren que estas diferencias estacionales pueden relacionarse con un aumento en la entrada de aguas subterráneas durante la época de lluvias.

Con base en estos resultados parecería que, dada su localización, las estaciones se pueden clasificar como sigue: los sitios 1 y 2 se encuentran bajo la influencia del basurero de Holbox; las estaciones 5, 6 y 7 presentan entrada de agua subterránea, de acuerdo con lo que indica la concentración de silicatos que se muestra en la figura 7; y los sitios 3, 4 y 8 pueden considerarse como los de menor influencia antropogénica.

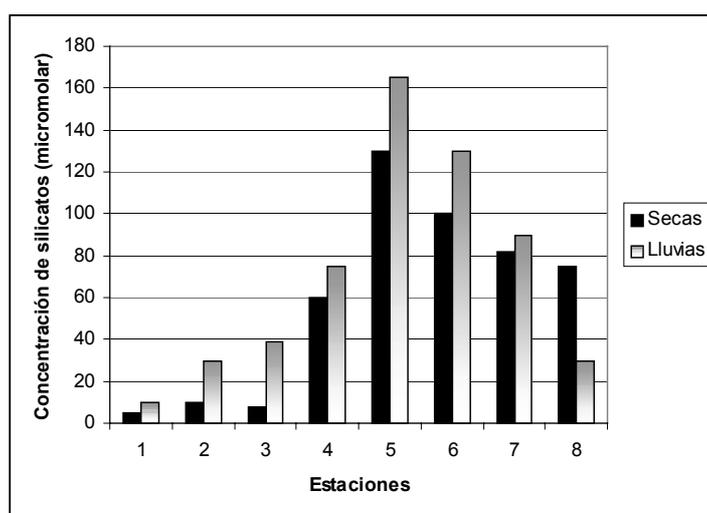


Figura 7. Concentración de silicatos en los sitios de muestreo.

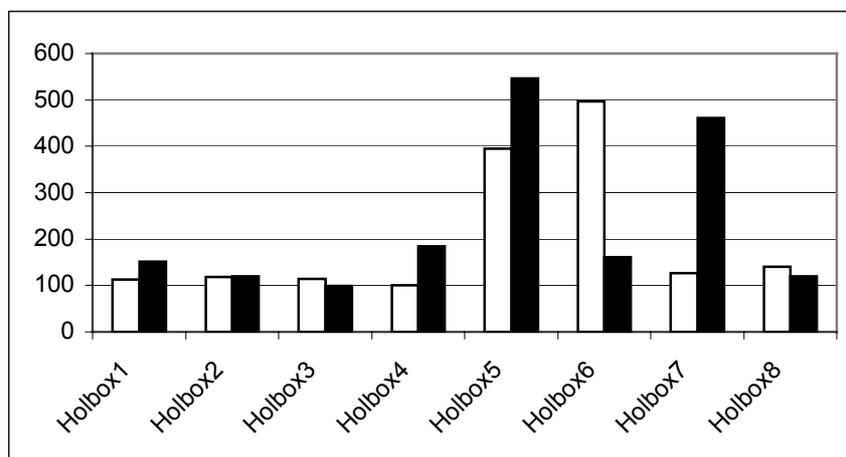
Concentración de hierro, cadmio y cromo

Comenzaremos el análisis de los resultados sobre metales pesados con el muestreo de enero de 2005, que para todos los casos consideramos que representa el efecto de la época de lluvias en las hojas de los pastos, para después comparar con las muestras que representan el efecto de la época de secas (junio, 2004) y de nortes (mayo, 2005). Los datos de enero nos dan una idea del comportamiento de la concentración de estos tres metales, como se observa en las figuras 8, 9 y 10. La figura 8 contiene los datos sobre la concentración de hierro, la figura 9 presenta la del cadmio y la figura 10 la presencia de cromo. Respecto al hierro se observa un incremento en las estaciones que consideramos tienen influencia de agua subterránea (sitios 5, 6 y 7), mientras que no se observa gran efecto de la zona de Holbox y su basurero (sitios 1 y 2). La concentración de hierro que encontramos en las muestras de los sitios 5, 6 y 7 es superior a lo reportado por otros autores para la zona del Caribe, 62 a 80 partes por millón en hojas y 94 partes por millón en raíces (Duarte *et al.*, 1995). En el Golfo de México estos mismos autores registraron 533 partes por millón. Podemos decir que algunos de nuestros valores se ubican en un punto intermedio entre estas dos zonas, pero que en general para la zona del Caribe se encuentran dentro de los mismos órdenes de magnitud, lo que de alguna manera valida nuestros resultados. Las mayores concentraciones de hierro probablemente se deben a un ingreso de este metal a la laguna a través de aguas subterráneas. La determinación de hierro nos permite por un lado validar nuestros resultados al comparar con estudios previos, y por el otro encontrar posibles lugares contaminados. Aquellos valores que son mayores nos pueden estar indicando algún tipo de alteración o de contaminación. Es de notar que la figura 8 presenta el mismo patrón de comportamiento que la concentración de silicatos (ver figura 7) lo que es consistente con la idea de influencia de zonas alejadas a través de aguas subterráneas.

Con el análisis de la concentración de hierro no se puede concluir que se presente distinta concentración de este metal en las hojas que en las raíces y rizomas, porque esto no se presenta por igual en todas las muestras. La cantidad de hierro encontrada nos permite entender cómo se comporta un metal esencial en la zona. La única conclusión que parece posible a partir de

estos datos es que hay una influencia de las aguas subterráneas sobre la concentración de hierro, al tiempo que parece haber poco efecto del basurero de Holbox.

Figura 8. **HIERRO** ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) Muestreo de enero de 2005. El color blanco es para la concentración en hojas y las barras en negro indican la concentración en raíces/rizomas.

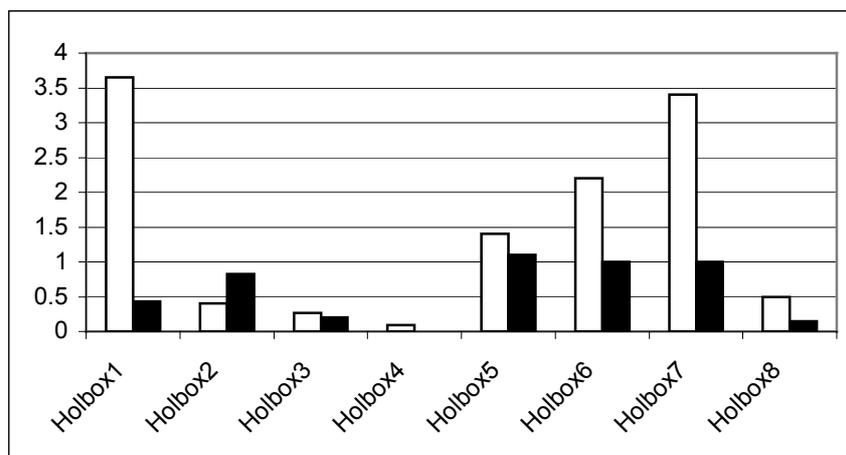


HIERRO	Holbox1	Holbox2	Holbox3	Holbox4	Holbox5	Holbox6	Holbox7	Holbox8
Hojas	113	119	114	100.5	395	497	126	140
Raíces/rizomas	152	120	98.8	185	547	161	461	120

En la figura 9 se muestran los resultados para la concentración de cadmio en la laguna. En este caso observamos que hay también influencia de las aguas subterráneas (sitios 5, 6 y 7) pero a diferencia de lo que ocurre con el hierro, con el cadmio se nota la presencia del basurero (sitios 1 y 2) porque la concentración es notablemente mayor en estos lugares, sobre todo en el sitio 1. Nuevamente el patrón de la gráfica es similar al de la concentración de silicatos, salvo que se observa la aparente influencia del basurero. En el caso del cadmio se observa en general una mayor concentración en hojas que en raíces y rizomas.

Nuestros datos sugieren que hay un acarreo de cadmio hacia la laguna en dos lugares y por dos razones. Uno es en la zona de Holbox, casi seguramente por la presencia del basurero (influencia local); y el otro sitio es la región de entrada de aguas subterráneas, que probablemente proviene de la zona de Cancún (dominio regional), dado el flujo de Sur a Norte del agua subterránea en esta zona (Perry *et al.*, 2002).

Figura 9. **CADMIO** ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) Muestreo de enero de 2005. El color blanco es para la concentración en hojas y las barras en negro indican la concentración en raíces/rizomas.

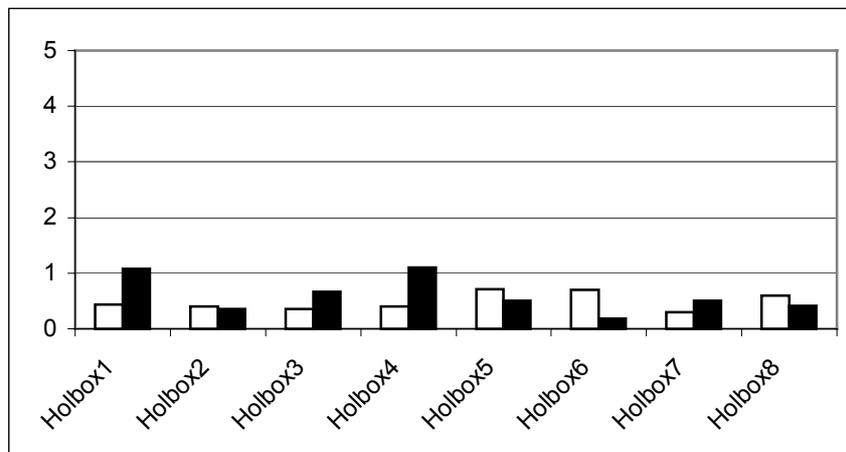


CADMIO	Holbox1	Holbox2	Holbox3	Holbox4	Holbox5	Holbox6	Holbox7	Holbox8
Hojas	3.65	0.4	0.27	0.09	1.4	2.2	3.4	0.5
Raíces/rizomas	0.43	0.83	0.2	0.001	1.1	1	1	0.15

En la figura 10 se muestran los valores de la concentración de cromo en las muestras de *T. testudinum*. Se observa que en este caso la cantidad de cromo a lo largo de la laguna permanece constante. No se detecta ni la influencia de las aguas subterráneas ni la presencia del basurero, porque las fluctuaciones que se encuentran parecen estar enmarcadas en lo que podríamos llamar la concentración normal de cromo en los tejidos de *T. testudinum*. No hay reportes sobre la concentración de cromo en pastos marinos que sirvan de referencia para interpretar nuestros datos. La cantidad de cromo en la laguna, a partir de las muestras de pastos colectadas en enero de 2005, es constante a lo largo de todos los sitios analizados, y al parecer no representa un problema de contaminación.

En el caso del cromo tampoco se encuentra una tendencia definida al comparar la presencia en hojas y en raíces y rizomas. No se puede decir que sistemáticamente hay más en hojas que en raíces y rizomas porque esto no se observa en todas las muestras.

Figura 10. CROMO ($\mu\text{g/g}$ de peso seco). Muestreo de enero de 2005. El color blanco es para la concentración en hojas y las barras en negro indican la concentración en raíces/rizomas.

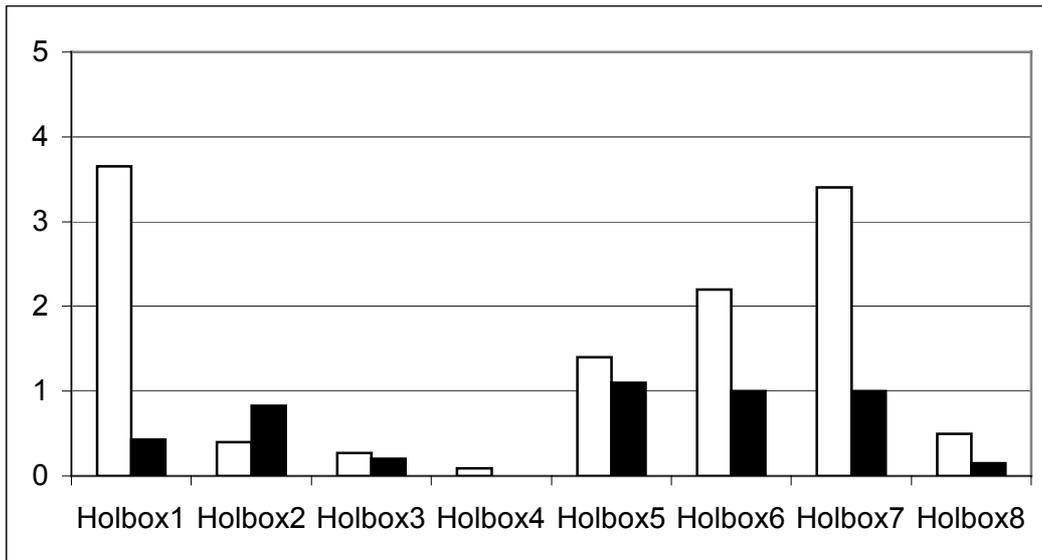


CROMO	Holbox1	Holbox2	Holbox3	Holbox4	Holbox5	Holbox6	Holbox7	Holbox8
Hojas	0.44	0.4	0.35	0.4	0.71	0.7	0.3	0.6
Raíces/rizomas	1.08	0.36	0.67	1.1	0.5	0.18	0.51	0.41

Para continuar con el análisis, observemos los resultados del muestreo realizado en mayo del 2005. Estas muestras representan la etapa de crecimiento durante la época de nortes, que también es la de mayor temperatura. En este período hay lluvias y vientos fuertes que remueven las aguas y en ocasiones la hacen más turbia. Estas condiciones son por un lado favorables para el desarrollo de los pastos marinos porque hay más resuspensión de nutrientes, pero por otro lado la turbidez evita el paso de la luz y esto puede afectar su crecimiento. Sin embargo, lo que aparentemente domina el crecimiento de los pastos es la temperatura (Gallegos *et al.*, 1992 y 1993). Para estudiar esta época sólo se analizaron los metales tóxicos; cadmio y cromo. Los resultados se muestran en las figuras 11 y 12, respectivamente.

Los resultados del cadmio apoyan la idea de la influencia del basurero (sitio 2) y de la entrada de aguas subterráneas. El patrón de ambas gráficas (la de enero y la de mayo) presenta similitudes, y coincide con el que se presenta para la concentración de silicatos. Con estos datos se observa que las estaciones 1 y 2 están probablemente afectadas por el basurero, en la 6 y 7 resulta evidente el efecto de las aguas subterráneas, y la estación 4 se corrobora como la de más baja influencia.

A)



B)

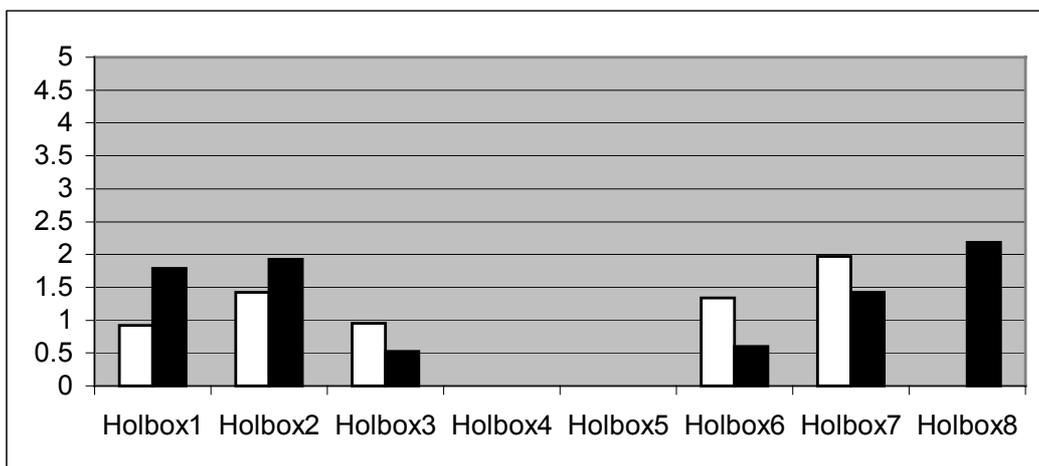


Figura 11. *CADMIO* (μg/g de peso seco). (A) Muestreo en enero de 2005
(B) Muestreo en mayo de 2005

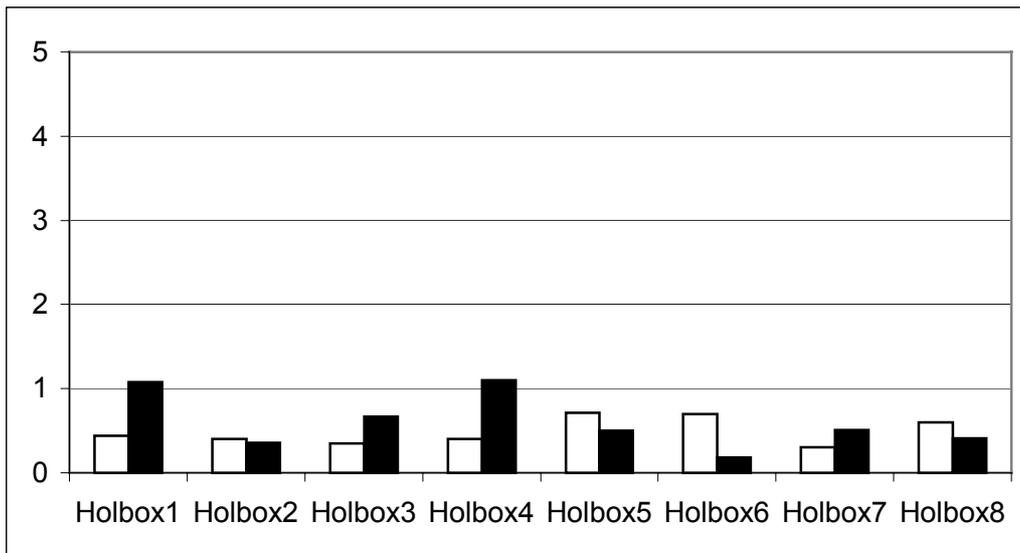
Respecto al cromo se observa que hay un incremento considerable durante el mes de mayo con respecto a los resultados de enero (ver Figura 12). Las hojas de los pastos recolectados en mayo reflejan lo que ocurrió en su época de crecimiento, que es más o menos de tres meses. De esta forma, hojas recolectadas en mayo muestran lo que ocurrió en los tres meses anteriores, que abarcan la época de nortes en la región (de octubre a marzo). No es fácil explicar el hecho de que la concentración de cromo durante el mes de mayo sea mayor que durante el mes de enero, sobre todo porque ese aumento se

presenta también en las raíces y rizomas de manera marcada. En el cromo no se observa la misma tendencia que se obtuvo para el cadmio, por lo que es necesario hacer más estudios para clarificar la situación.

