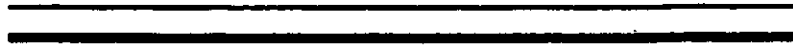


99

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



CAMPUS "IZTACALA"

EVALUACIÓN DE METALES PESADOS EN DOS SISTEMAS
BENTÓNICOS ARRECIFALES DE VERACRUZ, VER.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

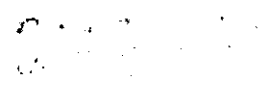
B I O L O G O

P R E S E N T A

T O V A R J U Á R E Z E D G A R



DIR: M. EN C. GUILLERMO HORTA PUGA



IZTACALA TLALNEPANTLA, ESTADO DE MÉXICO 2000



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.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida y estar a mi lado siempre.

A mis padres Candelario Tovar y Concepción Juárez por su amor, apoyo y confianza que me han brindado durante mi vida.

A mi abuelita Elisa por su amor incondicional.

A mis hermanos Iván, Gerardo, Zaira, Diana y Edith por su apoyo y amor fraternal que nos une.

A Tania Garfias por todo el amor, amistad, paciencia, ayuda y comprensión que ha sido para mi un aliciente para continuar.

Y a mis amigos Delia Rojas, Sandra Bolaños, Luis Guevara, César Sánchez, Gilberto Acosta, Martha Miranda, Ignacio Leyva y Eduardo Palacios que a pesar de todo estuvieron siempre.

AGRADECIMIENTOS

Por la revisión del presente trabajo al M. en C. Guillermo Horta, así como por sus consejos, su amistad y ejemplo, que han influido en mi desarrollo profesional.

A la Fundación UNAM por el apoyo para la realización de este trabajo.

A la Dra. Patricia Dávila y a la UBIPRO por todo el apoyo y confianza para la realización de este trabajo.

A mis sinodales Dr. Ignacio Peñaloza, a la Biol. Asela del C. Rodríguez, al M. en C. Cesar Mateo Flores y al Biol. Ángel Morán por sus valiosos comentarios los cuales contribuyeron al enriquecimiento de este trabajo.

A todos los profesores de la carrera de Biología y de manera muy especial a los que influenciaron determinadamente mi formación profesional, al Biol. Roberto Rico, al M. en C. Sergio Stanford y al M. en C. Hugo Perales y a quienes admiro.

De manera muy especial al algún día Biol. Gilberto Acosta por el apoyo y ayuda para la realización del trabajo en campo y laboratorio y por los buenos y malos momentos que nos hicimos pasar.

Al los integrantes del proyecto INVEMAR.

A los BIOSFERANOS y a los simples mortales por intentarlo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	8
OBJETIVOS.....	10
DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
DISEÑO EXPERIMENTAL.....	14
COLECTA DE MUESTRAS.....	16
GASTRÓPODOS Y EXCRETAS.....	16
PLANTAS Y ALGAS.....	17
SEDIMENTO.....	18
CONGELACIÓN DE MUESTRAS.....	18
PRETRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS.....	18
GASTRÓPODOS.....	18
PLANTAS Y ALGAS.....	19
SEDIMENTO.....	19
EXCREMENTO.....	20
DIGESTIÓN QUÍMICA.....	20
ANÁLISIS INSTRUMENTAL.....	22
ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	24
RESULTADOS.....	26
DISCUSIÓN.....	35
CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS.....	54
ANEXO.....	62

INTRODUCCIÓN

La condición química y física de la tierra está caracterizada por procesos dinámicos de transporte y transformación. Este dinamismo es una característica única en el sistema solar y provee a la tierra de condiciones propicias para el desarrollo y el sustento de la vida (Odum, 1972).

Desde el punto de vista de la tierra como un todo, existen dos procesos que mantienen la vida en ella, los flujos de energía y los ciclos químicos. La energía entra de manera ilimitada a la mayoría de los ecosistemas en forma de luz solar, y es convertida en energía química por los organismos autótrofos, pasada a los heterótrofos como compuestos orgánicos, y finalmente disipada en forma de calor (Campbell, 1992; De Angelis, 1992).

Esencialmente los elementos químicos tienen un abastecimiento limitado ya que no existe alguna fuente extraterrestre que abastezca a la tierra de nuevos elementos, excepto por los ocasionales meteoritos. La continuación de la vida en la tierra depende entonces del reciclaje de los elementos químicos. Los organismos toman solamente prestados los átomos que los constituyen. Incluso mientras que un organismo esta vivo, mucha de su composición química es intercambiada continuamente a través de la continua incorporación de nutrientes y el desalojo de desechos. Los átomos presentes en las moléculas de un organismo, al tiempo de su muerte, son retornados por los descomponedores (transformándolos de nuevo a su forma elemental) a la atmósfera, agua o suelo. Este proceso restablece las concentraciones de los compuestos inorgánicos en los "reservorios"

de donde las plantas y otros autótrofos los vuelven a usar para construir nueva materia orgánica (Campbell, 1992).

Puesto que los elementos pueden volver a ser utilizados, este reciclaje de elementos recibe el nombre de ciclo biogeoquímico. "Bio" alude a los organismos vivos y "geo" alude a las rocas, el aire y el agua de la tierra. Los ciclos biogeoquímicos son entonces, un proceso vinculado a la composición química de la tierra y a las características físicas y biológicas de un ecosistema, en donde los elementos son intercambiados con trayectorias mas o menos recurrentes desde el componente abiótico (suelo, agua y aire), hasta el componente biótico (plantas y animales) y viceversa (Odum, 1972; Winemiller y Polis, 1996).

La ruta específica del ciclo de un elemento depende de la estructura trófica del ecosistema, ya que los cuerpos de los organismos son excelentes fuentes de energía ricos en elementos que pueden ser usados como "combustible" para la maquinaria de otros organismos.

Desde las primeras formas de vida en la tierra algunos organismos han obtenido su energía y materiales por medio del consumo de otros organismos. La mayor dinámica en el mundo actual está dominada por las relaciones consumidor - recurso. Existe una serie muy compleja de interrelaciones de este tipo entre los millones de especies que habitan en la tierra. Para el propósito del estudio de los ciclos biogeoquímicos, muchas de estas complejas relaciones pueden ser ignoradas y los organismos pueden ser agrupados en categorías mayores basándose en su fuente de energía.

De acuerdo a este concepto, el agrupamiento de los organismos es llamado clasificación por nivel trófico. Los mayores niveles tróficos en los ecosistemas son:

Productores: organismos capaces de sintetizar sustancias orgánicas a partir de la energía solar y/o materiales inorgánicos. Entre estos organismos se incluyen el fitoplancton, algas, plantas y las bacterias.

Consumidores: principalmente animales, que dependen directa o indirectamente de los productores. En este grupo, se encuentran los herbívoros, los que se alimentan de plantas, y los carnívoros, los cuales se alimentan de herbívoros o de otros carnívoros.

Descomponedores: incluye a las bacterias heterotróficas y los hongos que desintegran las sustancias orgánicas hasta el estado elemental, de este modo los nutrientes regresan al medio y pueden ser utilizados nuevamente por los productores.

La importancia de las relaciones tróficas en un ciclo biogeoquímico radica en el hecho de que la composición química de todos los organismos es similar, por ejemplo, la composición elemental de una alga en términos de carbón, nitrógeno y fósforo se da de la siguiente relación atómica: $C_{106} : N_{10} : P$ (Radfield, 1963, citado en Staley y Orians, 1992). Los organismos de los demás niveles en la cadena trófica, desde los productores hasta los descomponedores tienen una composición elemental similar. La estequiometría de esta relación exige ciertas demandas tanto a los productores como a los consumidores, ya que ellos deben tener en su dieta niveles adecuados de estos y otros elementos esenciales para elaborar, regenerar sus tejidos y generar energía necesaria para sus funciones de crecimiento, conservación, reproducción y movimiento (Staley y Orians, 1992).

Desgraciadamente no todos los elementos químicos en la naturaleza son benéficos para los organismos, tal es el caso de algunos metales pesados.

El término metal pesado se refiere esencialmente a aquellos elementos metálicos, que en su forma elemental tienen pesos específicos mayores de 5. Aunque algunos metales como el Cr, Cu, Ni, Zn, en bajas concentraciones son constituyentes naturales de los organismos, algunos otros como el Cd y el Pb no son constituyentes naturales y la presencia de estos elementos puede provocar en los organismos alteraciones fisiológicas, tales como desordenes neurofisiológicos, alteración de actividades enzimáticas, efectos teratogénicos, mutagénicos, desarrollo de parásitos y enfermedades, fallas en la reproducción y en algunos casos la muerte (Bryan, 1971; Mandelli, 1979; Viarengo, 1985; Ober *et al.*, 1987).