El aumento en la concentración de cromo pudo deberse a un problema en el manejo de las muestras o a errores en los análisis. Para saberlo se requieren más análisis, que se espera se puedan realizar en un futuro. A pesar de tener estas tendencias inesperadas cuando se comparan los resultados de los dos muestreos, en las gráficas se observa que los valores muestran el mismo patrón que con el cadmio en las muestras de enero y que con la concentración de silicatos, por lo cual parece que hay un transporte de este metal a la laguna a través de las aguas subterráneas. Hay una mayor concentración de cromo en los lugares que tienen influencia del basurero (sitios 1 y 2) y en aquellos en los que se presenta la entrada de aguas subterráneas (sitios 5, 6 y 7). Con estos últimos resultados se puede decir que la cantidad de cromo en la laguna también representa un problema local (por el basurero) y uno regional (por las aguas subterráneas). El efecto local de contaminación por cromo está más acentuado en las hojas del pasto que en las raíces y rizomas.

Es importante señalar la relevancia de realizar más de un muestreo en cada zona. Con los resultados de la época de lluvias parecía que no había un problema de acumulación de cromo en la laguna, idea que se descarta con los resultados del segundo muestreo. Las razones por las cuales aumenta la concentración de este metal no son claras y pueden ser diversas. Podría deberse a un aumento en la concentración de cromo debido a razones locales y puntuales que no volverán a presentarse, o bien a un problema que comienza a mostrarse en el 2005. También puede ser que el cromo estuviera en la laguna pero que por alguna razón, el pasto no lo hubiera adquirido. Para concluir sobre las causas es necesario continuar con las investigaciones. Incluso sería importante realizar estudios con pastos sometidos a concentraciones conocidas de cromo para analizar la forma en que *T. testudinum* adquiere este metal, lo que se podrá hacer en un trabajo futuro.

A)



B)

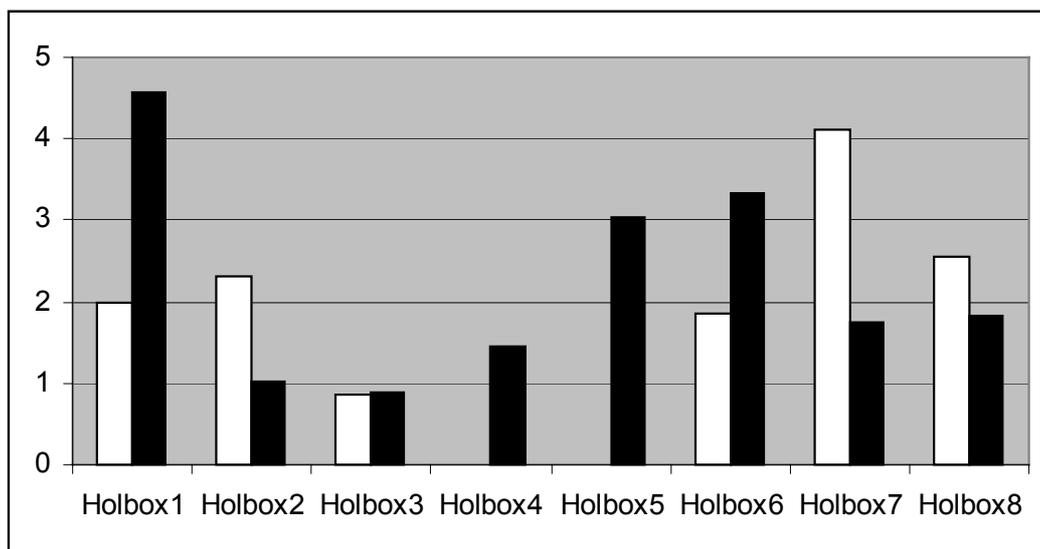


Figura 12. CROMO ($\mu\text{g/g}$ de peso seco). (A) Muestreo en enero de 2005.
(B) Colecta en mayo de 2005.

Una conclusión importante que surge de estos análisis es que no se puede hacer un diagnóstico basándose solamente en los resultados de una época. La conclusión de que hay o no contaminación por ciertos metales tiene que estar fundamentada en los resultados de más de un muestreo ya que, como se observó con el cromo, uno puede concluir que no existe contaminación en un momento dado, pero encontrar que en otra época sí se presenta una concentración apreciable y un comportamiento estacional notable. En este caso es imperiosa la necesidad de continuar con el estudio y los análisis de metales

pesados para así poder registrar los cambios y detectar situaciones de contaminación que, de encontrarse a tiempo, se pueden remediar más fácilmente. La concentración de estos metales en los pastos marinos es más útil que en el agua, pues con éstos se puede obtener información sobre periodos largos, de dos a tres meses con las hojas y de años con los raíces y rizomas.

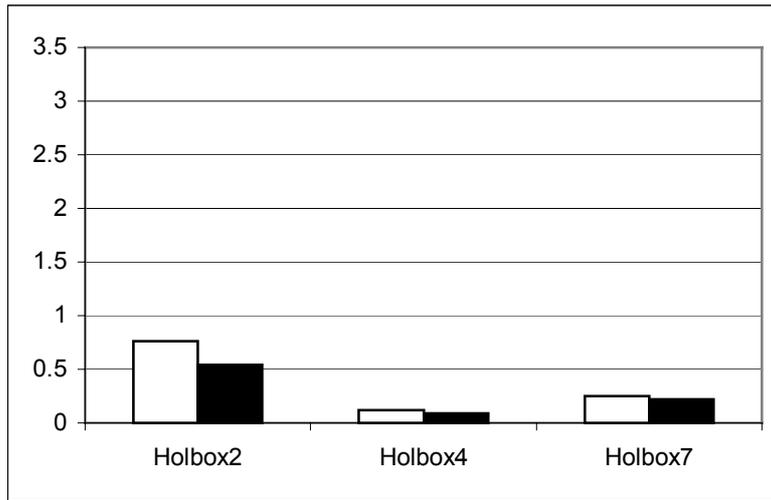
Con el fin de analizar los efectos estacionales, en las figuras 13 y 14 se incluyen las gráficas elaboradas con datos sobre las tres estaciones de muestreo más representativas: el sitio 2 con influencia del basurero, el sitio 4 con poca contribución externa a la laguna, y el sitio 7 que representa la zona con influencia de las aguas subterráneas. Se incluyen datos de las tres épocas de muestreo, tanto de cadmio como de cromo. Lo que se sugiere con estas imágenes es que las lluvias acarrean más contaminantes a la laguna y que esto se detecta en los pastos marinos. En el cromo esto no se observa en junio y enero, pero si se manifiesta claramente en mayo. Es importante mencionar que la presencia de metales en la zona depende de muchos factores, y que nuestra detección puede deberse a que en esos momentos hay más o que simplemente fue adquirido en mayor cantidad por la planta. Incluso no podemos descartar la idea de que las muestras fueran seleccionadas casualmente sin cromo, por ejemplo. Lo importante es que se detecta un cambio estacional importante en la concentración de esos metales, que tendrá que ser verificado con estudios posteriores.

Tanto con cadmio como con cromo se observa una dependencia de la concentración de metales con las épocas del año con más variabilidad en hojas que en raíces y rizomas. En este sentido parece que las hojas son mejores tejidos para ser utilizados como biomonitores, ya que integran periodos temporales más cortos. Como las hojas se cambian en un periodo de tres meses, pueden emplearse para detectar cambios en la concentración de metales en tiempos cortos, mientras que las raíces y los rizomas pueden representar cambios a lo largo de periodos más largos, ya que estos tejidos permanecen enterrados por mucho más tiempo y por lo mismo tienen mucha más historia; sin embargo, es necesario investigar la forma en que la planta

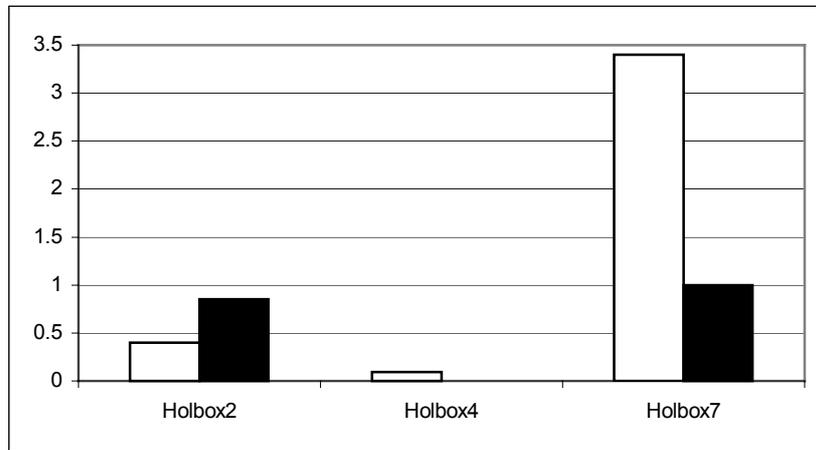
adquiere los metales, porque de acuerdo con Whellan III *et al.*, (2005), la adsorción de metales no esenciales y disueltos es pasiva y a través de las hojas, con lo cual, de corroborarse esta idea, se descarta la posibilidad de utilizar raíces y rizomas para un diagnóstico de contaminación a corto plazo por metales pesados. Además hay que investigar si los metales se distribuyen en toda la planta una vez que son absorbidos por las raíces y rizomas. Nuestros datos muestran que las raíces y los rizomas también adquieren cadmio, cromo y hierro, por lo que una primera conclusión nos diría que también se pueden utilizar como biomonitores. La edad de los rizomas se puede determinar con el análisis de las marcas dejadas por el nacimiento de las hojas (Duarte *et al.* 1994; Gallegos *et al.*, 1992 y 1993; Marbá *et al.* 1994; van Tussenbroek, 1994 y 1995), con lo cual estos tejidos se pueden utilizar para diagnósticos históricos.

Figura 13. **CADMIO** ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) en tejidos de *T. Testudinum*, colectadas en tres estaciones representativas. Barras blancas indican concentración en hojas, las negras en raíces.

junio 2004



enero 2005



mayo 2005

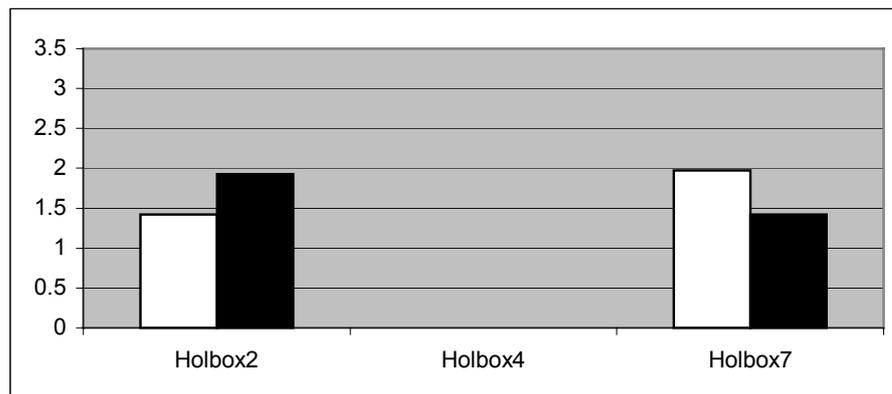
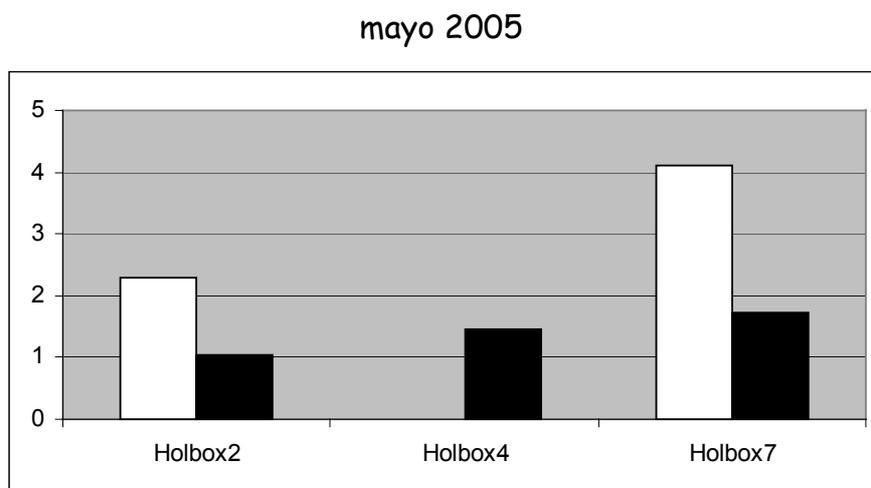
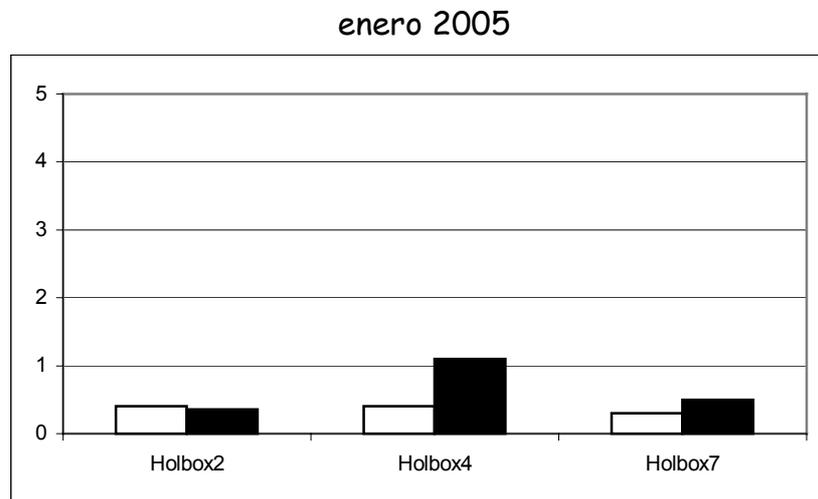
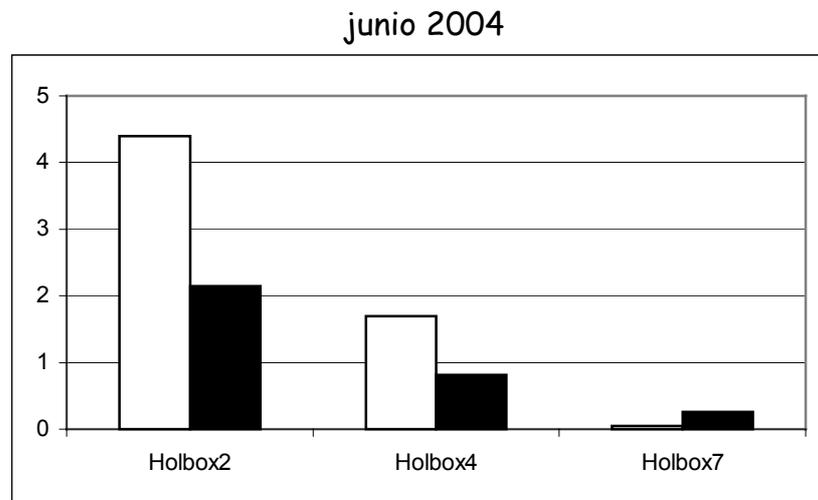


Figura 14. CROMO ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) en tejidos de *T. Testudinum*, colectadas en tres estaciones representativas. Barras blancas indican concentración en hojas, las negras en raíces.



Dilución por crecimiento

Con la idea de analizar la dilución por crecimiento en la concentración de estos metales, en las figuras 15, 16 y 17 se presentan nuevamente los resultados de la concentración de hierro, cadmio y cromo, respectivamente, en tres estaciones representativas, durante dos épocas del año (secas en junio de 2004 y lluvias en enero de 2005). Los sitios de muestreo contemplan la presencia del basurero en el sitio 2, la influencia de las aguas subterráneas en el sitio 7 y la ausencia de interferencia antropogénica en la estación 4.

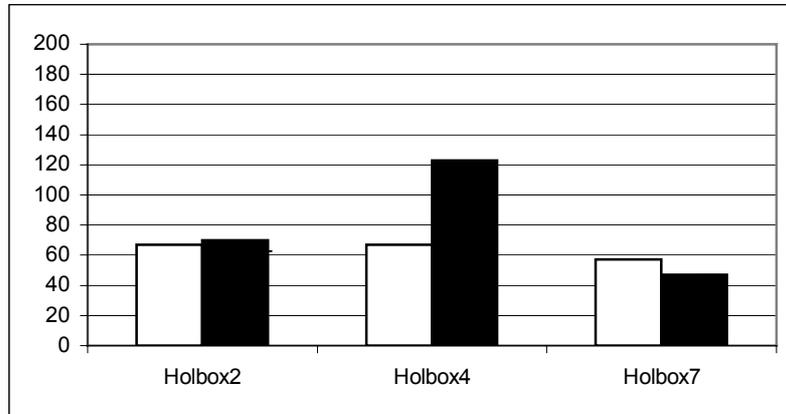
Para el hierro, en la figura 15 se observa que después de las lluvias (enero) se encontraron concentraciones mayores que antes de éstas (junio). Parece haber más escurrencias después de las lluvias, lo que provoca una mayor concentración de hierro. Aunque este efecto se puede observar en las tres estaciones de muestreo, es mucho más pronunciado en la zona de influencia de aguas subterráneas, donde la concentración es casi diez veces mayor en la época de lluvias (ver raíces y rizomas) que en la época de secas.

En el caso del cadmio, la figura 16 muestra que la concentración aumenta de manera directamente proporcional a la cantidad de lluvia en la zona durante la época de crecimiento, sobre todo en la estación de influencia de aguas subterráneas. Al igual que con el hierro, durante la época de lluvias la concentración de cadmio es mucho mayor, más de diez veces (ver hojas en el sitio 7). Como era de esperarse, si se aumentan las escurrencias porque se incrementa la cantidad de lluvia, la cantidad de cadmio que se puede encontrar en los pastos de la laguna es notablemente más grande.

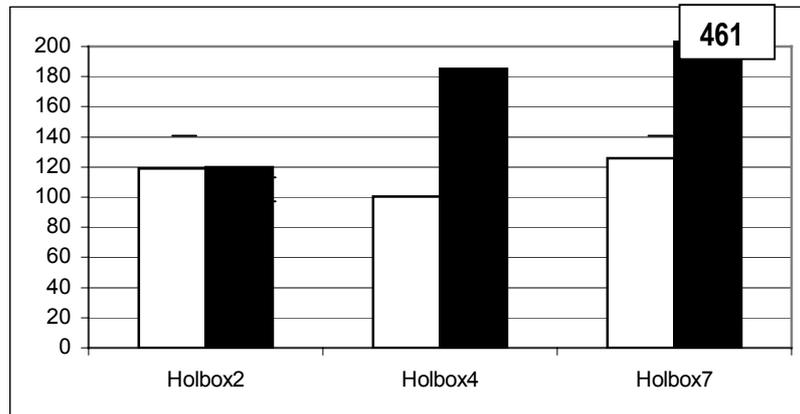
En la figura 17 se muestran las concentraciones del cromo. Se observa que en enero, después de la época de lluvias, ocurre una disminución en la cantidad de cromo de los pastos muestreados con respecto a lo que se detecta en los pastos recolectados en junio, después de la época de secas, sobre todo en la zona del basurero. A pesar de que la diferencia es notable en el sitio 2 (en hojas la concentración de cromo es diez veces más alta en junio que en enero), en los otros lugares no se observan cambios importantes.

Figura 15. **HIERRO** ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) en tres estaciones de la laguna de Yalahau; (A) Junio de 2004; (B) Enero de 2005. El color blanco es para la concentración en hojas y las barras en negro indican la concentración en raíces/rizomas.

(a) colecta en junio



(b) colecta en enero

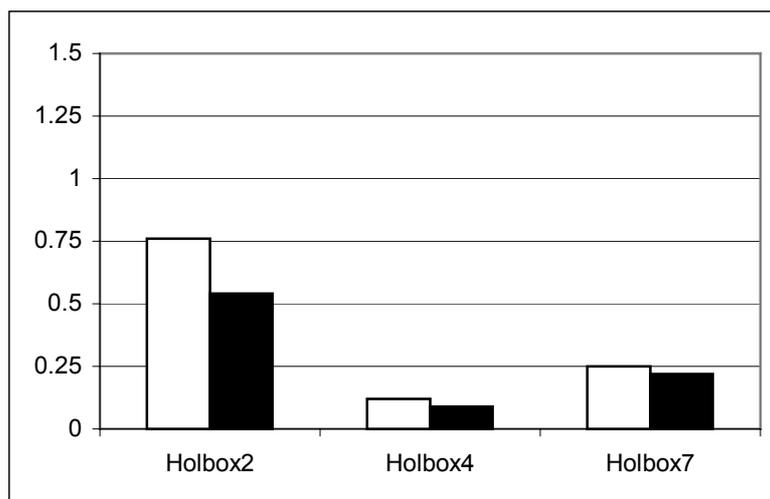


HIERRO junio	Holbox2	Holbox4	Holbox7
Hojas	67	67	57
Raíces/rizomas	70	123	47

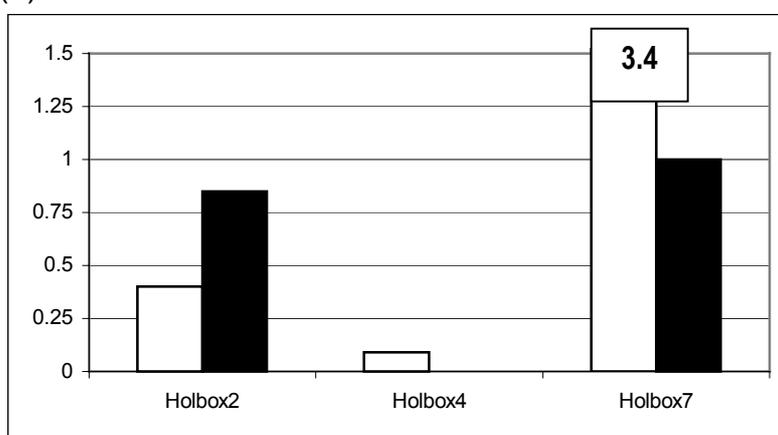
HIERRO enero	Holbox2	Holbox4	Holbox7
Hojas	119	100.5	126
Raíces/rizomas	120	185	461

Figura 16. **CADMIO** ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) en tres estaciones de la laguna de Yalahau; (A) Junio de 2004; (B) Enero de 2005. El color blanco es para la concentración en hojas y las barras en negro indican la concentración en raíces/rizomas.

(a) colecta en junio



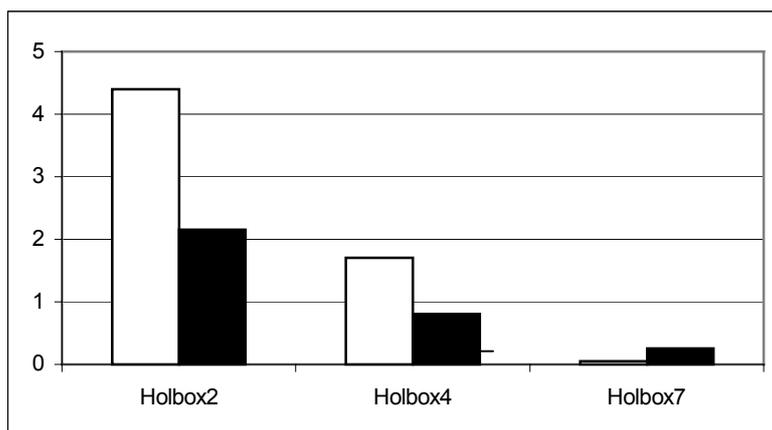
(b) colecta en enero



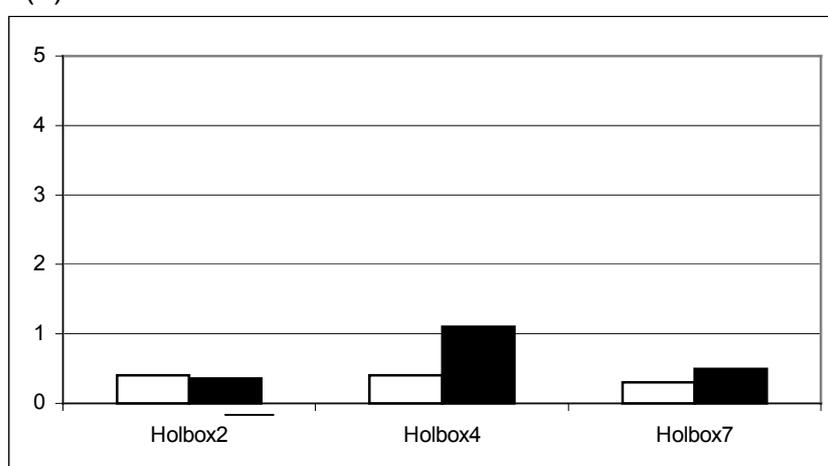
CADMIO junio	Holbox2	Holbox4	Holbox7
Hojas	0.76	0.12	0.25
Raíces/rizomas	0.54	0.09	0.22
CADMIO enero	Holbox2	Holbox4	Holbox7
Hojas	0.4	0.09	3.4
Raíces/rizomas	0.85	nd	1

Figura 17. **CROMO** ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) en tres estaciones de la laguna de Yalahau; (A) Junio de 2004; (B) Enero de 2005. El color blanco es para la concentración en hojas y las barras en negro indican la concentración en raíces/rizomas.

(a) colecta en junio



(b) colecta en enero



<i>CROMO</i> junio	Holbox2	Holbox4	Holbox7
Hojas	4.4	1.7	0.05
Raíces/rizomas	2.15	0.81	0.26
<i>CROMO</i> enero	Holbox2	Holbox4	Holbox7
Hojas	0.4	0.4	0.3
Raíces/rizomas	0.36	1.1	0.51

Con respecto a la presencia de cromo en la zona y a los cambios estacionales asociados con la concentración de este metal, con estos resultados sólo se puede decir que parece haber un efecto puntual en el sitio 2 en el muestreo que realizamos en junio, pero es necesario continuar con el estudio para tener más datos que ayuden a alcanzar una conclusión más contundente.

La comparación entre la cantidad de hierro y la concentración de cadmio y cromo que hay en la laguna en estas dos estaciones nos permite analizar si se presenta la dilución por crecimiento. De acuerdo con esta idea, la concentración de metales que son esenciales (como el hierro) para la planta aumenta durante las épocas de crecimiento (lluvias en este caso) y disminuye en las estaciones de bajo crecimiento (época de secas), porque el metabolismo de la planta requiere de la presencia de estos elementos esenciales. La absorción de los metales que son esenciales es activa. Al aumentar el metabolismo, se incrementa la cantidad de hierro en la planta porque lo requiere para cubrir sus necesidades de crecimiento. Con los metales que no son esenciales esto no ocurre, porque la adquisición es pasiva a través de una absorción por contacto (Whellan III *et al.*, 2005). Lo que esto provoca es la dilución por crecimiento. La planta crece más y por lo tanto la cantidad de tejido vegetal también es mayor. Si la concentración de cadmio y cromo en la zona no cambia, ésta se verá aparentemente diluida en *T. testudinum* debido a que hay más tejido vegetal. En estas circunstancias se supone que la cantidad de cadmio y cromo en la zona es constante y también lo es en la planta. Simplemente es un efecto de dilución por la presencia de más tejido vegetal, lo que provoca que aparentemente haya menos metales tóxicos. Con los metales esenciales esto no ocurre, porque mientras mayor es el crecimiento de la planta, más grande es la cantidad de metal que se necesita. Aumenta el tejido vegetal pero también el requerimiento de nutrientes y por lo tanto la cantidad de los elementos esenciales. Esto solamente se puede ver en las hojas que son las que cambian constantemente. El registro en las raíces y rizomas reflejan lo que sucede en periodos más prolongados.

Con este análisis, si la dilución por crecimiento ocurre lo que se espera es que la concentración de metales esenciales aumente mientras disminuye la concentración de metales no esenciales. Esto no es lo que se observa en los

datos de las figuras 15, 16 y 17, donde la concentración de hierro y cadmio presentan las mismas tendencias, mientras que el cromo aparentemente no muestra ninguna, como si no se viera afectado por la ocurrencia de lluvias. Solamente los datos del sitio 2 muestran mayor concentración en época de secas que de lluvias, sobre todo en hojas, pero eso puede deberse a una mayor concentración puntual en la zona, o quizás en efecto hay una dilución por el crecimiento de la planta. Para corroborar estas ideas son necesarias más investigaciones enfocadas en detectar este efecto, o bien repensar el modelo que describa mejor la adquisición de metales esenciales y tóxicos en la *T. testudinum*.

Cabe recordar que la idea de la dilución por crecimiento se basa en que la concentración de los metales no esenciales en la zona permanece más o menos constante, lo que en general no sucede. En la mayoría de los estuarios y lagunas costeras hay una variación estacional en la concentración de metales, incluidos el Fe y el Cd, como ocurre en la Laguna de Términos (Paez *et al.*, 1987; Osuna-López, *et al.*, 1989). Cuando esta condición está ausente, no es claro que se pueda decir que ocurre la dilución por crecimiento. Las plantas pueden crecer más porque hay más hierro, pero también absorber más cadmio y cromo porque la cantidad de este metal en el entorno además es mayor. Esto nos sugiere dos cosas: que la cantidad de cadmio y cromo en la zona no es constante; y que la idea de la dilución por crecimiento bajo estas condiciones no es siempre veraz, por lo que es necesario hacer experimentos para verificarla y comprobarla.

Comparación con otros lugares para terminar el diagnóstico

En la tabla 6 se resumen los valores previos reportados sobre la concentración de los tres metales de interés en este trabajo en *T. testudinum*. No se encontraron más informes sobre estos metales en esta especie de pasto marino.

Tabla 6. Niveles de metales en pastos marinos reportados para distintas localidades ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) .

		Laguna Bojorquez (Botello y Villanueva 1983)	Puerto Morelos (Botello y Villanueva 1983)	Puerto Morelos (Duarte, <i>et al.</i> 1995)
Fe	hojas	12.5-57.3	51.7	62.5-80.6
	raíces	77.8-43.2	129.1	no reportado
		Golfo de México (Duarte, <i>et al.</i> 1995)	Laguna Madre (verano) (Whellan, <i>et al.</i> 2004)	Laguna Madre (invierno) (Whellan, <i>et al.</i> 2004)
Fe	hojas	71-533	287-77	169-49
	raíces	no reportado	418-84	113-38
		Niveles de referencia en pastos de clima tropical (Nienhuis <i>et al.</i> , 1986)	<i>Thalassia testudinum</i> en Bahía de Guayanilla, Puerto Rico (Schroeder y Thorhaug, 1980)	<i>Thalassia testudinum</i> en Florida, Golfo de México (Lewis <i>et al.</i> , 2006)
Cd	hojas	0.16-0.68	1.3	<1.2
	raíces	0.12-0.25	0.8-1.8	<1.3
			<i>Thalassia testudinum</i> en Río Newport (Montgomery y Price, 1979)	<i>Thalassia testudinum</i> en Florida, Golfo de México (Lewis <i>et al.</i> , 2006)
Cr	hojas	no reportado	4.0	< 0.2
	raíces	no reportado	no reportado	< 0.8

Como se señaló anteriormente en este trabajo, la concentración de hierro en *Thalassia testudinum* de la Laguna de Yalahau es similar a la encontrada previamente para pastos del caribe mexicano (Duarte *et al.*, 1995). Algunos sitios de muestreo mostraron una concentración superior a la registrada anteriormente para esta misma zona. Estos resultados sugieren contaminación, y en algunos lugares indican un ingreso de este metal a través de aguas subterráneas como ya se discutió con oportunidad. Si bien la concentración de

hierro encontrada en algunos sitios no representa un grave problema de contaminación a pesar de que es alta con respecto a los niveles de referencia, sí indica un mayor ingreso de este metal a la laguna.

La concentración de cadmio se compara con la encontrada en otros estudios, y se observa que es mayor que los niveles de referencia en los sitios de influencia del basurero (sitios 1 y 2) y en los que representan la entrada de aguas subterráneas (5, 6 y 7). En estos mismos lugares, la concentración de cadmio es mayor que la registrada en zonas contaminadas (ver tabla 2), y en algunos puntos es casi tres veces más alta.

Los valores de la concentración de cadmio en la época de lluvias están por encima de los valores de referencia, y en los sitios 2 y 7 son mayores que los reportados para sitios contaminados. Esto indica que en época de lluvias la contaminación por cadmio en la laguna es más alta que en época de secas, y en ambas estaciones es mayor que la encontrada en otros lugares que se registran como contaminados. Con estos resultados podemos sugerir que hay un problema de propagación de cadmio en la zona que se tendrá que abordar en dos escalas para poderlo resolver: la local actuando sobre el basurero de Holbox, y la regional controlando lo que se acarrea con la llegada de las aguas subterráneas, posiblemente desde la ciudad de Cancún. Es importante recordar que el cadmio es uno de los metales pesados más tóxicos que se utiliza en la fabricación de pilas y baterías, por lo que probablemente estos artefactos sean la fuente principal de este metal en la laguna. Debido a su alta toxicidad, es fundamental señalar la necesidad de establecer un manejo adecuado para el desecho de pilas y baterías en la zona.

Respecto al cromo, comparando con los niveles de lugares contaminados, se observa que en la laguna está en muy baja concentración en el mes de enero de 2005. En este punto consideramos que la concentración de cromo encontrada en la laguna en esta época podría representar los niveles de referencia para este metal en esta especie de pasto marino, pero para confirmarlo se tendrían que realizar estudios con concentraciones conocidas y controladas de cromo en el agua donde estuvieran creciendo las plantas. Aunque resulta interesante la idea de determinar las concentraciones de referencia de cromo, esto no está contemplado en los objetivos de este trabajo

y por lo pronto concluimos que la concentración de cromo en la época de lluvias no representa un problema de contaminación.

Con el análisis del muestreo en época de secas (junio) y de nortes (mayo) se observa que la concentración de cromo es mayor que la registrada anteriormente para sitios contaminados (> 4 ppm) en las hojas de algunos sitios de muestreo, el 2 y el 7, que son precisamente los que se encuentran cercanos al basurero y a la entrada de aguas subterráneas. Estos resultados indican que hay una perturbación en la zona por la presencia de cromo, que tendrá que analizarse mediante la continuación del diagnóstico. Asimismo, el patrón de concentración de cromo respalda la idea de las dos posibles fuentes de ingreso de metales en la laguna, que ya se identificaron a través de la concentración de cadmio y hierro: las escurrentías del basurero y la entrada de aguas subterráneas.

A lo largo de este estudio hemos podido observar la respuesta de las hojas a la presencia de metales pesados en la zona. Podemos decir que para hacer diagnósticos en tiempos cortos y analizar la situación y los cambios estacionales a lo largo de un año, es mejor utilizar las hojas que las raíces y los rizomas. Esto es debido a que las hojas se cambian cada tres meses, con lo cual se pueden detectar modificaciones en el ambiente a lo largo del año. Por otro lado, en las raíces y los rizomas es menos claro lo que ocurre a corto plazo, pero es evidente que estos tejidos tienen más historia, por lo que se pueden utilizar para hacer diagnósticos históricos. Este tipo de trabajo lo tenemos contemplado para realizarlo en un futuro cercano.

Conclusiones

Los problemas de contaminación pueden ser impredecibles, porque no siempre los contaminantes se quedan en el lugar donde se producen o se desechan. En este estudio se realizó un diagnóstico sobre la contaminación de metales pesados en un área natural protegida con poca influencia antropogénica. Lo que se encontró es que hay metales pesados en la zona, en concentraciones por arriba de lo esperado para un área natural protegida con poca influencia industrial y antropogénica. Encontramos que hay un influjo local debido al basurero de Holbox, y otro regional probablemente asociado al agua subterránea que llega a la laguna. Particularmente en la zona de la península de Yucatán se sabe que hay ríos subterráneos que pueden acarrear contaminantes de un lado a otro, lo que parece ser el caso en la laguna de Yalahau a donde llegan los contaminantes a través de aguas subterráneas provenientes del interior de la península, presumiblemente de la ciudad de Cancún.