De manera natural los metales pesados se presentan en el ambiente en concentraciones del orden de las ppm (partes por millón) y las ppb (partes por billón). Estas concentraciones no representan peligro alguno para los organismos ya que muchos de ellos han desarrollado mecanismos de exclusión para estos elementos. Sin embargo las actividades domésticas e industriales han incrementado los niveles de metales en el ambiente; efluentes industriales, descargas residuales, residuos de fertilizantes y depositaciones atmosféricas secas y húmedas provenientes de la combustión de combustibles fósiles, son los principales procesos responsables del aumento de los metales en el ambiente. El problema se agrava cuando algunos de los elementos que a concentraciones naturales son benéficos o inocuos, ya sea por actividades antropogénicas o

naturales, exceden sus concentraciones naturales, convirtiéndose en elementos altamente peligrosos para los organismos (Mandelli, 1979).

Algunos organismos han desarrollado mecanismos de ajuste para eliminar o neutralizar estos elementos (Nott y Nicolaidou, 1996), sin embargo y a pesar de ello, no hay modo que las membranas vivientes puedan funcionar con eficiencia en el intercambio de materiales vitales y al mismo tiempo ser totalmente selectivas respecto a lo que es "bueno" o "malo". Aún si los metales nocivos no son letales se coloca al organismo en una situación energética crítica, ya que debe gastar energía adicional para neutralizar, separar o expeler el veneno (Odum, 1972).

Si bien todos los ecosistemas están expuestos a este problema, el medio marino es el ecosistema más susceptible. El incremento de los niveles de metales en la hidrosfera a tomado tintes dramáticos, debido en gran medida a que el mar es utilizado como tiradero y vertedero de cualquier tipo de desecho (Forstner y Wittman, 1979; Mandelli, 1979; Babich y Stotzky, 1983).

Uno de los ecosistemas costeros o cercanos a la línea de costa más vulnerables a la contaminación por metales son los arrecifes coralinos (Howard y Brown, 1984).

Un arrecife coralino es uno de los ecosistemas más complejos y mejor adaptado, en el, los elementos son reciclados con gran eficiencia entre todos los componentes del sistema, esta eficiencia en el reciclado de nutrientes se debe a que los arrecifes se desarrollan en aguas tropicales generalmente oligotróficas, de tal modo que no requiere una

taza elevada de fertilización del exterior. Las fuentes principales de elementos en estos ecosistemas son los sedimentos, el agua y los mismos organismos que habitan el arrecife, confiriéndole a este ecosistema un alto grado de autosuficiencia (Webb *et al.*, 1977; Meyer y Schultz, 1985). Aún con la aparente limitación de nutrientes, el arrecife es uno de los ecosistemas de mayor productividad; pero ¿qué sucede cuando este equilibrio es alterado por el incremento de metales pesados en el medio arrecifal?. Desgraciadamente se conoce muy poco acerca de la dinámica que tienen los metales pesados en el ecosistema arrecifal.

En el presente trabajo se presenta una fracción de la interacción de siete metales (Al, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) en la biota bentónica de dos arrecifes coralinos del Sistema Arrecifal Veracruzano, La Gallega y el Verde, influenciados por el vertido de desechos de la zona industrial, la ciudad y Puerto de Veracruz (Carricart y Horta, 1993; Horta 1998, en prensa). Esta interacción se representó como una relación lineal unidireccional (sedimento→ productores primarios→ consumidores primarios→ excretas). Para tal motivo se utilizaron organismos característicos de los ambientes bentónicos costeros y arrecifales del Golfo de México y de gran parte del Atlántico tropical (Carefoot, 1987) y que además cumplen con las características consideradas para el análisis químico como son: gran capacidad de acumular contaminantes, biomasa suficientemente y abundante que permita la colecta de muestras de adecuado tamaño para ser analizadas, presencia de las especies en el ambiente en todas las temporadas del año y tamaño individual que permita que se tomen algunos organismos para su análisis sin afectar su población entera (Ravera y Riccardi, 1997) y lo más importante que presentan una relación trófica entre sí. De esta manera, las especies que cumplieron con estas premisas fueron las algas *Dichtyota volubilis* y *Ceritium crinale* y el pasto marino *Thalassia testudinum* (productores primarios), el

gastropodo *Aplysia dactilomela*, (consumidor primario); además se analizaron dos factores que se relacionan con estos organismos: el sedimento y las excretas del gastropodo.

El interés de este trabajo no es simplemente académico ya que mucha de la literatura acerca de las concentraciones de metales en el ambiente marino contiene una lista de datos, de los cuales el autor no comenta alguna significancia de ellos; la transferencia de los metales de un lugar a otro es más importante para averiguar la estructura y función que tienen los metales en el ecosistema de lo que son las cantidades presentes en cualquier momento en algún lugar. Los arrecifes de coral son ecosistemas con una gran diversidad, además de ser sustento de unas de las pesquerías más importantes del país.

ANTECEDENTES

El estudio de los metales pesados en el ambiente ha tomado interés desde hace 47 años, después de un accidente ocurrido en la bahía de Minamata en Japón, en donde una fábrica de plásticos vertió desechos que contenían altas concentraciones de mercurio a las aguas de la bahía, dando como resultado cerca de 100 personas enfermas y docenas más murieron a causa de la ingestión de pescados contaminados con el metal (Mailman, 1980). A partir de entonces se han realizado una gran cantidad de trabajos acerca de los niveles de metales en el ambiente marino, algunos de estos trabajos han sido compilados por Forstner y Wittman (1979), Mandelli (1979), Trefry (1981) y Waldichuk (1989).

La mayor parte de los trabajos acerca de metales pesados en el ambiente acuático hacen referencia a las cantidades elementales y no a la dinámica ambiental de estos elementos, que si bien son importantes, no contemplan su dinámica en el ambiente.

Existen algunos trabajos como los de Wiebe *et al.* (1975), Entsch *et al.* (1983), Williams *et al.* (1985) y D'elia (1988) en los que detallan algunos ciclos biogeoquímicos y de su transferencia a nivel trófico, principalmente de elementos como el C, N y P en el ambiente arrecifal; sin embargo, trabajos similares en donde se incluyan metales pesados son muy escasos o inclusive nulos.

Algunos otros trabajos han aportado información acerca de la dinámica trófica de algunos metales, que si bien no han sido realizados en arrecifes de coral, sí se han realizado en el ambiente acuático (Brooks y Rumsby, 1965; Jennings y Rainbow, 1979; Schroeder y

Thorhaug, 1980; Tesier *et al.*, 1984; Nott y Nicolaidou, 1990; Ciceri *et al.*, 1992; Ettajani *et al.*, 1992; Miller *et al.*, 1992; Weis y Weis, 1993; Francesconi *et al.*, 1994; Van Haaften y Lasenby, 1994; Wallace, 1996; Paucot y Wollast, 1997; González *et al.*, 1998).

Es importante señalar que algunos trabajos en los que sólo se evalúan las cantidades de metales ya sea en el medio arrecifal o en el medio marino en general, aportan también información importante. De esta manera, se destacan los trabajos en arrecifes de coral de Loya (1975), Howard y Brown (1984), Denton y Burdon-Jones (1986), Guzmán y Jiménez (1992) y Horta Puga y Ramírez Palacios (1996); los trabajos en sedimento marino de Campbell y Tessier (1990), Greenaway y Rankine (1992), Villanueva y Botello (1992), Arjonilla y Gómez Parra (1994), González *et al.* (1994), Sfriso *et al.*, (1995) y Villanueva y Paez Ozuna (1996); los trabajos de Black y Mitchell (1952), Bryan (1969), North (1980), Kureishy (1992), Garnham *et al.* (1992), Güven *et al.* (1993) y Karez *et al.* (1994) en algas marinas; los trabajos de Drifmeyer *et al.* (1980), Pulich (1980), Lyngby *et al.* (1982), Botello y Villanueva (1983), Brix *et al.* (1983), Brix y Lyngby (1983), Wahbeh (1984) y Nienhuis (1986) en pastos marinos; los trabajos de Segar y Riley (1971), Mason y Simkiss (1983), Szefer (1986), Langston y Zhou (1987), Ober *et al.* (1987), y Rainbow *et al.* (1990) en gastrópodos y los trabajos realizados con excretas de Boothe y Knauer (1972) y Nott y Nicolaidou (1996).