En este trabajo no se encontró el efecto de la dilución por crecimiento cuando se analizó la concentración de hierro, cadmio y cromo en los pastos marinos. Para demostrar este efecto es necesario hacer experimentos controlados, con concentraciones conocidas de metales pesados en el agua donde crezcan los pastos. De esta forma se controlarían las variables que en nuestro caso fueron imposibles de vigilar. La idea de la dilución por crecimiento se basa en que la concentración de metales en el agua es más o menos constante, lo que parece no ocurrir en nuestro caso. De nuestros resultados sugerimos que parece haber mayor concentración de metales pesados en la época de lluvias y nortes porque es más el acarreo de metales hacia la laguna como producto de las escurrentías. No observamos una disminución en la concentración de metales no esenciales durante la época de crecimiento del pasto, ni una relación inversa entre la concentración de metales esenciales que tiene la planta y la concentración de metales no esenciales que presenta en la misma época. Por lo tanto no podemos corroborar el efecto de la dilución por crecimiento con nuestro estudio, lo que por otro lado nos permite utilizar a

Thalassia testudinum como biomonitor, ya que responde directamente a la concentración de metales pesados.

Utilizar a *T. testudinum* como biomonitor presenta importantes ventajas. Como es una planta que está fija al suelo es de fácil colecta, además de que se pueden determinar fácilmente los lugares de donde provienen las muestras y con eso la localización de los lugares contaminados es inmediata. Sus hojas se cambian cada tres meses, por lo que es posible utilizarlas para analizar los cambios en la concentración de metales pesados a corto plazo a lo largo de un año. Así se detectan problemas de contaminación relacionados con las estaciones del año, con lo cual será posible hacer diagnósticos a tiempo y tomar acciones de remediación más fácilmente. Las raíces y rizomas se pueden utilizar para hacer diagnósticos históricos, ya que permanecen en el ambiente por mucho más tiempo. Tanto las hojas como las raíces y rizomas de *T. testudinum* son tejidos sensibles a cambios en las concentraciones de metales pesados, lo que hace a esta planta un buen biomonitor para diagnosticar problemas de contaminación provocados por estos elementos.

En este trabajo generamos información inicial sobre la situación de la contaminación por metales pesados en la zona, que puede ayudar a mejorar el manejo del área natural protegida Yum Balam. Los resultados muestran que hay una perturbación por metales en la zona, que si bien no es grave puede convertirse en un problema. Lo más probable es que los metales pesados provengan de las pilas y baterías que se desechan en la zona de Holbox y de aquellas que se tiran en alguna zona cercana, de donde se acarrearán a través del agua subterránea. Las implicaciones que tiene el hecho de transportar contaminantes en las aguas subterráneas son enormes, porque implica que el problema de contaminación puede ser regional y no local. Así, un área natural protegida puede ser vulnerable a la contaminación producida por los desarrollos turísticos de la zona y esto pasar desapercibido, con lo cual no importan los planes de manejo de la reserva porque finalmente las sustancias tóxicas llegan a la zona desde otro sitio que es donde se producen y donde posiblemente tienen un mal manejo. El problema de las pilas es grave, pero de resolución relativamente sencilla. Decíamos al principio que estos artefactos se han tirado en los basureros durante muchos años sin ningún control, lo que ha

provocado problemas de contaminación como el que se detalla en este trabajo. El reto ahora es desecharlos de manera distinta.

La contaminación por metales pesados que proviene de las pilas y baterías es uno de esos casos en los que la restauración ecológica es clara y está bien definida, porque consiste simplemente en establecer planes de manejo de estos cachivaches. Basta con no tirarlas en los basureros para comenzar a resolver el problema. En este caso las acciones necesarias para remediar la situación son claras y no tan costosas, y dependen en mucho de la voluntad de la población.

Aquí restaurar significa simplemente no arrojar las pilas y baterías sin control en los basureros y tiraderos. Restaurar es llegar a recuperar lo que se tenía, que en este caso es un ambiente libre de metales pesados que son tóxicos para casi todos los seres vivos. Al igual que en el arte y la arqueología la restauración está bien definida, en cuestión de pilas y baterías desechadas al ambiente se reconoce la situación final que se quiere alcanzar. Aquí si, como en el arte y la arqueología, la idea de la restauración está bien resuelta.

Trabajo futuro

En cuestiones de monitoreos y diagnósticos el trabajo no tiene fin. No se puede decidir que una situación está controlada o que una región no tiene problemas de contaminación, y dejar por esto de recopilar datos asumiendo que las condiciones son estables y que no van a cambiar. En este sentido, es importante continuar con la toma de muestras y el análisis de metales en la misma zona, para detectar a tiempo cualquier problema que pudiera presentarse. Esta es una actividad que seguimos realizando. Hemos recolectado muestras durante los meses de julio y octubre de 2006, y enero de 2007, cuyos resultados estamos todavía analizando. Además, es substancial verificar la significancia estadística de nuestros resultados, cuantificando las concentraciones de metales pesados en muestras independientes de cada sitio de muestreo.

La dilución por crecimiento es un modelo que puede explicar la adquisición de metales por *T. testudinum*. Es importante verificarlo o bien, generar un nuevo modelo que explique la forma en que las plantas obtienen los metales, basado en la realización de experimentos controlados.

La evidencia preliminar de la posible contaminación "a distancia" debida a las aguas subterránea amerita continuar con un estudio sobre marcadores. Con esto se podrá determinar sin duda la dirección y procedencia de las aguas subterráneas, y así tratar de controlar los efectos regionales. El meollo del asunto en este tema es la contaminación difusa, peligrosa por borrosa, porque va por debajo, porque traiciona al ser inesperada, y porque se esconde entre las tierras para surgir en lugares lejanos, llevando a su paso todo lo que se encuentra, incluyendo los contaminantes. Este aspecto pensamos que es trascendental porque remarca lo que ya sabíamos, que el problema de contaminación no puede verse como algo local. Las áreas naturales protegidas están expuestas a lo que ocurre en sus comunidades principalmente, pero también a lo que sucede en áreas alejadas. No olvidemos que lo que se contamina en un lugar puede terminar en otro muy distante, como ocurrió con los insecticidas que terminaron en los pingüinos de la Antártida.

Referencias

- Allison, Stuart K. (2004) ***What do we mean when we talk about ecological restoration?*** *Ecological Restoration*, 22, 281-286.
- Botello, A. V.; Rojas-Galaviz, J.L.; Benítez, J.A.; Zárate Lomelí, D. (Eds) (1996) ***Golfo de México. Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias.*** EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche. Serie Científica, 5, 666 páginas.
- Carreón-Martínez, Lucía B.; Huerta-Díaz, Miguel Angel; Nava-López, Carmen; Sequeiros-Valencia, Arturo. (2001) ***Mercury and Silver Concentrations in Sediments from the Port of Ensenada, Baja California, México.*** *Marine Pollution Bulletin*, 42, 415-418.
- Castro Díaz, José; Díaz Arias, María Luz. (2004) ***Las contaminación por pilas y baterías en México.*** *Gaceta Ecológica*, 72, 53-74.
- Cedillo Rangel, José Ulises. (2006) ***"Metales pesados en Eichhornia crassipes de Chachalacas, Veracruz y Melaque, Jalisco"*** Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM.
- den Hartog, C. (1970) ***The seagrasses of the world*** North Holland Publ. Co., Amsterdam, 275 pp.
- den Hartog, C. (1977) ***Structure, function and classification in seagrass communities.*** En C.P. McRoy y C. Helfferich (eds). *Seagrass ecosystems, a scientific perspective*, Marcel Dekker, New York: 89-121.
- Dobson, Andy P.; Bradshaw, A.D.; Baker, J.M. (1997) ***Hopes for the Future: Restoration Ecology and Conservation Biology.*** *Science*, 277, 515-521.
- Duarte, C.; Marbá, N.; Agawin, N.; Cebrián, J.; Enríquez, S.; Fortes, Miguel D.; Gallegos, M.E.; Merino, M.; Olesen, B.; Sand-Jensen, K.; Uri, J.; Vermaat, J. (1994) ***Reconstruction of seagrass dynamics: age determinations and associated tools for the seagrass ecologist.*** *Marine Ecology Progress Series (REVIEW)*. 107, 195-209.
- Duarte, C.; Merino, M.; Gallegos, M. (1995) ***Evidence of iron deficiency in seagrasses growing above carbonate sediments.*** *Limnology Oceanography*, 40, 1153-1158.
- Herrera-Silveira, J.A. (1994) ***Spatial and temporal patterns in a tropical coastal lagoon with groundwater discharges.*** *Journal of Coastal Research*, 10, 3, 738-746.
- Horta-Puga, Guillermo; Ramírez-Palacios, Rubén. (1996) ***Niveles de plomo en esqueletos del coral arrecifal Montastrea annularis.*** Páginas 363-367 publicado en A. V.Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benítez, D. Zárate-Lomeli (Editores). *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias.* Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica 5, 666 páginas.
- Jiménez-Sabatini, Y.; Aguilar-Salazar, F.; Martínez-Aguilar, J.; Figueroa-Paz, R.; Aguilar-Cardozo, C. (1998) ***A fishing vision on Yalahau Lagoon in***

- Holbox area, Quintana Roo state, Mexico.** In *Publication of Federación Regional de Sociedades Cooperativas de la Industria Pesquera del Estado de Quintana Roo and Instituto Nacional de la Pesca*, México, 35 páginas.
- Frías-Espericueta, M.G.; Osuna-López, J.I.; Estrada-Toledo, F.J.; López-López, G.; Izaguirre-Fierra, G. (2005) **Heavy Metals in the Edible Muscle of Shrimp from Coastal Lagoons Located in Northwest Mexico.** *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74, 1098-1104.
- Frías-Espericueta, M.G.; Osuna-López, J.I.; Flores-Reyes, S.; López-López, G.; Izaguirre-Fierra, G. (2005) **Heavy Metals in the Oyster *Crassostrea corteziensis* from Urias Lagoon, Mazatlán, México, Associated with Different Anthropogenic Discharges.** *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74, 996-1002.
- Gallegos, M. E.; Merino, M.; Marbá, N.; Duarte, C.M. (1992) **Flowering of *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean: age-dependence and interannual variability.** *Aquatic Botany*, 43, 249-255.
- Gallegos, M. E.; Merino, M.; Marbá, N.; Duarte, C.M. (1993) **Biomass and dynamics of *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean: elucidating rhizome growth.** *Marine Ecology Progress Series*, 95, 185-192.
- Lavoisier Salcedo, Eric (2006)
"Metales pesados en la laguna Yalahau"
Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM.
- Lewis, M.A.; Dantin, D.D.; Chancy, C.A.; Abel, K.C.; Lewis, C. G. **Florida seagrass habitat evaluation: A comparative survey for chemical quality.** (2006) *Environmental Pollution*, 1-13.
- Marbá, N.; Gallegos, M. E.; Merino, M.; Duarte, C.M. (1994) **Vertical growth of *Thalassia testudinum*: seasonal and interannual variability.** *Aquatic Botany*, 47, 1-11.
- Martínez, A.; Merino, M.; Herrera-Silveira, J.A.; Ramírez, J.; Rosas, H.; Valdespino, J.; Carricart-Ganivet, J.P. (2006) **cadmium, Chromium and Iron in *Thalassia testudinum* communities from Yalahau Lagoon, SE Mexico.** *Environment International*, submitted.
- Medina-Elizalde, M.; Gold-Bouchot, G.; Ceja-Moreno, V. (2002) **Lead contamination in the Mexican Caribbean recorded by the coral *Montastraea annularis* (Ellis and Solander)** *Marine Pollution Bulletin*, 44, 421-431.
- Medina-Elizalde, M.; Herrera-Silveira, J.A. (2004) **Spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: a multivariate approach.** *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 58, 455-465.
- Montgomery, R. y 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, 546-549.

- Newton, A.; Mudge, S.M. (2005) **Annual nutrient budgets in a shallow mesotidal lagoon: the Ria Formosa, Portugal.** *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 62, 405-414.
- Nienhuis, P.H. (1986) **Background Levels of Heavy Metals in Nine Tropical Seagrass Species in Indonesia.** *Marine Pollution Bulletin*, 17, 508-511.
- Nogawa, K. (1981) **Itai-itai disease and follow-up studies.** In Nriagu, J.O. (Ed), *Cadmium in the Environment, Part 2.: Health Effects.* Willey-Interscience, New York, pp. 1-37.
- Osuna-López, J.I., Páez-Osuna, F.; Marmolejo-Rivas, C.; Ortego-Romero, P. (1989) **Metales pesados disueltos y particulados en el puerto de Mazatlán.** *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*, 16, 307-320.
- Páez-Osuna, Federico (1996) **Efectos de los metales.** Páginas 349-361 publicado en A. V.Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benítez, D. Zárate-Lomeli (Editores). *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias.* Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica 5, 666p.
- Páez-Osuna, F.; Ruiz-Fernández, C. (1995) **Trace Metals in Mexican shrimp *Penaeus vannamei* from estuarine and marine environments.** *Environmental Pollution*, 87, 243-247.
- Páez-Osuna, F.; Valdés-Lozano, D.S.; Alexander, H.M.; Fernández, H. (1987) **Trace metals in the fluvial system of Terminos Lagoon, Mexico.** *Marine Pollution Bulletin*, 18, 294-297.
- Páez-Osuna, F.; Ruiz-Fernández, C.; Botello, A.V.; Ponce-Vélez, G.; Osuna-López, J.I.; Frías-Espericueta, M.G.; López-López, G.; Zazueta-Padilla, H.M. (2002) **Concentrations of selected trace metals (Cu, Pb, Zn), organochlorines (PCBs, HCB) and total PAHs in mangrove oysters from the Pacific Coast of Mexico: an overview.** *Baseline Marine Pollution Bulletin*, 44,1296-1313.
- Parsons, T.; Maita, Y.; Lally, C. (1984) **A manual of chemical and biological methods of seawater analysis.** Pergamon Press. Oxford. 173 pp.
- Perry, E.; Velázquez-Oliman, G.; Marin, L. (2002) **The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the Northern Yucatán Peninsula, Mexico.** *International Geology Review*, 44,191-221.
- Prange, J.A.; Dennison, W.C. (2000) **Physiological Responses of Five Seagrass Species to Trace Metals.** *Marine Pollution Bulletin*, 41, 327-336.
- QRSS (2006) Quintana Roo Speleological (QRSS) www.caves.org/project/qrss/
Official site of the statistics on the long deep cave systems in the Caribbean Coast, Yucatán Península.
- Rosas Sánchez, Daniel Humberto. (2006)
"Estudio de la acumulación de cadmio en *Thalassia testudinum* de la laguna Yalahau, Quintana Roo" Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM.
- Ruelas-Insunza, J.; Paez-Osuna, F. (2004) **Distribution and Concentration of Trace Metals in Tissues of Three Penaeid Shrimp Species from Altata-**

- Ensenada del Pabellón (S.E. Gulf of California) Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, 72, 452-459.
- Ruelas-Insunza, J.; Paez-Osuna, F. (2005) **Mercury in Fish and Shark Tissues from Two Coastal Lagoons in the Gulf of California**. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74, 294-300.
- Ruiz Noria, Otilia Zelindabeth (2005)
 "Presencia de Fe y Cr en *Thalassia testudinum* del Golfo de México y Mar Caribe"
 Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM.
- Ruiz Renteria, F.; Escalante Mancera, J.E. (2004) SAHMUAPM (Servicio de Hidrografía y Meteorología de la Unidad Académica de Puerto Morelos) ICMYL (del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología) UNAM-CARICOMP (Caribbean Coastal Marine Productivity Project)
- Sánchez-Rodríguez, I; Huerta-Díaz, M.A.; Choumiline, E.; Holguín-Quiñones, O.; Zertiche-González, J.A. **Elemental concentrations in different species of seaweeds from Loreto Bay, Baja California Sur, México: implications for the geochemical control of metals in alga tissue**. *Environmental Pollution* 114, 145-160.
- Schroeder, P.B.; Thorhaug, A. (1980) **Trace metal cycling in tropical-subtropical estuaries dominated by the seagrass *Thalassia testudinum***. *American Journal of Botanic*, 67, 1075-1088.
- Smith, S.V.; Camacho-Ibar V.; Herrera-Silveira J.A.; Valdes, L.D.; Merino, M.; and Buddemeier, R.W. (1999). **Quantifying Groundwater Flow Using Water Budgets and Multiple Conservative Tracers**, páginas 96-105. In: Smith, S.V., J.I.Marshall Crossland and C.J. Crossland. *Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II)*, LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.
- Tran, K.Ch.; Valdes, D.; Euan, J.; Real, E.; Gil, E. (2002) **Status of water quality at Holbox Island, Quintana Roo State, México**. *Environmental Studies*, 8, 331-340.
- Valdespino Saenz, Job (2005).
 "Determinación de Metales Pesados en *Thalassia testudinum* en dos zonas de la Península de Yucatán" Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM.
- van Tussenbroek, B.I. (1994) **Aspects of the Reproductive Ecology of *Thalassia testudinum* in Puerto Morelos Reef Lagoon, Mexico**. *Botánica Marina*, 37, 413-419.
- van Tussenbroek, B.I.(1994) **The impact of Hurricane Gilbert on the Vegetative Development of *Thalassia testudinum* in Puerto Morelos Coral Reef Lagoon, Mexico. A Retrospective Study**. *Botánica Marina*, 37, 421-428.
- van Tussenbroek, B.I. (1995) ***Thalassia testudinum* leaf dynamics in a Mexican Caribbean coral reef lagoon**. *Marine Biology*, 122, 33-40.
- Vázquez, F.G.; Sharma, V.K., Pérez-Cruz, L. (2002) **Concentrations of elements and metals in sediments of the south-eastern Gulf of Mexico**. *Environmental Geology*, 42, 41-46.

Villanueva, S; Botello, A.V. (1998) ***Metal Pollution in Coastal Areas of Mexico***. *Review of Environmental Contamination and Toxicology*, 157, 53-94.

Whellan III, T.; Espinoza, J.; Villarreal, X.; CottaGoma, M. (2005) ***Trace metal partitioning in Thalassia testudinum and sediments in the Lower Laguna Madre, Texas***. *Environmental Internacional*, 31, 15-24.

Apéndice A

Espectroscopia de emisión y de absorción atómica

Esta técnica se utiliza principalmente para determinar trazas de metales en muchos tipos de matrices orgánicas o inorgánicas. Se utilizan dos técnicas: la espectroscopia de emisión atómica y la espectroscopia de absorción atómica. Cuando se trata de la emisión, los átomos se vaporizan utilizando algún tipo de combustión o bien, descargas eléctricas. La intensidad de la emisión es proporcional a la concentración en la muestra, y depende de la temperatura del sistema. En la absorción, se hace incidir una radiación sobre el vapor del metal, que provoca transiciones electrónicas del estado fundamental a estados excitados. La concentración en este caso es proporcional a la relación entre el poder transmitido y el poder incidente.

Emisión de llama. La espectroscopia de emisión de llama es una forma especial de la espectroscopia de emisión. Se emplea una llama para excitar a los átomos. Cuando una disolución que contienen iones se nebuliza con una llama, ocurre una vaporización del disolvente que libera partículas de sal. Esa sal se evapora y se disocia en átomos. La llama excita algunos de estos átomos, y los átomos excitados emiten la radiación característica de su especie. La eficacia de la formación de átomos excitados en la llama es baja. La principal aplicación de la emisión de llama es la determinación cuantitativa de elementos alcalinos y alcalinotérreos.

Emisión de plasma. La espectroscopia de emisión de plasma utiliza una fuente de calor que permite producir un plasma. El plasma se obtiene por acoplamiento inductivo o capacitivo de un gas ionizable con el campo magnético de una fuente de microondas. En esta técnica también se vaporiza la muestra, se excitan los átomos y a continuación emiten su radiación característica. La intensidad de la radiación se relaciona con la concentración de la muestra original. La ventaja de la emisión de plasma sobre la emisión de llama es que, al llevarse a cabo a altas temperaturas, aumenta la eficacia del proceso de excitación, y por lo mismo se incrementa la sensibilidad para la mayoría de los elementos. La principal

desventaja radica en la dificultad para mantener el plasma, por lo que las muestras están limitadas a materiales gaseosos y a disoluciones desolvatadas.

Absorción atómica. La espectrofotometría de absorción atómica es un método de absorción en el que la radiación es absorbida por átomos no excitados en estado vapor. Este método presenta algunas ventajas sobre la emisión porque pueden determinarse cuantitativamente más elementos, disminuyen las interferencias espectrales y tiene una gran sensibilidad para la mayoría de los elementos. EL instrumento consta de una fuente de luz, una celda, un monocromador y el sistema detector. La fuente de luz emite una radiación cuya longitud de onda es la misma que la del elemento que se determina, ya que la fuente está fabricada con ese mismo elemento. La muestra se nebuliza en un mechero de premezcla aire-gas. La radiación pasa al monocromador y se mide en el detector. La cantidad de radiación absorbida es proporcional a la concentración del elemento en la muestra. La curva de calibrado se prepara midiendo la absorbancia de una serie de disoluciones patrón. La absorción atómica se utiliza para medir concentraciones muy pequeñas de iones metálicos en disolución, por lo cual es un método que se ha aplicado con éxito al análisis de muestras biológicas, agrícolas, metalúrgicas, geológicas y de contaminación.

Apéndice B

*Submitted for publication in
Environmental International
August 8, 2006.*

Cadmium, Chromium and Iron in *Thalassia testudinum* communities, from Yalahau Lagoon, SE Mexico

Ana Martínez ^{*1}, Martín Merino², Jorge A. Herrera-Silveira³, Javier Ramirez³, Humberto Rosas¹, Job Valdespino¹, Juan P. Carricart-Ganivet⁴

¹ Instituto de Investigaciones en Materiales.

Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 04510, México.

² Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,

Universidad Nacional Autónoma de México

México D. F. 04510, México.,

³CINVESTAV-IPN. Departamento de Recursos del mar. Unidad Mérida.

Antigua Carretera a Progreso km 6. Mérida, Yucatán 97310, México.

⁴ El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal, Apdo. Postal 424, Chetumal, Quintana Roo 77000, México.

Abstract

For many years, studies carried out have demonstrated high concentrations of some heavy metals in lagoon and estuarine ecosystems in Mexico. Human activities increase the availability of heavy metals, representing a potential problem since some essential trace metals can be toxic at high concentrations. In this work, *Thalassia testudinum* was selected as an indicator seagrass species for trace metal contamination in Holbox Island and the adjacent Yalahau Lagoon, located in the Caribbean Gulf of Mexico, on the coast of northern Quintana Roo. The purpose of this study is to assess the concentrations of Cd, Cr and assessed Fe in *T. testudinum*, in order to investigate the influence of human activities. patternsThe main conclusion from this investigation is that coastal marine pollution in Holbox Island and Yalahau Lagoon is not yet a problem, but point source discharges could represent a future local crisis with respect to Cd and Cr contamination.

* martina@iim.unam.mx

1. Introduction

For more than 25 years, studies carried out have demonstrated high concentrations of some heavy metals in lagoon and estuarine ecosystems in Mexico (Páez-Osuna et al., 1998; Villanueva and Botello, 1998; Medina-Elizalde et al., 2002; Ruelas-Insunza and Páez-Osuna, 2002; 2005; Frías-Espericueta et al., 2005), in spite of efforts to reduce environmental risks and safeguard the natural environment. Unlike pesticides, which mainly originate from human activities, trace metals occur naturally in organisms. In fact, some selected trace metals represent essential micronutrients, found in soils and seawater and as part of the rocks and marine sediments. Still, human activities increase the availability of heavy metals, which represent a potential problem since some essential trace metals can be toxic at high concentrations (Ralph and Burchett, 1998; Prange and Dennison, 2000).

It is well known that seagrasses are the most productive submerged habitats, having an annual production of carbon of 4×10^3 gC/m² (McRoy and McMilan, 1977). Also, seagrasses are crucial for many marine ecosystems since they provide habitat, sediment stability, nutrients and food for many organisms (Klumpp et al., 1989). It has been established that seagrasses capture trace metals from the marine environment via the leaves and the root-rhizomes. Metal concentrations in these tissues can be correlated with those in both the water column and sediments (Pulich, 1980; Lyngby and Brix, 1982, 1983; Neinhuis, 1986; Ward, 1989) and, as such, these plants can be used as “biological indicators” of metal contamination. Furthermore, being primary producers, seagrasses can be used as first-level indicators in monitoring trace metal levels in coastal marine environments.

Previous research on the interactions between metals and seagrasses has focused on the accumulation of metals in the plant (Pulich, 1980; Lyngby et al. 1982; Brix and Lyngby, 1983, 1984; Neinhuis, 1986; Ward, 1989; Malea, 1993; Schlacher-Hoelinger and Schlacher, 1998). For example, the seagrass *Posidonia oceanica* was utilized as a biomarker of trace metal contamination, particularly on the Mediterranean coast (Maserti, et al. 1988; Sanchiz et al. 1990; Costantini et al. 1991; Catiski and Panayotidis, 1993). Along the US Florida coast, *Thalassia testudinum* leaves were used to evaluate the presence of As in several estuaries (Fourqurean and Cia, 2001). Recently, Whelan III et al. (2005) reported trace metal partitioning in *T. testudinum* and sediments in the Lower Laguna Madre, Texas, USA. They concluded that *T. testudinum* can be used as a biomonitor, but that care must be taken to analyze all the morphological units and, depending upon the metals involved, that the season of maximum concentration should be considered. For example, Mn, Fe and Cu had maximum concentrations in the summer, whereas concentrations of Pb and As were highest in winter. Mn and Fe are important in plant metabolism as they are required in the photosynthetic processes occurring in the leaves, which increase during the high growth period in the summer. As suggested by others for As and Pb (Schlacher-Hoelinger and Schlacher, 1998; Whelan III et al., 2005), the concentrations in summer are lower than in winter, probably because there is a summer growth “dilution”. Pb and As are non-essential elements for seagrass growth and are incorporated into the leaf tissue and cellular structure by passive uptake, rather than by active metabolic incorporation. It appears that there is a negative correlation between the concentration of essential and non-essential elements; namely that as the concentration of essential metals increases, the concentration of non-essential metals decreases.

T. testudinum is a climax species (Zieman, 1982), and is an abundant seagrass in many tropical and subtropical environments worldwide. For these reasons, we have selected *T. testudinum* as an indicator seagrass species for trace metal contamination in Holbox

Island and the adjacent Yalahau Lagoon, located in the Gulf of Mexico, on the coast of northern Quintana Roo. Holbox is part of the Yum Balam nature reserve, which is formed by coastal lagoons and wetlands that are rich in wildlife. The area named "Area de Protección de Flora y Fauna Yum Balam" was declared protected in 1994 (CONANP, 1994). It comprises an area of 154,000 hectares, which is contiguous to Ria Lagartos Biosphere Reserve to the northwest. Yum Balam is comprised of a rich variety of ecosystems, including deciduous tropical forest, flooded forests, mangroves, wetlands, a marine bay, barrier island coastal dunes, and coastal waters. It is also home to approximately 16,000 locals, most of them of Mayan origin, living in several townships within the protected area. Yum Balam is a very important protected area, which makes it crucial to evaluate the possible contaminants that can threaten these ecosystems.

The purpose of this study was to assess the concentrations of Cd and Cr (non-essential elements), and Fe (essential for the metabolism of plants) in *T. testudinum* from this important protected area, in order to investigate the influence of human activities in the watershed, in Yalahau Lagoon itself, and in the city dump located in Holbox.

2. Methods

2.1 Geographic setting

Our area of interest is the coast of Holbox Island and the adjacent Yalahau Lagoon (Figure 1), in Quintana Roo State, northeast of the Yucatan Peninsula, Mexico. The Yucatan Peninsula is a calcareous platform, with rapid infiltration of rainwater. The consequent lack of surface runoff to coastal waters determines that there are no significant iron inputs to the coastal environments, other than the atmospheric and local point sources (Merino et al., 1990 Duarte, et al., 1995). There are no natural sources of chromium or cadmium either, so we can assume that all the cadmium, chromium and iron present in the lagoons are of atmospheric and local point source origin. The Yalahau Lagoon, also known as Conil Lagoon, is located between the fishing communities of Holbox Island to the northern latitude and the town of Chiquila to the south (between 21°26' and 21°36' N and 87°08' and 87°29' W). The lagoon is partially isolated from the ocean by a sand barrier called Holbox Island (with an area of 70-80 km²), and although it formally ends in the Gulf of Mexico, it is strongly influenced by the Caribbean Sea. The zone experiences tropical weather, with the rainy season comprising the summer and autumn months. Average air temperature of the coldest month is 18 °C, and the daily thermal oscillation is between 5 and 7 degrees (Jimenez, et al 1998).

2.2 Field Methods

Our sampling locations in the Yalahau Lagoon are shown in Figure 2 and Table 1. Monotypic areas of *Thalassia testudinum* were selected along the main axis of the lagoon to assess spatial variation in metal concentrations. Location 1 and 2 are close to the runoff from the town dump at Holbox.

In order to better understand the main seasonal variation in metal concentrations, samples were collected during June of 2004 and January of 2005. Rainfall varies between 100 and 320 mm in the months of rainy season, while, in the dry season, the monthly average is approximately 40 mm (Figure 3). The effects of rain in the aquatic plants are not instantaneous, considering that the maximum potential leaf age is 90 days (Tussenbroek, 1995). This means that the June leaves begin to grow two or three months earlier, during the dry season (March or April; see Figure 3). Thus, leaves sampled in January indicate conditions experienced during the rainy season, as they began to grow in October and November. Similarly, samples from June are expected to reflect the

conditions of the substrate during the previous dry season. Leaves and roots-rhizomes of *T. testudinum* were collected by hand and immediately washed with lagoon water to remove sediments, shells and other debris. Epiphytes were efficiently hand-removed from the leaves, and we estimate that more than 95% of the epiphytic organisms were removed from the leaf surface. Leaves were separated from root-rhizomes, and stored in separate plastic bags for their transport to the laboratory.

In order to assess the spatial and seasonal variation in water quality, surface-water salinity was measured with a multisonde YSI-85 at each station. One liter of surface water was also collected and filtered through a 0.45 µm membrane Millipore filter, and the water was then preserved at 4°C until dissolved inorganic nutrients could be quantified in the laboratory.

2.3 Laboratory methods

In the laboratory, seagrass tissue was blotted with paper towels and left thus, at room temperature, until partially dry. All the tissue was oven-dried at 95 °C for 24 h. Samples of dry leaves and roots-rhizomes, of approximately 0.2-g, were weighed and digested using concentrated nitric acid and a hydrogen peroxide solution, following USEPA SW 846-3050 methodology. This treatment is not a complete digestion that oxidizes and dissolves all minerals including quartz and aluminosilicates. A complete digestion requires treatment with HF and HClO₄. The procedure that we used leaches and oxidizes the bioavailable metals (Whelan III, et al., 2005). Table 2 reports recoveries for the metals reported in this study compared to the results for the reference material (HSP Certified Reference Material, Orchard Leaves Solution). Since we found that this reference material did not cover the range of concentration encountered for Cd in the seagrasses sampled, a standard within this range was added to it. After digestion, samples were transferred and filtered into 10 mL volumetric flasks, brought to volume, and transferred into 1 mL tubes for analysis. All samples reported here were analyzed using a PE Analyst 800 flame atomic absorption instrument equipped with a high efficiency nebulizer. Samples were aspirated in triplicate, and where the relative percent standard deviation was greater than 5% samples were re-analyzed. Working standard solutions were made from dilutions of each element from 1000 ppm FLUKA standard solutions. Quality assurance samples were analyzed in each analytical batch, or every 10 samples. Matrix spikes were run for each matrix type and ranged from 80% to 115% recovery. Replicate analyses were made to determine precision and ranged from 85% to 112% RPD.

ammonium, nitrate, nitrite and silicateThe water quality variables analyzed were dissolved inorganic nitrogen (NH₄⁺+NO₃⁻+NO₂⁻) and silicate (SiO₄⁴⁻). Ammonium with the phenol-hypochlorite method (Solórzano, 1972), nitrites with sulfanilamide method, nitrate, as nitrites after reduction in cadmium-copper column, and the reactive soluble silica through the blue-molybdenum method; all are standard spectrophotometric techniques described in Parsons et al. (1984).

3. Results and Discussion

3.1 Hydrology description

The average salinity of the lagoon was above 40 (Table 3), and salinity values rose from near marine values near the inlet to hypersaline values in most of the stations sampled (Fig. 4a). This means that evaporation is greater than freshwater inputs in Yalahau, as found for other lagoons in the region (Gonzalez et al., 1992; Herrera-Silveira, 1994; Herrera-Silveira and Ramirez-Ramirez, 1998) Seasonal differences were not observed

indicating that variable fresh water inputs from rain and surface runoff are dominated by the more stable groundwater discharge.

Silicate concentrations increased significantly from surface marine values ($<15 \mu\text{m}$) at the lagoon inlet (station 1) towards the inside of the lagoon, reaching maximum values over $100 \mu\text{m}$ at stations 5 and 6 (Figure 4b). During the rainy season (Table 3). Since silicate concentrations have been identified as a tracer of groundwater inputs in this region (Smith et al., 1999), this pattern supports that groundwater discharges are important in the Yalahau lagoon, particularly in area around the stations having high silicate concentrations. The permanence of this pattern during both the dry and rainy seasons samplings, also support the dominance of groundwater input over rainfall and surface runoff at Yalahau.

The highest concentrations of dissolved inorganic nitrogen forms ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$), were registered at stations 2 & 5 and 2 & 7, during dry and rainy season, respectively (Figures 4c and d), and were dominated by ammonium. Since this nutrient is related to organic matter remineralization processes and to wastewaters (Newton & Mudge, 2005), the concentrations registered at station 2 could indicate diffuse inputs leached from the town dump, while the concentrations registered at stations 5 and 7 would be related to biogeochemical processes in the sediment-water column interface, due to the shallowness ($<1.5\text{m}$) of this area. As for nitrate concentrations, although this nutrient did not show a discernable spatial pattern, its values were higher during the rainy season (Table 3). In other coastal lagoons of Yucatan, this nutrient, as well as silicate, has been related to fresh water inputs from aquifers (Herrera-Silveira, 1994; Medina & Herrera-Silveira, 2004), suggesting that seasonal differences could be related to higher groundwater inputs during the rainy season.

In accordance with these results, the stations can be classified as follows: 5,6 and 7 show ground water input; 1 and 2 present diffuse inputs leached from the town dump; 3, 4 and 8 are locations with no anthropogenic influence.

3.2 Iron, cadmium and chromium in the Yalahau Lagoon

Figure 5, 6 and 7 show the results for iron, cadmium and chromium in leaves and root-rhizomes of *T. testudinum*, at the eight locations in the Yalahau Lagoon (see Figure 2). The samples were collected in January (rainy season). Fe and Cd substantially increase in locations 5, 6 and 7, in harmony with the increment of silicates (Figure 4b). The increment of Fe and Cd in these locations is due to the presence of groundwater input. For iron, the leaf tissue had relatively consistent values near 110 ppm, except for locations 5 and 6 where the values were 395 and 497 ppm, respectively. For root-rhizome system, the highest values were found at locations 5 and 7. Other values were consistent and near to 100-150 ppm. Holbox 5 shows the highest Fe in the root-rhizome tissue (547 ppm). The movement of the water could be responsible for this behavior, directly related to the groundwater input, and Fe contributions proceeding from the sediments that are regularly resuspended in the rainy season. The groundwater input at locations 5, 6 and 7 could be the reason for the high amount of cadmium at site 7 (see Figure 6). As can be seen with silicates and salinity data (Figure 3), there is a groundwater input at locations 5, 6 and 7.

For chromium, tissue samples had relatively consistent values (0.5 – 1.7 ppm) except for location 2 (Figs. 7 y 10), where values were significantly higher (2.15 - 4.4 ppm). With these results, it is possible to conclude that there is a small influence of the dump, and that groundwater is not contaminated with chromium.