El presente trabajo pretende contribuir al conocimiento del comportamiento de los metales pesados en la biota arrecifal del Sistema Arrecifal Veracruzano.

OBJETIVOS.

1. Determinar la concentración de los metales pesados Al, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en algunos componentes de una cadena trófica como son, las algas *Dicthyota volubilis* y *Cerithium crinale*, la fanerógama *Thalassia testudinum*, el gastrópodo *Aplysia dactylomela*, los excrementos de este gastrópodo, y en un componente relacionado con éstos como es el sedimento, todos los anteriores, pertenecientes a dos ecosistemas bentónicos de los arrecifes La Gallega y El Verde del Sistema Arrecifal Veracruzano.
2. Establecer, con las concentraciones de metales presentes, si existe, una relación, entre los componentes antes mencionados de una cadena trófica bentónica arrecifal.
3. Determinar si existe diferencia en las concentraciones de metales entre los dos arrecifes: uno altamente influenciado por actividades antropogénicas (La Gallega) y otro considerado como poco influenciado (Isla Verde).

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), se localiza frente al Puerto de Veracruz y de la población de Antón Lizardo, incluye dos áreas geográficamente separadas por la desembocadura del río Jamapa-Atoyac; la primera se localiza frente al puerto de Veracruz y comprende los arrecifes Anegada de Adentro, Blanquilla, Gallega, Galleguilla, Hornos, Punta Gorda, Punta Mocambo, Sacrificios y el Verde; es un complejo formado por bajos, islas y arrecifes situados en la porción interna de la plataforma continental (Fig. 1) que se elevan desde profundidades cercanas a los 40m. (PEMEX, 1987; Vargas-Hernández *et al.*, 1993).

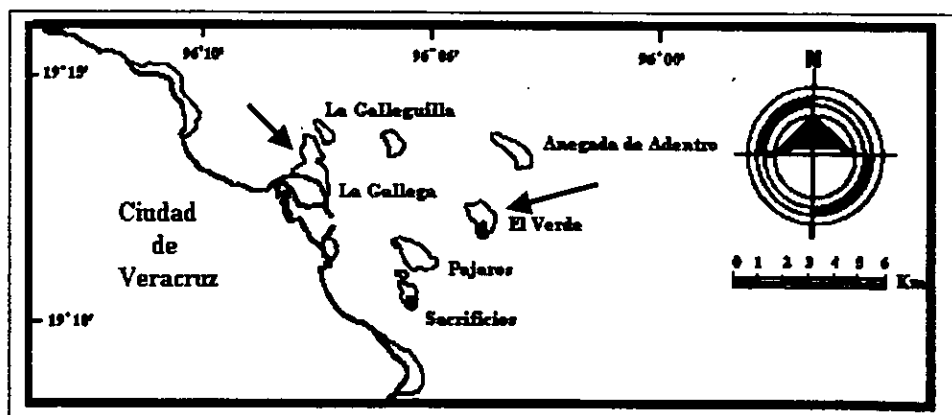


Fig. 1. Ubicación de los arrecifes en la costa de Veracruz, Ver. Los arrecifes señalados fueron seleccionados para su estudio.

Los arrecifes están contruidos en un banco de restos bioclásticos calcáreos de materiales coralinos pertenecientes al Pleistoceno. La principal característica física en común entre los arrecifes del SAV es su posición y forma; su alargamiento en el sentido

NW a SE es debido a la dirección del oleaje (Emery, 1963). Las lagunas arrecifales rara vez exceden los 2m de profundidad y en general conservan un promedio de 1.10m.

Los datos climáticos del Centro de Previsión del Golfo en Veracruz, Ver., que cuentan con anotaciones y promedios de mas de 50 años, han permitido considerar el clima de la zona de estudio como caliente-húmedo con lluvias en verano, correspondiente a un clima A(W2'')(W)(i'). El esquema climático del área puede sintetizarse en 2 épocas del año. 1- La época de nortes que abarca desde Septiembre hasta Abril, con escasa precipitación, temperatura baja y frecuentes invasiones de masas de aire frío del norte, que por cuya fuerza pueden ser desde vientos frescos hasta vientos violentos huracanados de hasta 120 Km./h. Son tan drásticas las modificaciones producidas durante el invierno que la recuperación de los elementos de la biota arrecifal se inicia en Marzo y alcanza su máximo desarrollo hasta los meses de Mayo a Julio. 2- La época de lluvias de Mayo a Agosto es un periodo cálido caracterizado por temperatura elevada, con vientos débiles del Este que soplan más o menos permanentemente. La precipitación promedio anual es de 1,676.6 mm.

Otros datos incluyen: 35 días de tormenta, 124 días nublados y 75 días soleados al año. Los promedios oceanográficos anuales para el SAV son: salinidad 34.4 ‰; densidad 1.0257 g/cm³; temperatura de superficie 26.0 °C; y oxígeno disuelto 4.6-5.6 ml/l⁻¹.

La corriente principal en el área es en dirección noroeste con una velocidad de 0.7 kn. Esta corriente es en temporada de verano, pero se puede formar en cualquier temporada

una contracorriente en dirección sur-sureste con una velocidad de 0.7 kn (Nowlin, 1971 y SECMAR, 1974 citados en Horta *et al.*, 1998 en prensa).

Las características particulares de los arrecifes estudiados son las siguientes:

La Gallega. Es un arrecife de tipo plataforma y se localiza a $19^{\circ} 13' 13''$ N y $96^{\circ} 07' 37''$ W, actualmente se encuentra unido al puerto de Veracruz por una escollera construida a principios de siglo; su eje más largo es en dirección NW-SE con 2.37 Km. y su parte más ancha mide 1.25 Km.; en su extremo sur se encuentran construidos el castillo de San Juan de Ulúa y una serie de edificaciones para el funcionamiento adecuado del puerto (Carricart Ganivet y Horta Puga, 1993).

El Verde. Es un arrecife de tipo plataforma y se localiza a $19^{\circ} 11' 50''$ N y $96^{\circ} 04' 06''$ W, a 5.37 Km de la costa más cercana; su eje más largo es en dirección NW-SE con 1.12 Km. y su parte más ancha mide 750 m; en su extremo Sur presenta un pequeño cayo de 225 m de longitud por 125 m de anchura, conocido como Isla Verde (Fig. 1) (Carricart Ganivet y Horta Puga, 1993).

MATERIALES Y MÉTODOS

DISEÑO MUESTRAL

Para la realización del presente estudio se establecieron dos locaciones de muestreo los arrecifes La Gallega y El Verde. Dichas locaciones fueron elegidas por su cercanía a la ciudad y Puerto de Veracruz (Fig. 1), por su diferente grado de impacto antropogénico (Carricart Ganivet y Horta Puga, 1993; Horta *et al.*, 1998 en prensa; Horta Puga y Ramírez Palacios, (1996) y porque ambos arrecifes comparten las características (en cuanto a la biota principalmente) de todos los demás arrecifes pertenecientes al SAV.

La colecta de organismos se llevó a cabo en dos muestreos, en los meses de Abril y Mayo de 1998. La elección de los organismos se basó en las relaciones tróficas entre ellos y las cualidades de estos para el análisis de laboratorio. Aunque no existen datos que indiquen el tamaño de la población de *Aplysia dactilomela* en los arrecifes, el número de muestras se determinó de acuerdo a las posibilidades de análisis del laboratorio, tratando de que el número de muestras fuera estadísticamente aceptable para el trabajo. Así se colectaron un total de diez gastrópodos por cada arrecife. Para la colecta no se establecieron estaciones de muestreo dado que los gastrópodos se desplazan continuamente en las zonas de pasto marino (*T. testudinum*) durante el día; de manera que se recorrió la zona de pastos de cada arrecife y donde se encontraron fueron colectados. Cercano al área de colecta de los gastrópodos (aproximadamente de 4m de diámetro del sitio donde se encontró al gastrópodo) se colectaron además 4 diferentes tipos de muestras relacionadas tróficamente con los gastrópodos (consumidor primario), considerándolas como parte de una cadena trófica "unidireccional" (sedimento→ productores primarios→ consumidores primarios→

excretas). Siguiendo esta premisa, se colectaron sedimentos (como fuente de metales), las algas *Dichyota volubilis* y *Ceritium crinale* (componentes de la dieta del gastrópodo obs. pers). y el pasto marino *Thalassia testudinum* (alimento ocasional del gastrópodo) (Carefoot, 1987) como productores primarios, y las excretas del gastrópodo (Fig. 2).