Metals and other contaminants could also arrive to the lagoon through runoff. Holbox 1 and 2 locations are related to runoff from the town dump. The highest Cd (3.65 ppm, location 1) and Cr (4.40 ppm) concentrations were also found on one of these locations

(Figs. 6 and 10), supporting the possibility of important local inputs through runoff transports of metals in this area of Yalahau. These results also support the utility of seagrass analyses as a way to detect pollution from local sources, like a small dump, because of their integrative nature.

3.3 Seasonal variation

In order to analyze the seasonal variation of heavy metal concentrations, a comparison with samples collected during June (dry season) was made. To simplify the analysis, we selected three locations: Holbox 2, influenced by the dump; Holbox 4 having no influence and Holbox 7 with groundwater input impact.

Iron

Figure 8 shows that iron in leaves and root-rhizomes of *T. testudinum*, substantially increased in the rainy season. The leaf tissue had relatively consistent values, near to 60 ppm, during the dry season, and close to 110 ppm during the rainy season. For root-rhizomes, the results are more complex since there are no consistent tendencies in the concentrations. Holbox 7 showed the highest Fe in the root-rhizome tissue, but contained close to the average value for the leaf. Duarte et al. (1995) reported available data on iron concentration in seagrass tissues and showed that iron concentrations in seagrass growing on carbonate sediments are below critical levels (<100 ppm Fe) for angiosperms. According to this information, our highest Fe value (461 ppm) is extraordinarily elevated for seagrass growing on carbonate sediments (Duarte et al, 1995). The seagrasses in this sediment are likely to experience iron deficiency, however, it seems that this is not the case for the seagrasses that were collected, during the rainy season, at Holbox 7. It looks like a groundwater input of iron is present in the zone, as indicated by silicate and DIN concentrations (Figures 4b and 4d), which were high in station 7 mainly during the rainy season. January comprises part of the rainy season, but is also designated as the cold front ("nortes") season. The nortes season is characterized by moderate rainfall (20-50 mm), and intense winds (50-90 km/h) associated with frontal passages (Álvarez-Góngora, 2006). Under these conditions, there is more movement of the water and there is probably a resuspension of the sediments. As a consequence, there is more Fe available for the seagrasses, and this extra iron stimulates growth of the seagrasses during January. Studies in controlled microcosmos of *T. testudinum* suggest an increase in the accumulation of non-toxic metals during the summer months (Schroeder and Thorhaug, 1980), because the high growing period is related to the temperature. Higher temperatures usually enhance the growth of the seagrasses, but not in this case. The mean water temperature for the dry season (June) was 31.2 °C, while it was 23.9 °C during the rainy season (January). These temperature data might imply that the high growth period in Holbox is during summer (June-August), however, taking into account the extra Fe encountered, it is possible to say that it occurs in January. Fe deficiency is restricted to carbonate sediments in tropical coastal areas with low terrigenous inputs. This is the case in the area under study. Extra Fe fertilizes the zone before January and, for this reason, the high growing period is in January. This is in agreement with the results concerning the growth dilution of non-essential metals that was reported in the previous section.

Cadmium and Chromium

Figures 9 and 10 show the results for cadmium and chromium, respectively, in leaves and root-rhizomes of *T. testudinum*, at three locations in the Yalahau Lagoon. Cd and Cr substantially decreased in the rainy season, except for station Holbox 7, where Cd increased dramatically and Cr slightly. These results agree well with the growth dilution idea of non-essential metals that was discussed above, except for location Holbox 7. This

station represents the ground water input impact. It appears there is a local influence that increases the amount of Cd. Concerning other locations, Holbox 2 is close to the runoff that comes from the town dump. Batteries are present in the town dump, and the runoff probably transports the metals into the seawater. There are other materials at the dump that contain chromium. For this reason, Cd and Cr are higher at Holbox 2 than at the other locations during June. The concentrations of Cd and Cr at Holbox 2 decrease during the January season, because the runoffs also decline. With the analyses of the seagrasses, it is possible to detect a small perturbation, produced by a small dump and the pollution that arrives to the seawater through the runoff. In all cases, Cd and Cr are higher in leaf tissue than in root-rhizomes. These results corroborate the idea of passive uptake of these metals, rather than active metabolic incorporation within the cellular structure (Whelan, III, et al. 2005)

Cd is high at locations 5, 6 and 7. Comparing these results with those presented in Figure 3, it is possible to see the same behavior. This indicates that the presence of Cadmium is due to the groundwater that arrives to the lagoon. Other alternative source of metals in regions where upwelling waters occur are eventually enriched with nutrients and with Cd (Segovia-Zavala et al. 1998), and this might influence Cd availability in areas influenced by such phenomena.

For Cr, the results are consistent. The concentration in all leaf tissues is close to 0.5 ppm, while for root-rhizome system it is near to 0.7 ppm. Apparently, a local contamination problem for chromium does not exist, except for the values in Holbox 2, for the dry season, where Cr increases due to the runoff from the dump field. In conclusion, we think that there is a local point source discharge problem for cadmium, which is not present for chromium. The main source of cadmium could be the batteries, however, more studies are needed in order to be sure about these conclusions.

Seasonal variation reported in Table 4 is based on the average values from the three locations (Holbox 2, Holbox 4 and Holbox 7). For Cd, (see below), we consider that there is a local source that influenced at site 7 during the rainy season (January). Thus, the results from this location, for the rainy season, were not used in calculating the average. Percent differences were calculated by subtracting the dry season concentrations from those of the rainy season, then dividing by the dry season concentrations and multiplying by 100. Negative values indicate that concentrations are higher in the dry season than in the rainy season. Table 4 shows the association between the concentration of essential iron and that of non-essential chromium and cadmium elements; as the concentration of essential metals increases, the concentration of non-essential metals decreases. Fe increases substantially in the dry season, whereas Cd and Cr decrease considerably. This result agrees well with previous reports (Schroeder and Thorhaug, 1980; Whelan III, 2005) that indicate an inverse correlation between essential and non-essential metals. As suggested by others (Whelan III, 2005; Schlacher-Hoenlinger and Schlacher, 1998), this is probably the result of "growth dilution", involving a dilution due to the passive uptake of Cd and Cr into the leaf tissue. Non-essential elements for seagrass growth are incorporated into the leaf tissue by passive uptake, rather than active metabolic incorporation (Whelan, III, et al, 2005)

4 Comparison with other polluted areas

There are scant results in the literature concerning the concentration of Fe, Cd and Cr in *T. testudinum*. For Fe, Duarte et al. (1995) reported values from the Caribbean and the Gulf of Mexico, and Whelan III et al. (2005) reported values for the Lower Laguna Madre,

Texas, USA. Table 5 provides a comparison between the results in this work and others previously reported. For Cd concentration, values found here are close to the background levels (Nienhuis, 1986), except for the locations where we suspect that there is a local point source. For Iron, values are consistent with those previously reported by other authors (Duarte, 1995; Whelan III, 2005), except at locations where silicate evidences a strong groundwater influence. Overall, these results show that coastal marine pollution in Holbox Island and Yalahau Lagoon does not yet present a problem. Effects of development and human activities on the coastal water are still very localized, but point discharges could represent a local problem with respect to cadmium and chromium. The legal limits^A for contaminants in fish are 5.5 and 1.0 ppm, for Cd and Cr, respectively. In view of the well-known fact of biomagnification, organisms occurring higher on the food chain tend to have increasingly greater concentrations of toxic substances in their tissue. The question of whether the levels of these types of elements increase as a function of the trophic level is still a matter of debate. Typically, it has been stated that mercury is subject to bioaccumulation and biomagnification (Riisgård and Hansen, 1990; Castilhos and Bidone, 2000; Dietz et al., 2000) but other researchers have found that biomagnification is non-existent in the case of diverse metals including Cd (Amiard et al., 1980; Szefer 1991; Mikac et al., 2001). Studies concerning the occurrence of trace metals along food chains are still scarce, especially in tropical and subtropical latitudes where trophic relationships are complex, as a consequence of the elevated number of species. Heavy metals such as cadmium and chromium represent the second largest group with respect to susceptibility to bioconcentration. This means that, if leaf tissue shows 3.4 and 4.4 of Cd and Cr, respectively, it is most probable that there exists greater accumulation in fish, and that the values are either close to, or above, the legal limits for these contaminants. Consequently, coastal marine pollution could be a potential problem in the Yalahau Lagoon.

5. Conclusions

1. The area under study presents Fe deficiency. Extra Fe fertilizes the zone during the month of January and, for this reason, the period of greatest growth is in January.
2. There is an inverse correlation between essential and non-essential metals in *T. testudinum*. This is probably a result of "growth dilution", since non-essential elements for seagrass growth are incorporated into leaf tissue by passive uptake, rather than by active metabolic incorporation. In fact, there is a dilution due to the passive uptake of Cd and Cr into leaf tissue.
3. The results from this study indicate that trace metals examined in *T. testudinum* are fractionated within morphological units. Cd and Cr demonstrated higher values in leaves than in root-rhizomes. The inference is that these metals enter the plant leaf via the water column, rather than through the sediments.
4. *T. testudinum* can be used as a biomonitor for trace metals in contaminated sites. Taking into account the season, it is possible to identify perturbations from the town dump or from the groundwater input.
5. The coastal marine pollution in Holbox Island and Yalahau Lagoon does not, as yet, present a problem, however, point source discharges could represent a future local crisis with respect to Cd and Cr.

^A Values in $\mu\text{g/g}$ wet wt. and represent range for different countries as reported by Nauen (1983) and USEPA (1989)

Acknowledgments The authors would like to acknowledge the assistance afforded by Mrs. Sara Jiménez and Ms María Teresa Vázquez in the area of technical support. This work was partially funded by DGAPA and CONACYT.

References

- Álvarez- Góngora, C.; Herrera-Silveira, J.A. 2006. Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. *Marine Pollution Bulletin*, 52, 48-60.
- Amiard-Triquet, C., Metayer, C., Amiard, J.C., Ferre, R., 1980. Etude du transfert de Cd, Pb, Cu et Zn dans les chaines trophiques neritiques et estuariennes-II. Accumulation biologique chez les poissons planctonophages. *Water Research* 14, 1327-1332.
- Brix, H.; Lyngby, J. E. 1982. The distribution of cadmium, copper, lead and zinc in eelgrass (*Zostera marina* L). *The Science of total environment*, 24, 51-63.
- Brix, H.; Lyngby, J. E. 1984. A survey of the metallic composition of *Zostera marina* (L) in the Limfjord, Denmark. *Archives of Hydrobiologia* 99, 347-359.
- Brix, H.; Lyngby, J. E.; Schierup, H.H. 1983. Eelgrass (*Zostera marina* L) as an indicator organism of trace metals in the Limfjord, Denmark. *Marine Environmental Research*, 8, 165-181.
- Castilhos, Z.C., Bidone, E.D., 2000. Hg biomagnification in the ichthyofauna of the Tapajós river region, Amazonia, Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 64, 693-700.
- Catiski, V.A.; Panayotidis, P. 1993. Copper, chromium and nickel in tissues of the Mediterranean seagrasses *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* (Potamoetaceae) from Greek coastal areas. *Chemosphere* 26, 963-978.
- CONANP, 1994. <http://pyucatan.conanp.gob.mx/yumbalam.htm>. Diario Oficial de la Federación, 1994.
- Constantini, S.; Giordano, R.; Ciaralli, L.; Becaloni, E. 1991. Mercury, cadmium and lead evaluation in *Posidonia oceanica* and *Codium tomentosum*. *Marine Pollution Bulletin*, 22, 362-363.
- Dietz, R., Riget, F., Cleeman, M., Aarkrog, A., Johansen, P., Hansen, J.C., 2000. Comparison of contaminants from different trophic levels and ecosystems. *The Science of the Total Environment* 245, 221-231.
- Duarte, C.; Merino, M.; Gallegos, M. 1995. Evidence of iron deficiency in seagrasses growing above carbonate sediments. *Limnol. Oceanogr.* 40, 1153-1158.
- Frías-Espéricueta, M.G.; Osuna-López, J.I.; Estanda-Toledo, F.J.; López-López, G., Izaguirre-Fierro, G. 2005. Heavy metals in the edible muscle of shrimp from coastal lagoons located in Northwest México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 74, 1098-1104.
- Fourqurean, J.W.; Cia, Y. 2001. Arsenic and phosphorus in seagrass leaves from the Gulf of Mexico. *Aquatic Botany* 71, 247-258.
- Herrera-Silveira, J.A. 1994. Spatial and temporal patterns in a tropical coastal lagoon with groundwater discharges. *Journal of Coastal Research* 10 (3): 738-746.
- Herrera-Silveira, J.A. 1998. Salinity and nutrients in the coastal lagoons of Yucatán, Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 1473-1478
- Jiménez-Sabatini, Y.; Aguilar-Salazar, F.; Martínez-Aguilar, J.; Figueroa-Paz, R.; Aguilar-Cardozo, C. 1998. A fishing vision on Yalahau Lagoon in Holbox area, Quintanaroo State, México. In: Publication of Federación Regional de Sociedades Cooperativas de la Industria Pesquera del Estado de Quintana Roo and Instituto Nacional de la Pesca, México 35 pp.
- Klumpp, D.W.; Howard, R.K.; Pollard, D.A. 1989. Trophodynamics and nutritional ecology of seagrass communities. *Biology of seagrasses*. Amsterdam: Elsevier; 394-457.

- Lyngby, E.; Brix, H. 1982. Seasonal and environmental variation in cadmium, copper, lead and zinc concentrations in eelgrass (*Zostera marina* L) in the Limfjord, Denmark. *Aquatic Botany*, 14, 59-74.
- Lyngby, E.; Brix, H. 1983. Seasonal changes in the concentration of Ca, Fe, K, Mg, Mn and Na in eelgrass (*Zostera marina* L) in the Limfjord, Denmark. *Aquatic Botany*, 17, 107-117.
- Lyngby, J. E.; Brix, H.; Schierup, H. 1982. Absorption and translocation of zinc in eelgrass (*Zostera marina*) *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 58, 259-270.
- Malea, P. 1993. Bioaccumulation of aluminium in the seagrass *Cymodocea nodosa* (Ucria) Aschers. and *Posidonia oceanica* (L) Delile and in microalgae of the Gulf of Antikarya (Greece) *Botanica Marina* 36, 423-431.
- Maserti, B.E.; Ferrar, R.; Paterno, P. 1988. *Posidonia* as an indicator of mercury contamination. *Marine Pollution Bulletin* 19, 381-382.
- McRoy, C.P.; McMilan, C. 1977. Production ecology and physiology of seagrasses. *Seagrass Ecosystems: A Scientific Perspective*, 53-87.
- Medina-Elizalde, M.; Gold-Bouchot, G.; Ceja-Moreno, V. 2002. Lead contamination in the Mexican Caribbean recorder by the coral *Montastraea annularis* (Ellis and Solander). *Marine Pollution Bulletin* 44, 421-431.
- Medina-Gómez, I.; Herrera-Silveira, J.A. 2003. Spatial Characterization of Water Quality in a Karstic Coastal Lagoon without Anthropogenic Disturbance: A Multivariate Approach. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 58 (3):455-465.
- Merino, M.; Czitrom, S.; Jordán, E.; Martín, E.; Thomé, O.; Moreno, O. 1990. Hydrology and rain flushing of the Nichupté Lagoon System, Cancun, Mexico. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 30, 223-237.
- Mikac, N., Branica, M., Harrison, R.M., 2001. Total and organic lead distribution in water, sediment and organisms from the Eastern Adriatic coast. *Chemical Speciation and Bioavailability* 13, 121-128.
- Montgomery, J.R.; Price, M.T. 1979. Release of trace metals by sewage sludge and the subsequent uptake by members of a turtle grass mangrove ecosystem. *Environmental Science & Technology*, 13, 546-549.
- Nauen, C.E. 1983. Compilation of legal limits for hazardous substances in fish and fishery products. *FAO Fisheries Circular No. 764*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, p. 102.
- Nienhuis, P.H. 1986. Background levels of heavy metals in nine tropical seagrass species in Indonesia. *Marine Pollution Bulletin* 17, 508-511.
- Páez-Osuna, F., S.R. Guerrero-Galván and A.C. Ruiz-Fernández. 1998. The environmental impact of shrimp aquaculture and the coastal pollution in Mexico. *Marine Pollution Bulletin*. 36(1): 65-75.
- Parsons, T.; Maita, Y.; Lally, C., 1984. *A manual of chemical and biological methods of seawater analysis*. Pergamon Press. Oxford. 173 pp.
- Prange, J.A.; Dennison, W.C. 2000. Physiological response of five seagrass species to trace metals. *Marine Pollution Bulletin* 41, 327-336.
- Pulich, W.M. Jr. 1980. Heavy metal accumulation by selected *Holodule wrightii* Asch. Populations in the Corpus Christi bay area. *Contributions in Marine Science* 23, 90-100.
- Ralph, P.J.; Burchett, M.D. 1998. Photosynthetic response of *Halophila ovalis* to heavy metal stress. *Environmental Pollution* 103, 91-101.
- Riisgård, H.U., Hansen, S., 1990. Biomagnification of mercury in a marine grazing food-chain: algal cells *Phaeodactylum tricornutum*, mussels *Mytilus edulis* and flounders *Platichthys flesus* studied by means of a stepwise-reduction-CVAA method. *Marine Ecology Progress Series* 62, 259-270.