La determinación de los metales Al, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn se debió a que son algunos de los metales utilizados con mayor frecuencia por el hombre (Anexo I). Dicha determinación se llevó a cabo por espectrofotometría de absorción atómica; para las algas y pastos se analizaron las partes más expuestas a su depredador inmediato (el talo y las hojas respectivamente); en el gastrópodo se analizaron dos órganos distintos: el músculo y la glándula digestiva, ambos órganos citados por Mason y Smikiss (1983) como acumuladores de metales; en el sedimento se trató de obtener la fracción biodisponible para las algas y pastos y por último en las excretas los metales totales.

Los resultados de cada tipo de muestra se compararon entre sí para determinar alguna relación entre las concentraciones de metales pesados y su posición en la cadena trófica propuesta (Fig. 2)

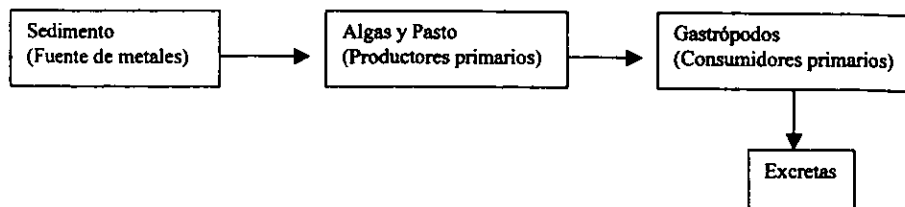


Fig. 2. Relación trófica bentónica arrecifal propuesta.

COLECTA DE MUESTRAS

El análisis elemental se realizó con extremo cuidado para evitar cualquier posible contaminación de las muestras, ya que el análisis es de alta precisión (entre ng y μg por gramo de peso seco de la muestra) y por muy pequeña que sea la contaminación sobreestima las concentraciones reales de los metales en las muestras; para evitar esto, todo el material, la cristalería que se utilizó para la colecta de las muestras, así como para el análisis espectrofotométrico y en general todo el material que estuvo en contacto con las muestras, se lavó cuidadosamente con agua deionizada, posteriormente se colocó en HNO_3 al 5 % durante 48 hrs. para eliminar cualquier residuo, y finalmente se enjuagó abundantemente con agua deionizada (Horta, 1998 en prensa).

GASTROPÓDOS Y EXCRETAS

Se colectaron 10 organismos adultos (de entre 10 y 13 cm de longitud) de la especie *Aplysia dactylomela*. La colecta se realizó manualmente, colocando a cada organismo en frascos de polietileno de 1L de boca ancha y con tapa de rosca, estos frascos se llenaron con agua del medio y se taparon para su transporte. Los frascos se colocaron en contenedores cerrados para su traslado. Posteriormente cada organismo fue enjuagado abundantemente con agua del medio previamente filtrada (con mallas de 45 micras de abertura) para eliminar material particulado y residuos inorgánicos, cada organismo se colocó en un acuario aireado previamente llenado con agua filtrada de la misma zona en donde se realizó su colecta (Fig. 3). Después de que los organismos se mantuvieron por 24 hrs. en los acuarios, sus excrementos se extrajeron con una pipeta y se colocaron en frascos viales etiquetados que posteriormente se congelaron para su conservación y transporte (Nott y Nicolaidou, 1996)

Los gastrópodos se colocaron en bolsas de polietileno etiquetadas y se sometieron inmediatamente a congelación.

Bomba de aire

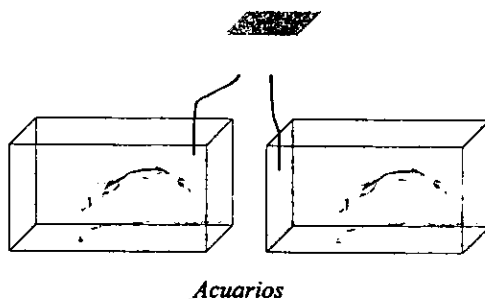


Fig 3.- Esquema de los acuarios en donde se mantuvieron los organismos por 24 hrs. para la obtención de sus excretas.

PLANTAS Y ALGAS

Dado que este gastrópodo es un herbívoro que se alimenta principalmente de algas y ocasionalmente de pasto marino (Carefoot, 1987), se colectaron de manera manual aproximadamente 50 g. de algas que estuviera devorando en el momento y 50 g. de pasto que se encontrara a la periferia de donde se localizó al gastrópodo (en un diámetro aproximado de 4m.). Cabe destacar que, el alimento de los gastrópodos en el momento de colecta se limitó sólo a dos especies de algas: *Dyctiota volubilis* en el arrecife El Verde y *Ceritium crinale* en el arrecife La Gallega. Las muestras de algas se enjuagaron con el agua del medio para eliminar partículas principalmente de sedimento y algunos organismos que habitan en ellas.

Para el pasto marino se hizo el muestreo de tal manera que se eligieron las hojas más limpias, sin epífitos y sin zonas muertas. Las muestras se enjuagaron abundantemente

con agua del medio para eliminar residuos, y se colocaron en bolsas de polietileno previamente etiquetadas tratando de eliminar el exceso de agua para su congelación.

SEDIMENTO

En la misma zona, se colectó una muestra de sedimento, aproximadamente de 50g. de entre 0 y 5 cm. de profundidad (zona de fijación del pasto marino, Dawes, 1991) con ayuda de una pequeña cuchara de plástico. Las muestras se colocaron en botes de polipropileno etiquetados, se dejaron en reposo para que todo el material sólido se sedimentara y por decantación se extrajo toda el agua excedente para su congelación.

CONGELACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras se introdujeron lo más rápidamente posible a contenedores herméticos que contenían hielo seco (la función de estos contenedores fue la de evitar la contaminación de las muestras, mantenerlas congeladas, transportarlas y evitar el maltrato). Posteriormente los contenedores se trasladaron al laboratorio de Biogeoquímica de la Unidad de Biología Tecnología y Prototipos de la Universidad Nacional Autónoma de México Campus Iztacala, en un tiempo no mayor a 72 hrs. Una vez en el laboratorio se colocaron en un ultracongelador a $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su posterior procesamiento.

PRETRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

GASTRÓPODOS

Cada organismo fue descongelado, y enjuagado abundantemente con agua deionizada. Posteriormente fueron disectados extrayendo la glándula digestiva y el músculo (órganos en donde se acumulan los metales. Mason y Smikiss, 1983) para analizar por

separado los órganos; cada órgano fue lavado con agua deionizada y fueron colocados en cajas de Petri por separado. Las muestras se introdujeron a una estufa para laboratorio a 75 °C por 48 hrs. para su completo secado. Este tiempo no fue suficiente para las muestras de glándula digestiva ya que al término de este tiempo las muestras presentaban una consistencia viscosa, estas muestras se mantuvieron a la misma temperatura durante una semana, sin embargo su consistencia no cambió por lo que se decidió calcinar estas muestras, así pues, las muestras se colocaron en crisoles de porcelana y se introdujeron en una mufla a 400 °C por un tiempo de 4 hrs.

Todas las muestras fueron maceradas por separado en morteros de porcelana y se colocaron en bolsas de polietileno cerrandolas perfectamente eliminando en lo posible todo el aire dentro de las bolsas con una bomba de vacío.

ALGAS Y PLANTAS

Tanto las muestras de algas como de pasto marino se descongelaron y se enjuagaron con agua deionizada abundantemente y se eliminó todo epífito remanente, las muestras se colocaron por separado en cajas de Petri y se siguió el mismo procedimiento de secado. De la misma manera se siguió el proceso tanto de macerado como de guardado de las muestras anteriores.

SEDIMENTO

Las muestras de sedimento se descongelaron y se colocaron por separado en cajas de petri siguiendo el proceso de secado. Ya secas las muestras se cernieron en un tamiz del No. 20, separando solo la fracción de 2mm de diámetro; el cernido se guardó.

EXCREMENTO

Las muestras de excremento se descongelaron, se dejaron en reposo para que todo el material sólido se sedimentara y por decantación se eliminara en lo posible el agua excedente; posteriormente se secaron y guardaron en los mismos frascos en donde fueron colectados.

DIGESTIÓN QUÍMICA

La digestión de las muestras se llevó a cabo en un horno de microondas CEM del laboratorio de Biogeoquímica de la UBIPRO.

Las técnicas así como los ácidos para la digestión se eligieron de acuerdo a la naturaleza de la matriz química de cada muestra y a la fracción de metales que se desea obtener en cada muestra, es decir se obtuvieron los metales que pueden encontrarse disponibles al siguiente nivel superior en el ciclo propuesto (sedimento→ productores primarios→ consumidores primarios→ excretas). Para la fracción biodisponible en los sedimentos se utilizó la técnica de Chukwuma (1996), ya que el ataque con ácidos no es tan violento, tratando con esto de no alterar las estructuras de los silicatos, óxidos de fierro y manganeso, en donde se encuentran las fracciones de metales no biodisponibles. Las muestras tanto de algas, de pasto marino y excremento se digirieron de acuerdo a la técnica para hojas de cítricos, el tejido del gastrópodo se digirió de acuerdo a la técnica para tejido de ostión, ambas del manual para el horno de microondas CEM (1996). Cabe señalar que para el análisis de las excretas se utilizó la misma técnica que para las algas dado que la mayor parte los excrementos eran residuos de algas.

Se pesaron 0.5 g. de muestra directamente en las cubetas de digestión en una balanza analítica; cada muestra se analizó por duplicado. Para la digestión de las muestras se utilizó ácido nítrico y/o fluorhídrico en grado reactivo en la relación que se muestra en la Tabla 1. Por cada grupo de muestras se usaron 2 blancos de acuerdo con la relación de ácido que se utilizó para cada grupo de muestras (Tabla 1).

Tabla 1.- Tipos, concentraciones y cantidades de ácidos utilizados para la digestión de las muestras.

Muestra	Agua Deionizada	Cantidad y Ácido	Concentración
Sedimento	—	10 ml HNO ₃	45 %
Algas	2 ml	5 ml HNO ₃ , 1ml HF	70 %, 48 %
Pasto marino	2 ml	5 ml HNO ₃ , 1ml HF	70 %, 48 %
Músculo	2 ml	5 ml HNO ₃	70%
Glándula digestiva	—	10 ml HNO ₃	70 %
Excremento	2 ml	5 ml HNO ₃ , 1ml HF	70 %, 48 %

Los programas de digestión y secado para cada muestra se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2.- Programas de digestión del horno de microondas que se usaron para la digestión de las muestras; los pasos que se requieren para disolver una muestra varían por cada muestra, así como las libras de presión (PSI) a las que se somete la muestra; la "Rampa" es el tiempo para que el equipo incremente la presión paulatinamente hasta alcanzar la presión requerida y el "Tiempo" la mantiene constante.

Paso	Algas, pasto marino y excremento.			Tejido animal				Sedimento
	1	2	3	1	2	3	4	1
% Poder	100	100	100	100	100	100	100	100
PSI	40	85	150	40	85	135	170	29
Rampa	6:00	6:00	10:00	10:00	10:00	6:00	6:00	10:00
Tiempo	3:00	3:00	5:00	5:00	5:00	6:00	6:00	3:00

Para eliminar los residuos en donde se encuentra la fracción no disponible de los sedimentos, las muestras ya digeridas se centrifugaron a 10,000 r.p.m. a 4 °C durante 30

minutos., se recuperó el sobrenadante y se desechó la pastilla. Las muestras de algas fueron filtradas con papel Whatmann del No. 4 para eliminar la presencia de pequeñas partículas insolubles.

Para obtener un volumen estándar de las muestras, se aforaron a 25 ml con agua deionizada en matraces aforados; posteriormente las muestras se colocaron en frascos de polipropileno y se sellaron hasta su análisis elemental.

ANÁLISIS INSTRUMENTAL.

Las muestras se analizaron a la flama en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Varian SpectrAA-800 (EAA) y electrotérmicamente en un horno atomizador de grafito Varian GTA 100 del laboratorio de Biogeoquímica de la UBIPRO.

En todos los casos se utilizaron lámparas de cátodo hueco, específicas para la determinación de cada metal (Al, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn). Para cada metal a evaluar, se realizó una curva de calibración utilizando soluciones estándar elaboradas a partir de una solución patrón Sigma de 1000 ppm de cada metal, también se realizaron lecturas de la absorbancia de una muestra de concentración conocida (utilizado un estándar en la curva de calibración) por lo menos diez veces; se obtuvo el promedio de la concentración obtenida (que representó el 100%), se determinó la desviación estándar y se restó al promedio obteniendo un porcentaje, este porcentaje representó la reproducibilidad de los datos para cada metal, estos datos se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3.- Reproducibilidad de las mediciones del Espectro de Absorción para cada uno de los metales analizados.

Al	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
99.4 %	96.3%	93.1%	99.4%	98.0%	67.4%	98.4%

El límite de detección del EAA para cada metal, se obtuvo al medir la concentración más baja de las curvas de calibración de cada metal, éste valor se multiplicó por los 25 (mililitros de volumen aforado) y se dividió entre 0.5 (peso promedio de las muestras), estos datos se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4.- Límites de detección a la flama y electrotérmica para el Espectrofotómetro de Absorción Atómica Varian SpectrAA-800 y GTA.

Método	Al μg/g	Cd μg/g	Cr μg/g	Cu μg/g	Ni μg/g	Pb μg/g	Zn μg/g
Flama	250	25	35	35	7.50	7.50	5
	Al Ng/g	Cd ng/g	Cr ng/g	Cu ng/g	Ni ng/g	Pb ng/g	Zn ng/g
Electrotérmica	---	5.0	200	350	250	300	---

Las muestras fueron analizadas directamente por espectrofotometría de absorción atómica conforme a las condiciones de operación específica para cada metal estas condiciones se pueden ver en la Tabla 5.

Tabla 5.-Condiciones de operación del EAA a la flama.

Metal	Longitud de onda (nm)	Abertura	Tipo de gas
Aluminio	309.5	.5	N ₂ O-CH ₂ =CH ₂
Cadmio	228.8	.5	Aire-CH ₂ =CH ₂
Cromo	357.9	.2	Aire-CH ₂ =CH ₂
Cobre	324.8	.5	Aire-CH ₂ =CH ₂
Níquel	232.0	.2	Aire-CH ₂ =CH ₂
Plomo	217.0	1	Aire-CH ₂ =CH ₂
Zinc	213.9	1	Aire-CH ₂ =CH ₂

Las muestras que no se analizaron a la flama fueron analizadas por el método electrotérmico ya que el límite de detección a la flama es "relativamente" alto y algunas muestras presentaron concentraciones menores a este límite. Así, las muestras analizadas electrotérmicamente en el GTA del EAA siguieron condiciones de análisis distintas debido

a la mayor sensibilidad del GTA. El proceso de lectura consiste en tres pasos (secado, calcinado y atomizado) que de acuerdo a las características químicas de las muestras van a variar en tiempo y temperatura en cada uno de estos pasos. Las condiciones para cada paso se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.- Condiciones de operación del horno de grafito en grados centígrados (°C) y tiempo (T en segundos).

ALGAS	Secado °C / t			Calcinado °C / t			Atomizado °C / t		
Cadmio	85 / 5	95 / 60	140 / 10	300 / 10	300 / 30	300 / 2	1800 / 0.8	1800 / 2	1800 / 2
Plomo	85 / 5	95 / 60	140 / 10	400 / 15	400 / 45	400 / 2	1900 / 1	1900 / 2	1900 / 2
PASTO MARINO									
Cadmio	85 / 5	95 / 60	120 / 10	300 / 10	300 / 30	300 / 2	1800 / 1	1800 / 2	1800 / 2
Cromo	85 / 5	95 / 60	120 / 10	1100 / 15	1100 / 30	1100 / 2	2500 / 1.2	2500 / 2	2500 / 2
Níquel	85 / 5	95 / 60	120 / 10	850 / 15	850 / 30	850 / 2	2400 / 1	2400 / 2	2400 / 2
Plomo	85 / 5	95 / 60	120 / 10	950 / 15	950 / 45	950 / 2	2000 / 1	2000 / 3	2000 / 2
MUSCULO Y GLANDULA DIGESTIVA									
Cadmio	85 / 5	95 / 45	120 / 15	300 / 10	300 / 30	300 / 2	1800 / 1	1800 / 2	1800 / 2
Cromo	85 / 5	95 / 45	120 / 15	1100 / 15	1100 / 40	1100 / 2	2500 / 1	2500 / 1.5	2500 / 2
Níquel	85 / 5	95 / 45	120 / 15	850 / 15	850 / 40	850 / 2	2400 / 2	2400 / 1	2400 / 2
Plomo	85 / 5	95 / 45	120 / 15	950 / 15	950 / 45	950 / 2	2000 / 2	2000 / 2	2000 / 2
EXCRETAS									
Cadmio	85 / 5	95 / 60	120 / 10	300 / 10	300 / 30	300 / 2	1800 / 1	1800 / 2	1800 / 2
Cromo	85 / 5	95 / 60	120 / 10	1100 / 15	1100 / 30	1100 / 2	2500 / 1	2500 / 1	2500 / 2
Cobre	85 / 5	95 / 60	120 / 10	800 / 15	800 / 30	800 / 2	2300 / 1	2300 / 1	2300 / 2
Níquel	85 / 5	95 / 60	120 / 10	850 / 15	850 / 30	850 / 2	2400 / 1	2400 / 2	2400 / 2
Plomo	85 / 5	95 / 60	120 / 10	400 / 15	400 / 45	400 / 2	2000 / 1	2000 / 2	2000 / 2