-
- Ruelas-Inzunza, J.; Páez-Osuna, F. 2002. Distribution of Cd, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn in selected tissues of juvenile whales stranded in the SE Gulf of California (México). *Environment International*, 28, 325-329.
- Ruelas-Inzunza, J.; Páez-Osuna, F. 2005. Mercury in Fish and Shark Tissues from Two Coastal Lagoons in the Gulf of California, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 74; 294-300.
- Sanchiz, C.; Benedito, V.; Pastor, V. García-Carrascosa, A. M. 1990. Bioaccumulation of heavy metals in *Posidonia oceanica* (L) Delile and *Cymodocea nodosa* (Ucria) Aschers. At an uncontaminated site in the east coast of Spain. *Mer. Medit.* 32 (3).
- Schlacher-Hoenlinger, M.A.; Schlacher, T.A. 1998. Accumulation, contamination and seasonal variability of trace metals in the coastal zone – patterns in a seagrass meadow from the Mediterranean. *Marine Biology* 131, 401-410.
- Segovia-Zavala, J.A., Delgadillo-Hinojosa, F., Alvarez-Borrego, S., 1998. Cadmium in the coastal upwelling area adjacent to the California-Mexico border. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 46, 475-481.
- Smith, S.V.; Camacho-Ibar V.; Herrera-Silveira J.A.; Valdes, L.D.; Merino, M.; and Buddemeier, R.W. 1999. Quantifying Groundwater Flow Using Water Budgets and Multiple Conservative Tracers, p. 96-105. In: Smith, S.V., J.I. Marshall Crossland and C.J. Crossland. *Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II)*, LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.
- Szefer, P., 1991. Interphase and trophic relationships of metals in a southern Baltic ecosystem. *The Science of the Total Environment* 101, 201-215.
- Tran, K. Ch.; Valdes, D.; Euan, J. 2002. Coastal pollution study in Holbox, México. *Journal of Policy Studies*, 12, 45-54.
- Tussenbroek, B. I. 1995. *Thalassia testudinum* leaf dynamics in a Mexican Caribbean coral reef lagoon. *Marine Biology*, 122, 33-40.
- USEPA. 1989. *Assessing Human Health Risks from chemically contaminated fish and shellfish: A Guidance Manual EPA-503/8-89-002*. Washington, DC: Office of Marine Protection.
- Villanueva, S.; Botello, A. V. 1998. Metal pollution in coastal areas of México. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 157, 53-94.
- Ward, T.J. 1989. The accumulation and effects of metals in seagrass habitats. In *Biology of Seagrasses: A Treatise on the Biology of Seagrasses with special reference to the Australian region*. Eds. A.W.D. Larkum, A.J. McComb, and S.A. Shepherd, pp797-820. Elsevier, Amsterdam.
- Whellan III, T.; Espinoza, J.; Villarreal, X.; CottaGoma, M. 2005. Trace metal partitioning in *Thalassia testudinum* and sediments in the Lower Laguna Madre, Texas. *Environment International* 31, 15-24.
- Zieman, J.C. 1982. *The ecology of the seagrasses of South Florida: a community profile*. Washington, D.C: US Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services; 1982. p. 158.

Tables

Table 1. Sampling locations (stations) in the Yalahau lagoon

Station	Co-ordinates	Common name	depth (m)
HOLBOX 1	N 21°30.997' WO87°23.880'	<i>Isla Pasión</i>	2.5
HOLBOX 2	N21°30.255' WO87°23.525'	<i>Basurero</i>	1.8
HOLBOX 3	N21°29.890'(934') WO87°22.208'(326')	Boya de Recalada	1.2
HOLBOX 4	N21°31.044' WO87°19.248'	Isla Pájaros	1.4
HOLBOX 5	N21°60.427' WO87°17.576'	<i>Punta Catalán</i>	0.5
HOLBOX 6	N21°29.291' WO87°15.776'	<i>Medio Laguna</i>	1.1
HOLBOX 7	N21°26.351' WO87°11.174'	<i>Yalikin</i>	1.2
HOLBOX 8	N21°25.847' WO87°13.742'	Río Bomba	< 0.5

Table 2. Recovery of reference material.

	High Purity Standards Orchard Leaves
Cadmium	0.95
S.D.	0.23
True value	1.25
% Recovery	76.0
Cromium	26.0
S.D.	1.99
True value	30.0
% Recovery	86.8
Iron	2.8
S.D.	0.02
True value	3.0
% Recovery	94.4

Table 3. Mean seasonal values of hydrological variables in Holbox lagoon.

Season	Salinity	NO ₃ (μM)	NO ₂ (μM)	NH ₄ (μM)	SiO ₄ (μM)
June 2004 Dry	40.8	0.69	0.10	2.8	58.8
January 2005, rainy	40.4	1.06	0.09	3.4	71.2

Table 4. Mean seasonal variations in morphological units of *Thalassia testudinum* in the Yalahau Lagoon, Holbox, Quintana Roo. Values in $\mu\text{g/g}$ wet wt.

	DRY season (June 2004)	RAINY season (January 2005)	Percent change (JANUARY-JUNE)
Leaf			
Cd	0.38	0.25	-34
Cr	2.1	0.40	-81
Fe	63.4	115.0	81
Root/rhizome			
Cd	0.28	0.05	-82
Cr	1.01	0.45	-55
Fe	80.0	255.0	218

These results are average values of three locations (Holbox 2, Holbox 4 and Holbox 7). The percent change is calculated from the difference between January and June values divided by the June values times 100. Holbox 7 was not taken into account in the case of Cadmium,

Table 5. Heavy metal concentrations (values in $\mu\text{g/g}$ wet wt) in *Thalassia testudinum*. Other results reported before are included for comparison.

Location	Fe (leaf)	Fe (root/rhi)	Cd (leaf)	Cd (root/rhi)	Cr (leaf)	Cr (root/rhi)
Thalassia testudinum from Yalahau Lagoon. (THIS STUDY)	63.4 (dry) 115 (rainy)	80 (dry) 255 (rainy)	0.38 (dry) 1.30 (rainy)	0.28 (dry) 0.40 (rainy)	2.1 (dry) 0.4 (rainy)	1.01 (dry) 0.45 (rainy)
Thalassia testudinum from Texas Laguna Madre. (Whelan III et al, 2005)	287 (summer) 169 (winter)	418 (summer) 113 (winter)				
Thalassia testudinum from the Mexican Caribbean, Puerto Morelos (Duarte et al, 1995)	62.5-80.6					
Background levels tropical localities (Indonesia) Nienhuis et al, 1986) **			0.16-0.68	0.12-0.25		
Thalassia testudinum from Guayanilla Bay (Shroeder and Thorhaug, 1980)	106	633/132	1.3	1.8/0.8		

** Natural background levels for Cd, Cu, Pb and Zn were estimated in 9 tropical seagrass species (*Cymodocea rotundata*, *C. serrulata*, *Thalassia hemprichii*, *Syringodium isoetifolium*, *Enhalus acoroides*, *Halolule uninervis*, *H. pinifolia*, *Thalassodendron ciliatum*, *Halophila ovalis*) from pristine coastal localities in the Flores Sea, Indonesia.

Figure 1. Location of sampling sites.

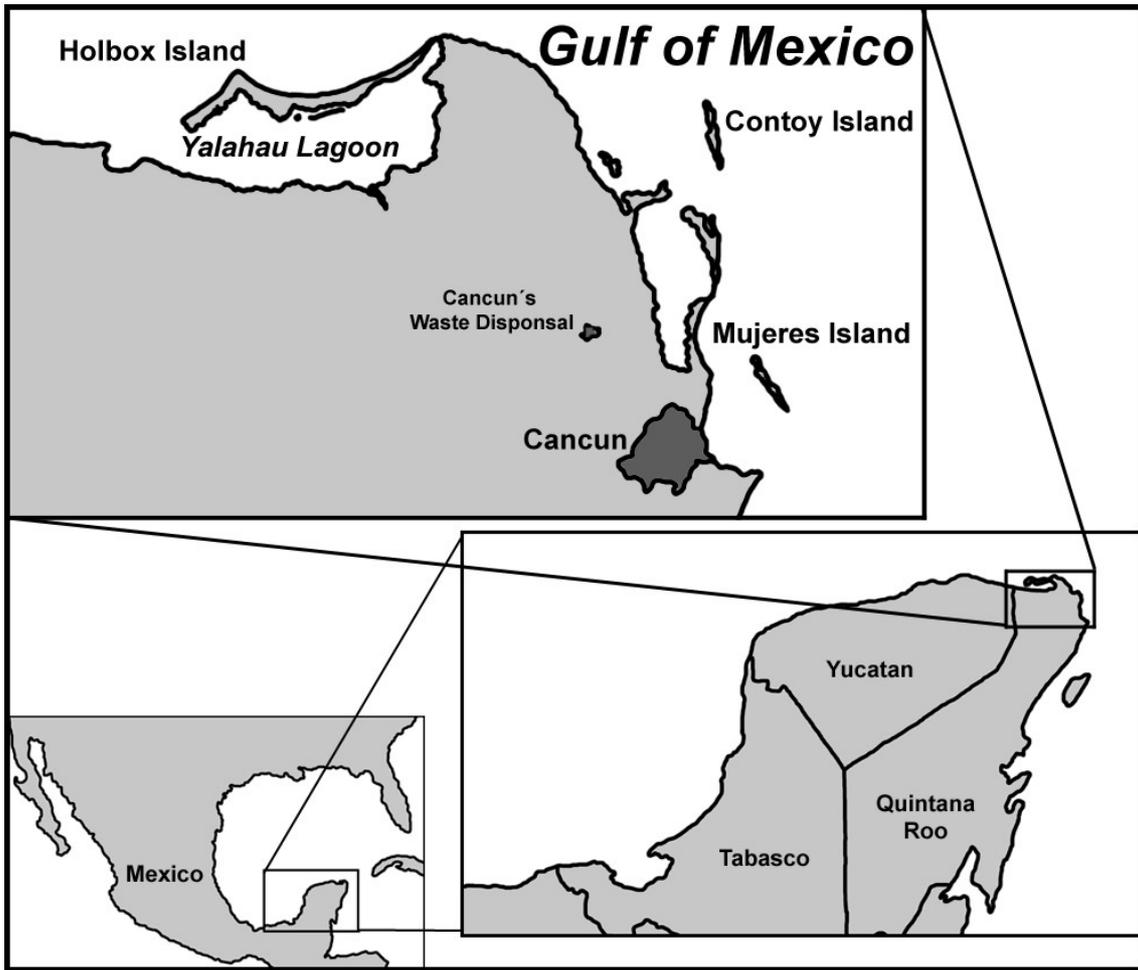


Figure 2. Aerial picture of sampling locations in the Yalahau lagoon.

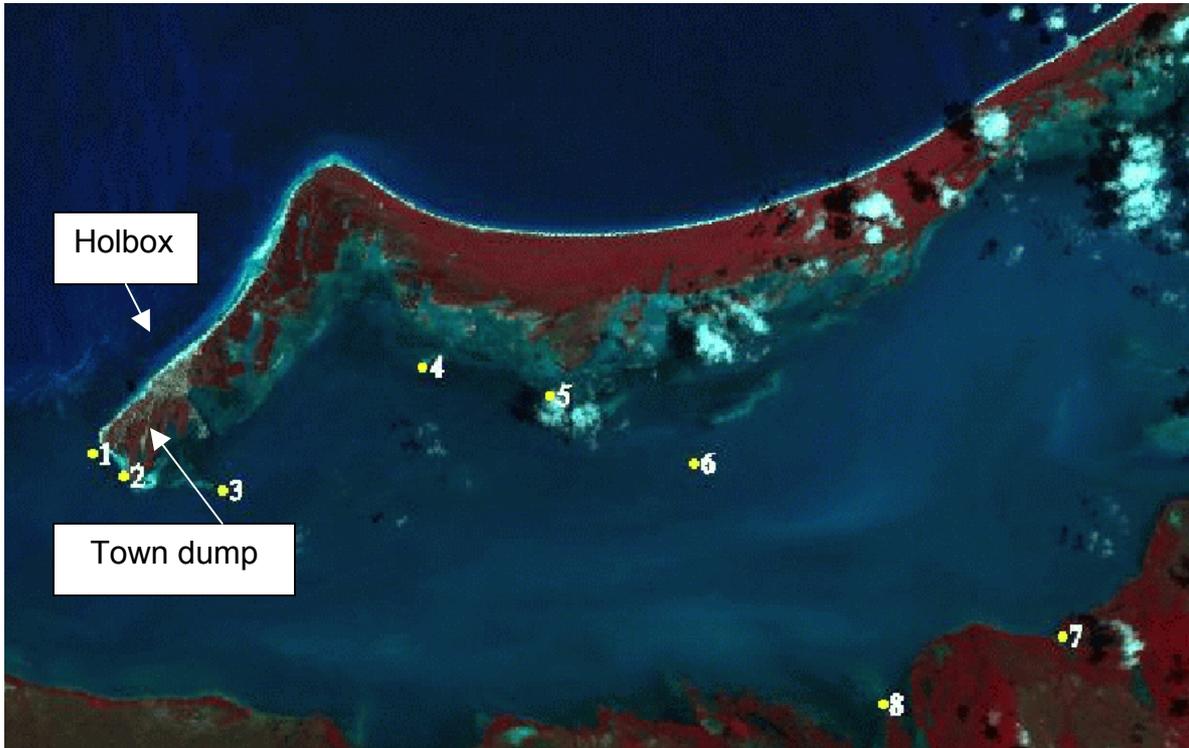
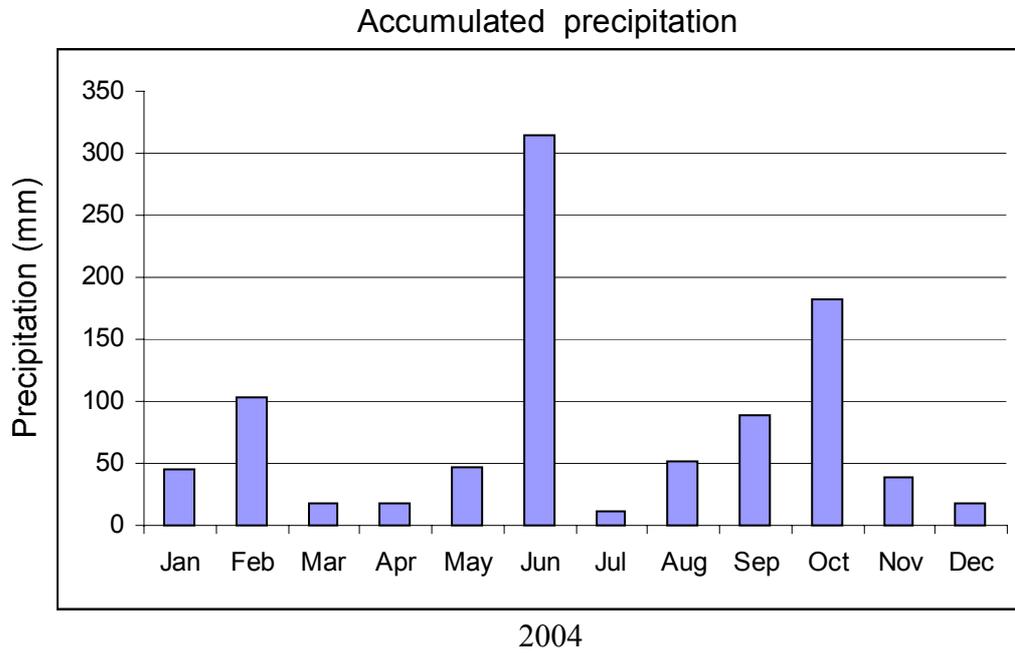


Figure 3. Monthly rainfall near Yalahau Lagoon during 2004



^A Francisco G Ruíz Renteria and José Edgar Escalante Mancera
SAHMUAPM (Servicio de Hidrografía y Meteorología de la Unidad Académica de Puerto
Morelos) ICMYL (del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología), UNAM-CARICOMP
(Caribbean Coastal Marine Productivity Project)

Figure 4. Salinity (a), silicate (b) and dissolved Inorganic Nitrogen (DIN) during the dry (c) and rainy(d) seasons at the sampled stations.