Fue necesaria la utilización de un modificador de paladio de 500 ppm para evitar la interferencia de fondo que se presentó al evaluar plomo en las muestras de pasto marino (esto permitió elevar la temperatura de calcinado) obteniendo una lectura confiable.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los resultados se calcularon en μg de metal por gramo de peso seco. Esto se realizó tomando en cuenta (1) las lecturas de absorbancia de cada muestra que se realizó por

duplicado, (2) el peso seco de la muestra, (3) el volumen total en que fue disuelta la muestra y (4) la concentración del metal a evaluar en los blancos, de tal forma que la concentración real de cada muestra, una vez determinadas las concentraciones de las diluciones, se obtuvo mediante el siguiente cálculo:

$$Y = [(x - cb) * 25] / p$$

Y = concentración real de la muestra.

X = valor promedio de la concentración (instrumental).

25 = volumen en ml al cual se diluyó la muestra.

p = peso de la muestra en gr.

cb = concentración del blanco.

Se calcularon los parámetros básicos, media (X) y desviación estándar (S) de las muestras. Para determinar la correlación entre las muestras se realizaron matrices de correlación con ayuda del programa estadístico para PC JMP versión 3.1.2 (1995), teniendo una $n = 20$, correspondiendo un valor de significancia para r de 0.44. Para determinar las semejanzas entre arrecifes, se realizó un análisis de varianza para datos no paramétricos sin distribución normal, para esto se aplicó una prueba de Mann Whitney con ayuda del programa estadístico para PC Statgraphics 5.1. Para determinar qué arrecife presentó la mayor concentración de metales, se realizó una prueba de diferencia de medias.

RESULTADOS

SEDIMENTO

La concentración elemental encontrada en las muestras de sedimentos de los dos arrecifes se presenta en la Tabla 7. El metal que presentó mayor concentración en ambos arrecifes fue el aluminio (4970 $\mu\text{g/g}$. En la Gallega y 2784 $\mu\text{g/g}$. en El Verde). En contraste el metal que presentó la menor concentración en ambos casos fue el cadmio (6.2 $\mu\text{g/g}$. en La Gallega y 4.7 $\mu\text{g/g}$. en El Verde). La tendencia de la concentración de los metales en los sedimentos para ambos arrecifes fue la siguiente: $\text{Al} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Cd}$. Es importante señalar que para tratarse de concentraciones biodisponibles estas concentraciones fueron muy elevadas, es probable que no representen la concentración biodisponible en los sedimentos, es factible que estas concentraciones estén más cerca de la concentración total que de la biodisponible.

ALGAS

La concentración elemental total en algas se presenta en la Tabla 7. Las algas analizadas pertenecen a dos especies diferentes *Dicthyota volubilis* y *Cerithium crinale*. Estas especies aunque no han sido reportadas como parte de la dieta de *Aplysia dactilomela*, al momento de la colecta estaban siendo devoradas por el gastrópodo, una especie en cada arrecife *D. Volubilis* para el arrecife el Verde y *C. Crinale* para el arrecife la Gallega. Cabe señalar que este organismo no tiene preferencia por algún tipo de alga y que su dieta incluye varias especies de algas, la preferencia por algunas especies es más bien estacional (Carefoot, 1987).

La concentración más elevada correspondió al aluminio con 5848 $\mu\text{g/g}$. en la Gallega y 5708 $\mu\text{g/g}$. en el Verde, a su vez el elemento de menor concentración fue en cadmio con 0.6 $\mu\text{g/g}$. en la Gallega y 1.6 $\mu\text{g/g}$. en el Verde. La tendencia de la concentración de los metales en las algas para ambos arrecifes fue la siguiente: $\text{Al} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Cd}$.

PASTO MARINO

La concentración elemental total en pasto marino se presenta en la Tabla 7. *Thalassia testudinum* es un alimento ocasional de *A. dactilomela*. Carefoot (1987) menciona que esta especie de pasto marino es consumida en ausencia de algas principalmente en temporadas invernales, además este gastrópodo es típico de las zonas de *Thalassia*.

La concentración más elevada correspondió al aluminio con 9457 $\mu\text{g/g}$. en la Gallega y 2650 $\mu\text{g/g}$. en el Verde, el elemento de menor concentración fue en cadmio con 0.9 $\mu\text{g/g}$. en la Gallega y 1.0 $\mu\text{g/g}$. en el Verde. La tendencia de la concentración de los metales en los pastos para ambos arrecifes fue la siguiente: $\text{Al} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cd}$.

MÚSCULO Y GLÁNDULA DIGESTIVA

La concentración elemental en músculo y glándula digestiva se presenta en la Tabla 7. El elemento que presentó mayor concentración en músculo fue el cobre con 143 $\mu\text{g/g}$. para la Gallega y 109 $\mu\text{g/g}$. en el Verde. En la glándula digestiva, el zinc presentó concentraciones de 205073 y 355644 $\mu\text{g/g}$. para la Gallega y el Verde respectivamente;

estas concentraciones son excesivas ya que representarían aproximadamente la tercera parte del peso seco de la muestra, estas concentraciones pudieron darse por algún fenómeno ajeno no percibido durante el procesamiento y análisis instrumental de las muestras, por lo que estos valores no se tomaron como válidos y tampoco se consideraron para los análisis estadísticos. Los metales que presentaron menor concentración fueron el cadmio en glándula con 8.4 y 20.9 µg/g. para la Gallega y el Verde respectivamente, y en músculo el cromo con 0.8 y 1.1 µg/g. para la Gallega y el Verde respectivamente.

La tendencia en la concentración de los metales para ambos arrecifes fue la siguiente:

MÚSCULO Cu > Al > Zn > Ni > Pb > Cd > Cr

GLÁNDULA Al > Ni > Pb > Cu > Cr > Cd

EXCRETAS

La concentración elemental total en las excretas de *A. dactylosmela* se presenta en la Tabla 7. El elemento que resultó tener la mayor concentración fue el aluminio con 133855 y 102249 µg/g. para la Gallega y el Verde respectivamente, estos datos también se consideraron excesivos y causados por algún factor ajeno e imperceptible que afectó los datos, ya sea en el procesamiento o análisis instrumental de las muestras; de la misma manera estos datos no se tomaron como válidos y no se consideraron para los análisis estadísticos. La menor concentración correspondió al cadmio (0.2 y 0.2 µg/g. para la Gallega y el Verde respectivamente). La tendencia de la concentración de los metales en excretas para ambos arrecifes fue la siguiente: Zn > Ni > Cr > Pb > Cu > Cd.

Tabla 7. Concentración ($\mu\text{g/g}$ de peso seco) promedio de metales en sedimentos y organismos de los arrecifes La Gallega y El Verde.

	Al	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Sedimento							
<i>La Gallega</i>	4970	6.2	13.9	10.5	25.2	44.4	25.5
Des.Est. \pm	1762.2	0.72	1.79	0.59	2.27	3.72	4.69
<i>El Verde</i>	2784	4.7	13.9	10.5	28.5	49.9	32.3
Des.Est. \pm	1037.2	0.87	2.15	0.36	1.0	4.31	26.59
Algas							
<i>La Gallega</i>	5848	0.65	28.1	31.0	61.3	38.8	67.4
Des.Est. \pm	2258.87	0.18	5.39	9.87	18.17	23.57	13.12
<i>El Verde</i>	5708	1.6	9.7	12.8	40.6	25.9	61.9
Des.Est. \pm	1190.41	0.65	5.13	2.44	13.67	21.79	9.37
Thalassia							
<i>La Gallega</i>	9457	0.9	11.0	13.5	12.2	15.4	83.9
Des.Est. \pm	2883.13	.39	3.31	2.32	1.64	6.0	8.32
<i>El Verde</i>	2650	1.0	2.7	7.8	6.8	10.7	35.9
Des.Est. \pm	738.09	0.22	1.23	1.41	2.26	4.30	3.11
Músculo							
<i>La Gallega</i>	30.4	2.7	0.8	143	40.0	28.2	44.4
Des.Est. \pm	19.04	1.45	0.43	120.40	24.03	12.65	18.45
<i>El Verde</i>	65.0	4.1	1.1	109.0	29.1	28.5	43.3
Des. Est. \pm	22.70	3.04	0.63	100.72	16.12	17.50	11.22
Glándula Digestiva							
<i>La Gallega</i>	1066	8.44	16.32	34.27	120.7	39.7	205073.5
Des.Est. \pm	540.71	3.19	2.28	11.43	33.5	20.9	39680.9
<i>El Verde</i>	1572	20.92	24.12	25.44	99.92	52.15	355644.10
Des.Est. \pm	975.78	10.49	22.34	11.23	44.11	46.67	610135.8
Excretas							
<i>La Gallega</i>	133855	0.2	87.3	24.7	111	44.9	654
Des. Est. \pm	143548.6	0.22	69.30	40.72	96.9	66.42	488.45
<i>El Verde</i>	102249	0.26	33.1	17.3	83.3	37.8	355.3
Des. Est. \pm	78629.1	0.32	20.72	14.6	49.3	26.68	212.41

* Metales Biodisponibles

+ Metales Totales.

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Se realizaron análisis de correlación para cada metal y así determinar la relación o dependencia entre las diferentes muestras. Para la correlación se utilizó valor de significancia de $r = 0.44$ de acuerdo al número de valores por cada metal ($n = 20$).

Las correlaciones esperadas para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo fueron entre: sedimento – algas, sedimento – pasto, algas – músculo, algas – glándula, pasto - músculo, pasto - glándula, glándula – excretas; estas relaciones son las que están directamente implicadas en las relaciones de consumo.

Las correlaciones entre las concentraciones de metales y las muestras sólo fueron significativas para el Al que presentó relación entre sedimento y pasto ($r = 0.533$), el Cd que mostró una correlación entre algas y glándula digestiva ($r = 0.5012$), el Cu que tuvo correlación entre algas y glándula digestiva ($r = 0.4584$) y por último el Ni que presentó correlación entre algas y músculo ($r = 0.6594$). Es importante señalar que estos valores son cercanos al límite mínimo de significancia (0.44) y pueden considerarse como intrascendentes.

COMPARACIÓN ENTRE ARRECIFES

La comparación entre arrecifes se realizó mediante el análisis estadístico por rangos de Mann-Whitney. Para éste análisis se utilizaron todos y cada uno de los datos de cada muestras por metal y por arrecife, confrontándolos con los datos del otro arrecife. De acuerdo con el análisis, el Al, Ni y el Pb (A) $Z=1.70$, Ni $Z=1.6$ y Pb $Z= 0.4$, con 0.05 grados de libertad) no presentaron diferencia significativa entre los arrecifes, es decir las

concentraciones de estos metales son estadísticamente similares en ambos arrecifes. Se obtuvieron diferencias significativas en los metales Cr, Cu y Zn, (Cr $Z= 3.31$, Cu $Z= 2.9$ y Zn $Z= 2.5$, con 0.05 grados de libertad) y de acuerdo al análisis de diferencia de medias, la mayor concentración se encontró en el arrecife La Gallega. El Cd también mostró diferencia significativa (Cd $Z= 2.54$) presentando mayor concentración en el Arrecife el Verde. Algunas de estas diferencias se pueden observar en las Figuras 4-10.

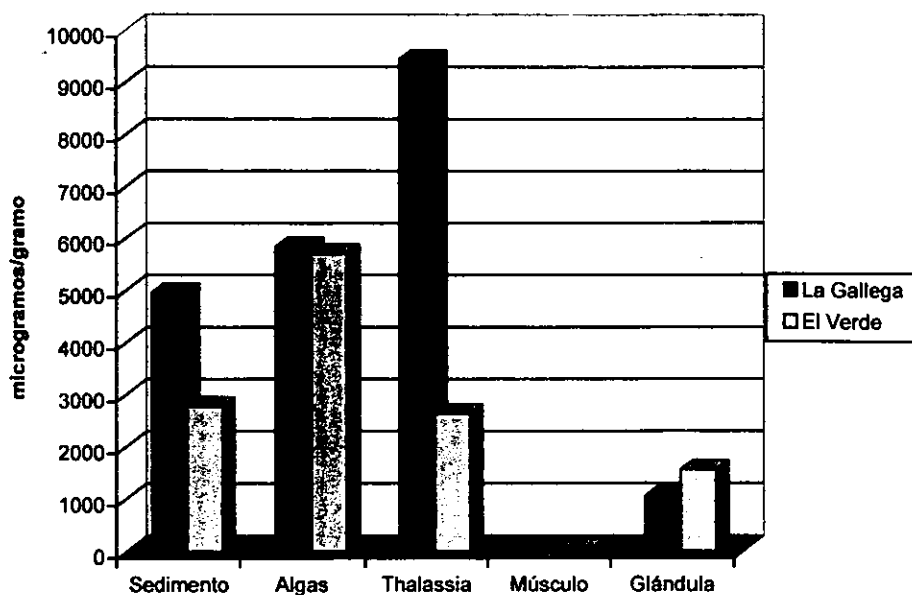


Fig. 4.- Concentración de aluminio ($\mu\text{g/g. de peso seco}$) en las diferentes muestras de los arrecifes La Gallega y El Verde.

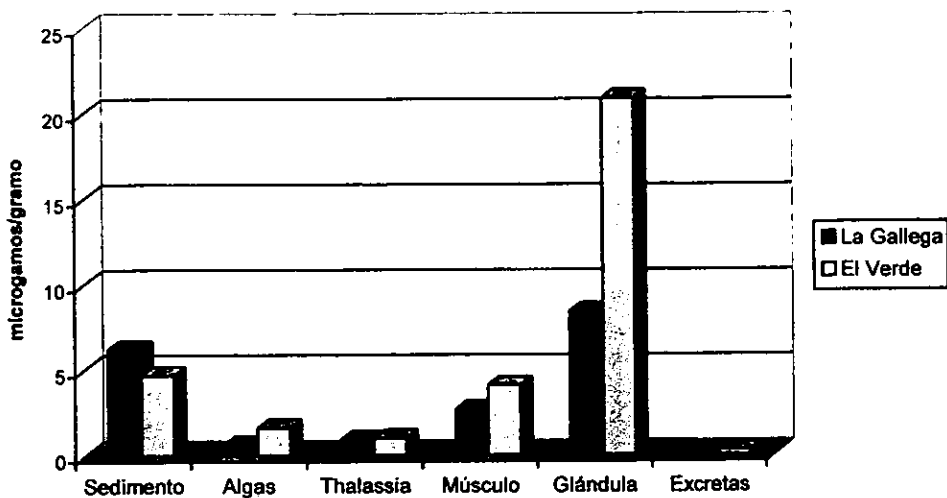


Fig. 5.- Concentración de cadmio ($\mu\text{g/g}$, de peso seco) en las diferentes muestras de los arrecifes La Gallega y El Verde.