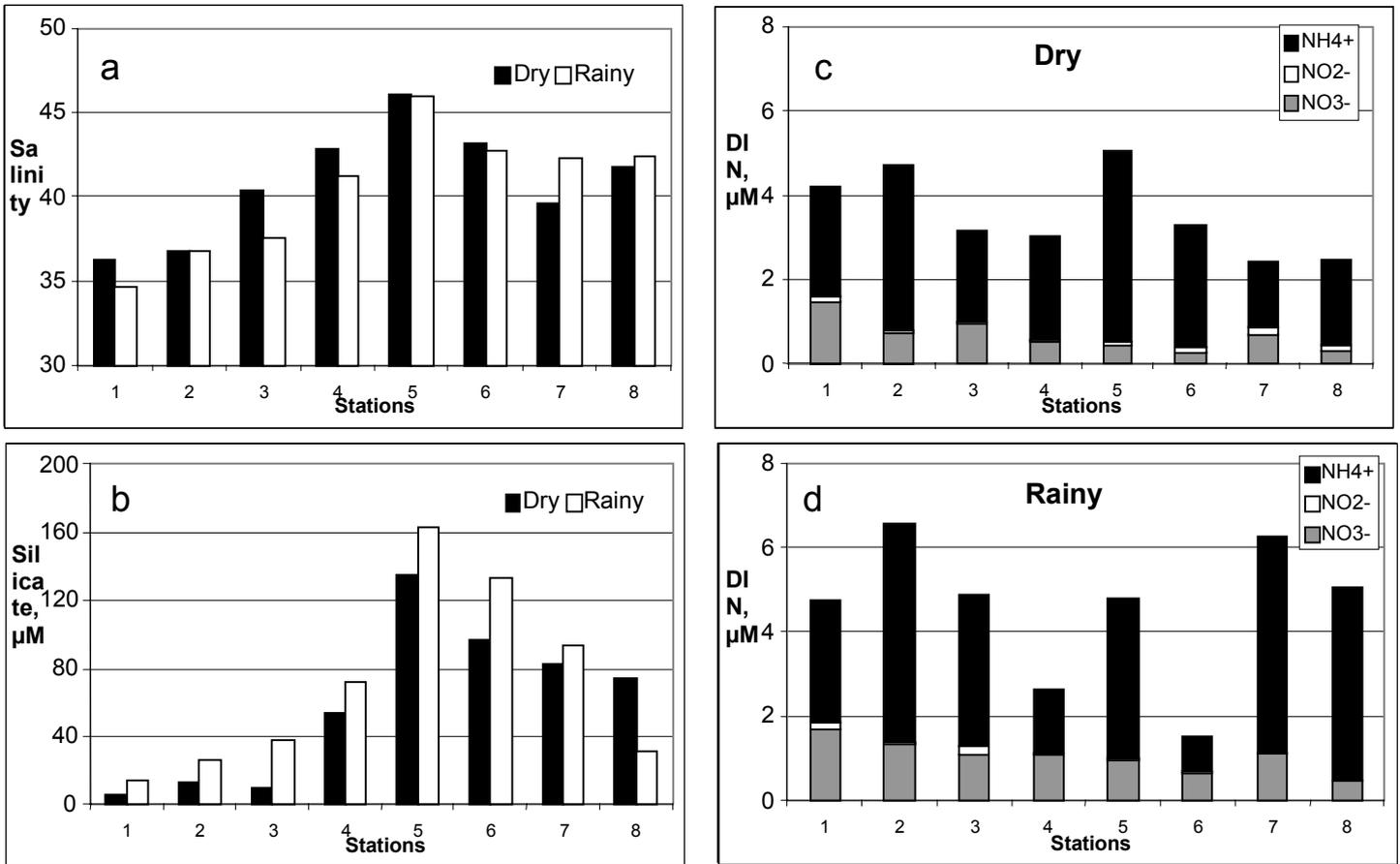
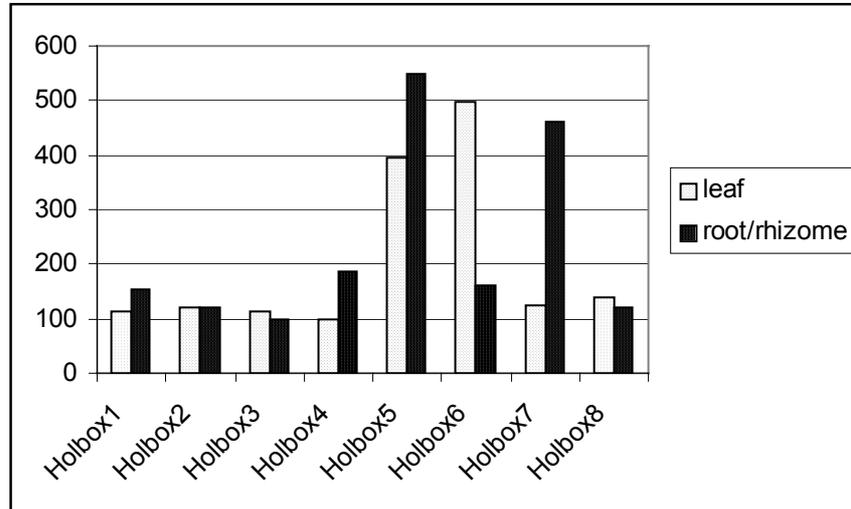
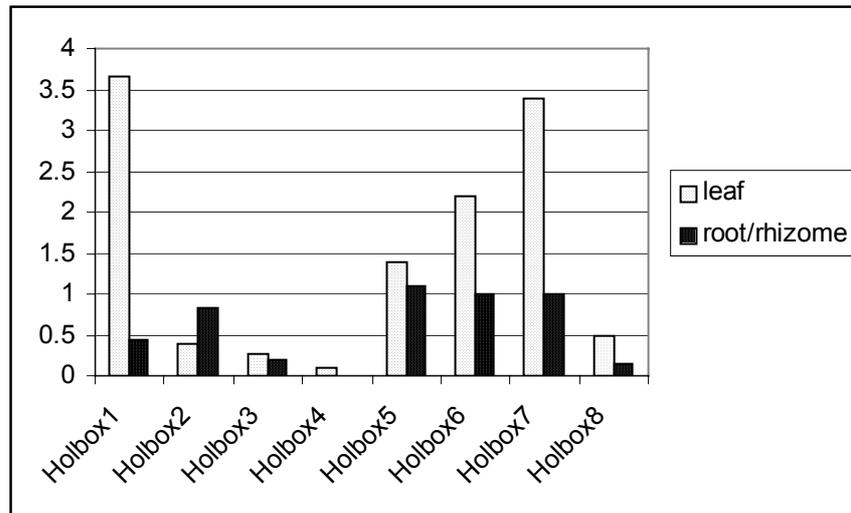


Figure 5. Iron content in leaf and root-rhizome system of *Thalassia testudinum* at eight stations sampled during January 2005 at Yalahau lagoon. Values in $\mu\text{g/g}$ wet wt..



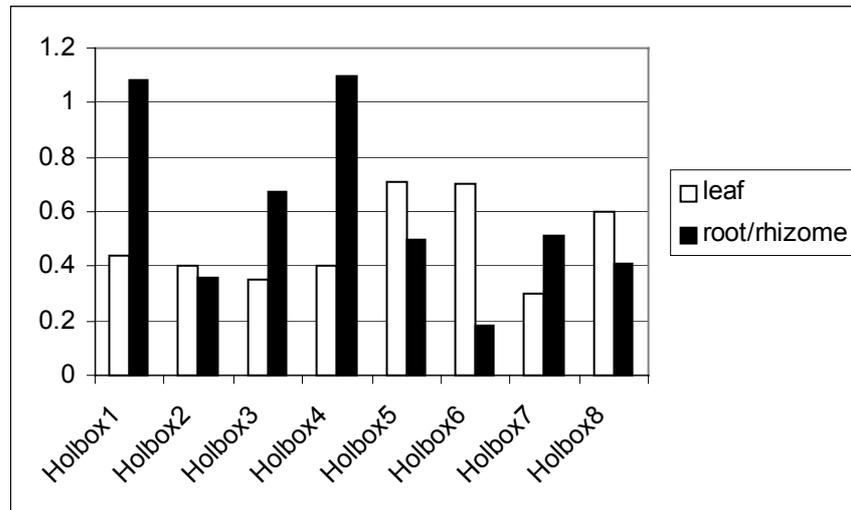
IRON, JAN	Holbox1	Holbox2	Holbox3	Holbox4	Holbox5	Holbox6	Holbox7	Holbox8
leaf	113	119	114	100.5	395	497	126	140
root/rhizome	152	120	98.8	185	547	161	461	120

Figure 6. Cadmium content ($\mu\text{g/g}$ wet wt) in leaf and root-rhizome system of *Thalassia testudinum* at eight stations sampled during January 2005 at Yalahau lagoon.



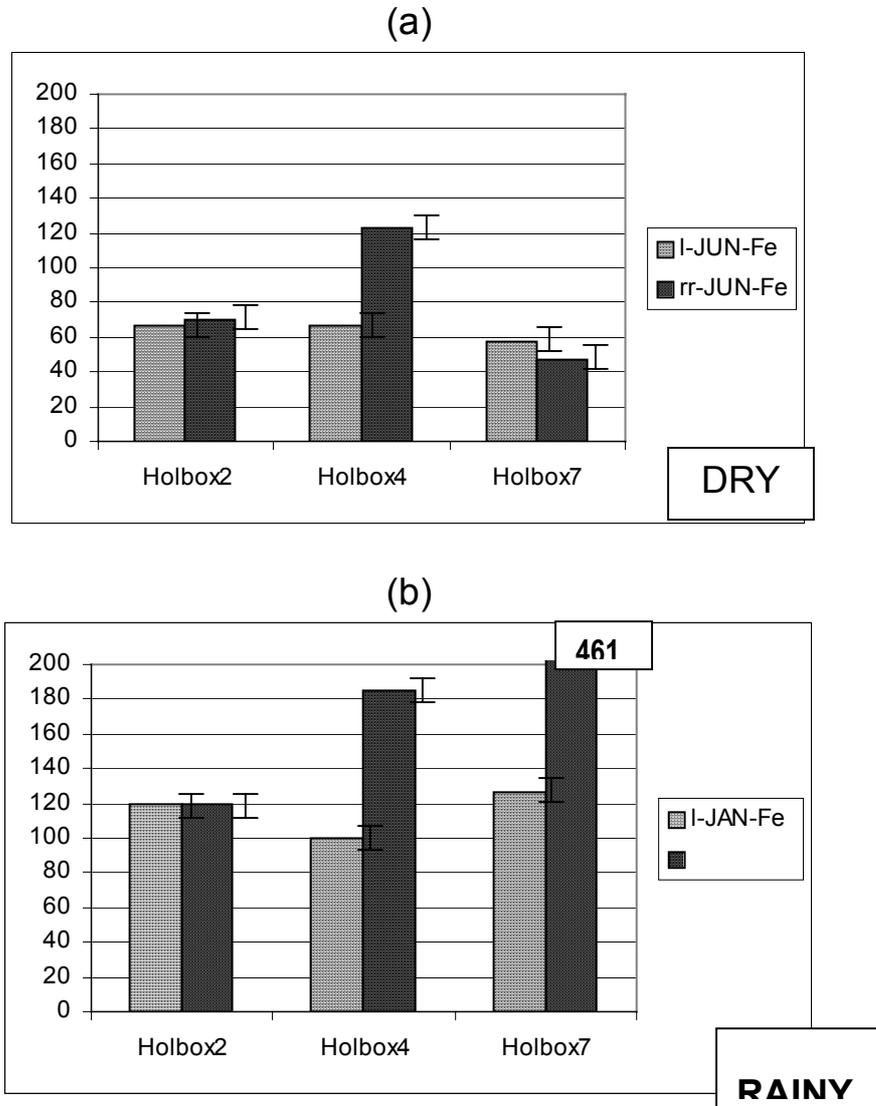
CADMIUM-JAN	Holbox1	Holbox2	Holbox3	Holbox4	Holbox5	Holbox6	Holbox7	Holbox8
leaf	3.65	0.4	0.27	0.09	1.4	2.2	3.4	0.5
root/rhizome	0.43	0.83	0.2	0.001	1.1	1	1	0.15

Figure 7. Chromium content ($\mu\text{g/g}$ wet wt) in leaf and root-rhizome system of *Thalassia testudinum* at eight stations sampled during January 2005 at Yalahau lagoon.



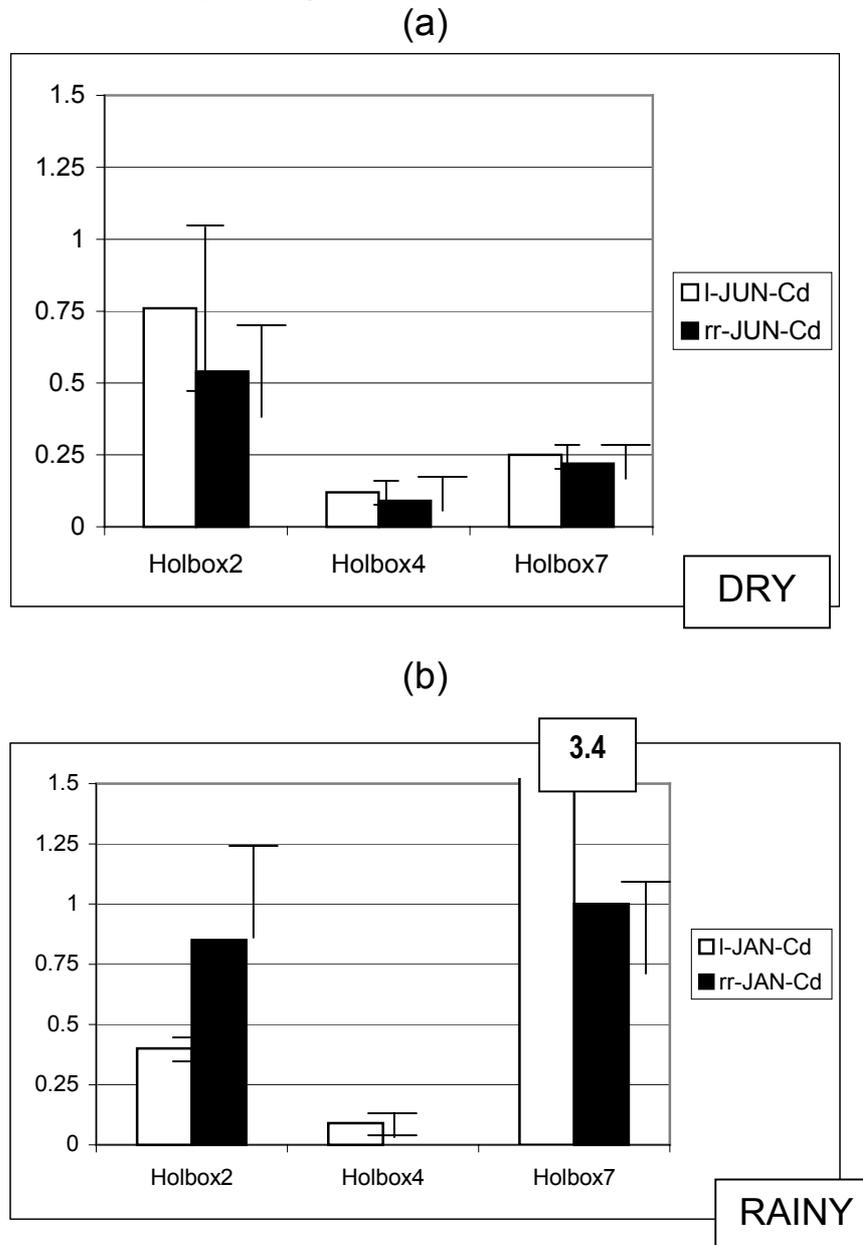
CHROMIUM-JAN	Holbox1	Holbox2	Holbox3	Holbox4	Holbox5	Holbox6	Holbox7	Holbox8
leaf	0.44	0.4	0.35	0.4	0.71	0.7	0.3	0.6
root/rhizome	1.08	0.36	0.67	1.1	0.5	0.18	0.51	0.41

Figure 8. Iron content ($\mu\text{g/g}$ wet wt) in leaf and root-rhizome system of *Thalassia testudinum* at three stations in Yalahau lagoon. a) DRY season, (June 2004); b) RAINY season (January, 2005)



IRON June	Holbox2	Holbox4	Holbox7
I-JUN-Fe	67	67	57
rr-JUN-Fe	70	123	47
IRON January	Holbox2	Holbox4	Holbox7
I-JAN-Fe	119	100.5	126
rr-JAN-Fe	120	185	461

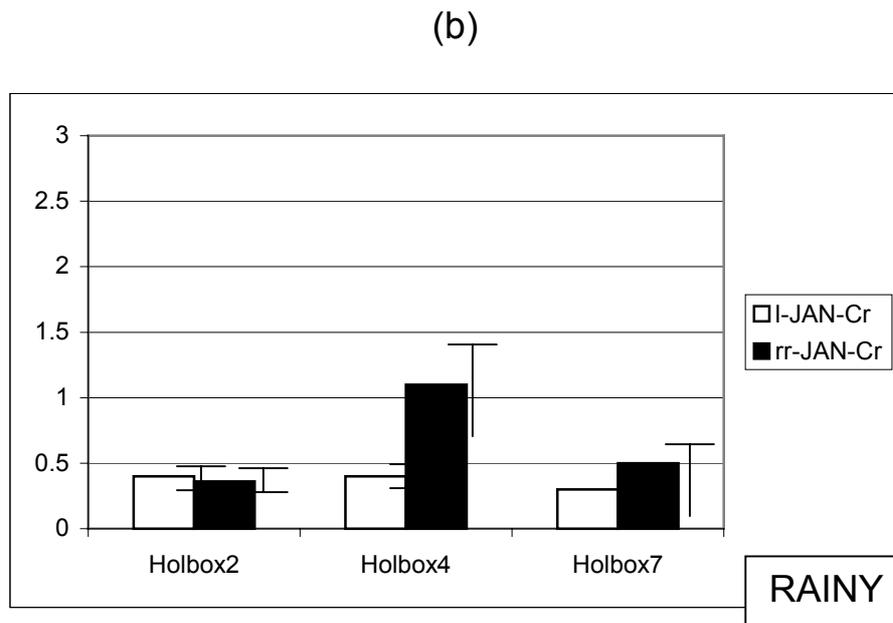
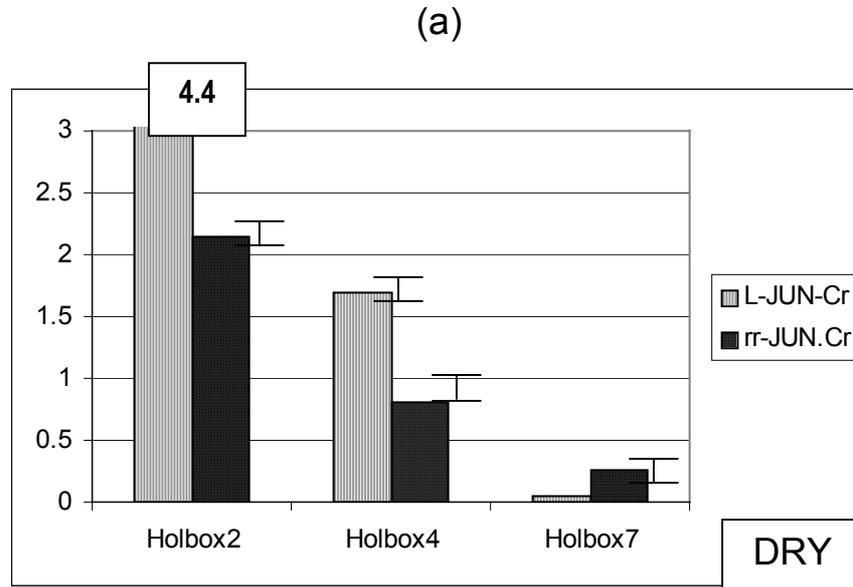
Figure 9. Cadmium content ($\mu\text{g/g}$ wet wt) in leaf and root-rhizome system of *Thalassia testudinum* at three stations in Yalahau lagoon. a) DRY season, (June 2004); b) RAINY season (January, 2005)



Cadmium	Holbox2	Holbox4	Holbox7
I-JUN-Cd	0.76	0.12	0.25
rr-JUN-Cd	0.54	0.09	0.22

Cadmium	Holbox2	Holbox4	Holbox7
I-JAN-Cd	0.4	0.09	3.4
rr-JAN.Cd	0.85	nd	1

Figure 10. Chromium content ($\mu\text{g/g}$ wet wt) in leaf and root-rhizome system of *Thalassia testudinum* at three stations in Yalahau lagoon. a) DRY season, (June 2004); b) RAINY season (January, 2005)



Chromium	Holbox2	Holbox4	Holbox7
L-JUN-Cr	4.4	1.7	0.05
rr-JUN.Cr	2.15	0.81	0.26
Chromium	Holbox2	Holbox4	Holbox7
l-JAN-Cr	0.4	0.4	0.3
rr-JAN-Cr	0.36	1.1	0.5