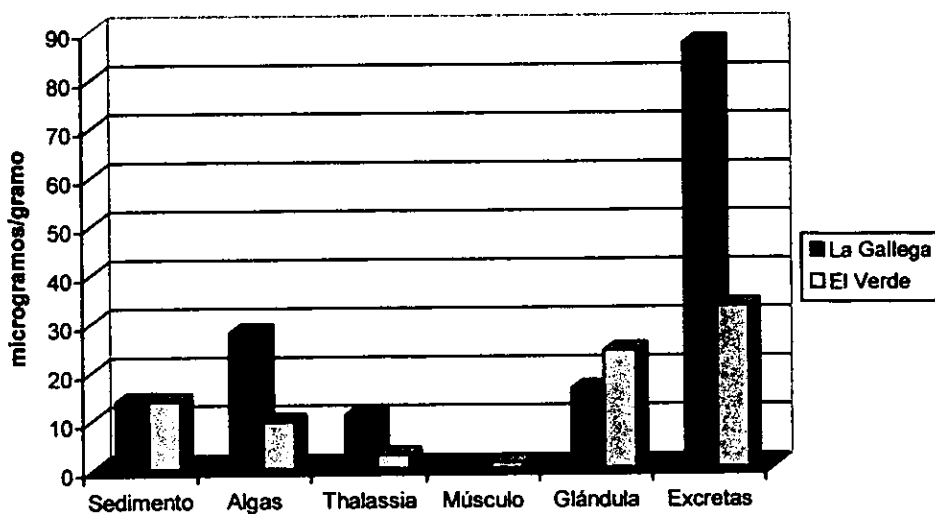


Fig. 6.- Concentración de cromo ($\mu\text{g/g}$, de peso seco) en las diferentes muestras de los arrecifes La Gallega y El Verde.

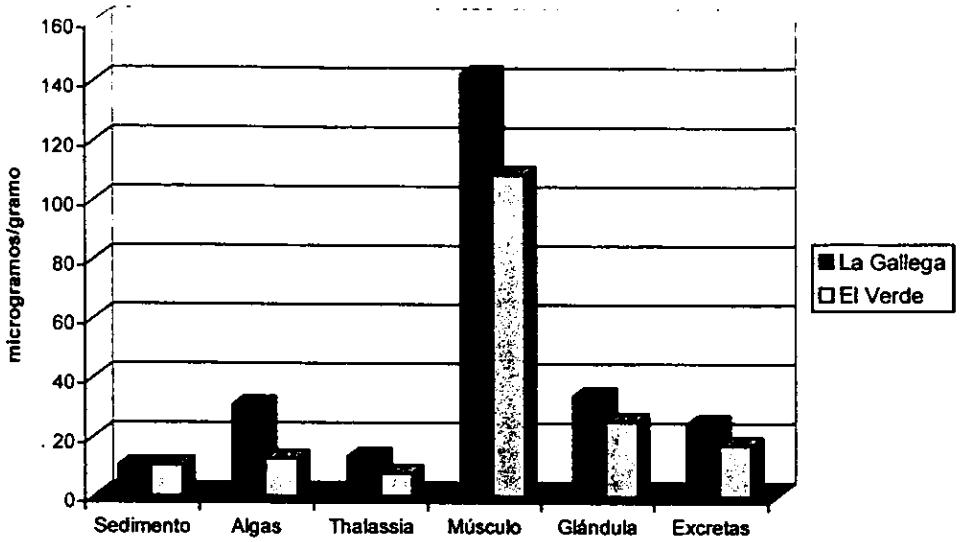


Fig. 7.- Concentración de Cobre ($\mu\text{g/g. de peso seco}$) en las diferentes muestras de los arrecifes La Gallega y El Verde.

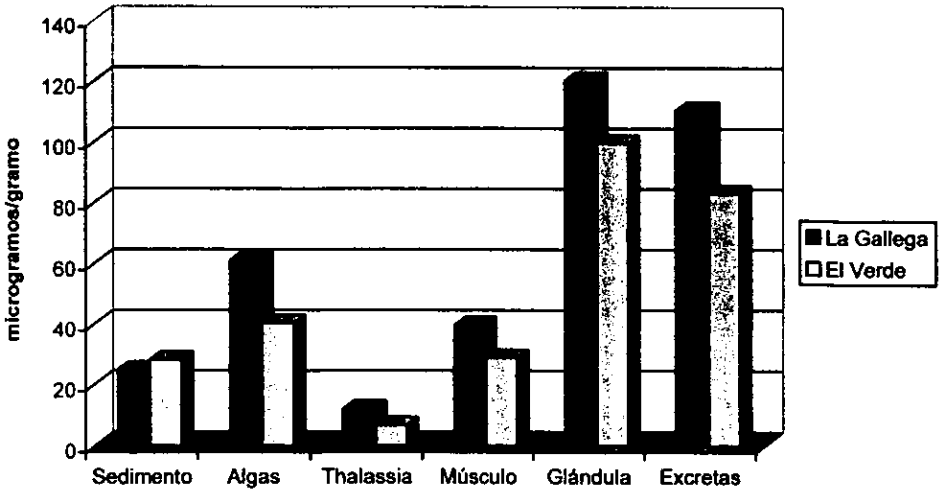


Fig. 8.- Concentración de níquel ($\mu\text{g/g. de peso seco}$) en las diferentes muestras de los arrecifes La Gallega y El Verde.

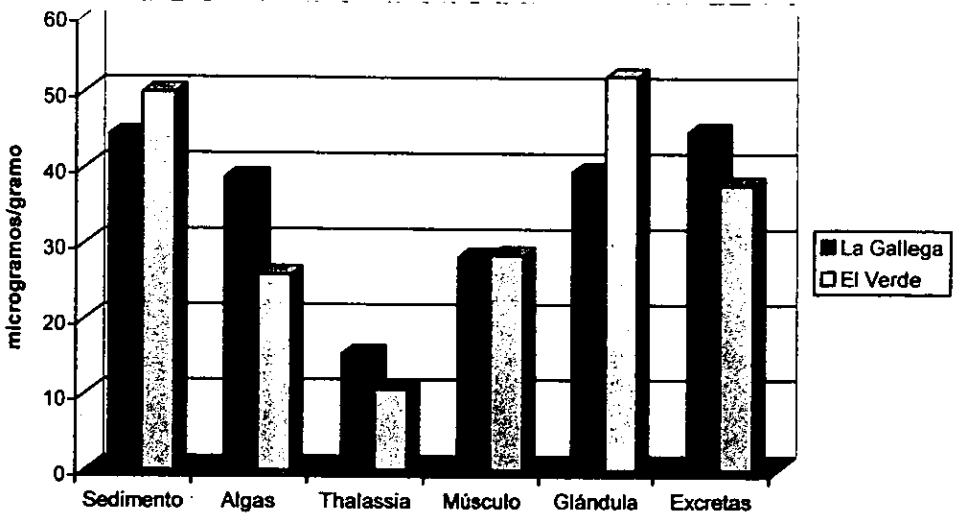


Fig. 9.- Concentración de plomo ($\mu\text{g/g}$. de peso seco) en las diferentes muestras de los arrecifes La Gallega y El Verde.

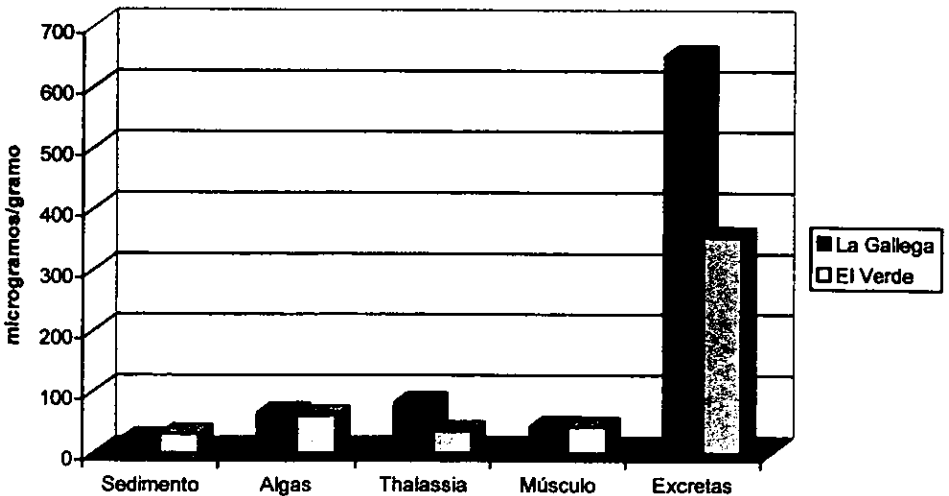


Fig. 10.- Concentración de Zinc ($\mu\text{g/g}$. de peso seco) en las diferentes muestras de los arrecifes La Gallega y El Verde.

DISCUSIÓN

SEDIMENTO

Los datos sobre la concentración total de metales en los sedimentos pueden ser de gran utilidad si se desea conocer el grado de contaminación metálica de los sedimentos, pese a ello y para los fines del presente estudio presentan poca utilidad, debido a que el contenido total de los metales en el sedimento es la suma de diversas fracciones que se encuentran unidas a las partículas sólidas y minerales de los sedimentos, parte de estas fracciones se encuentran fuertemente unidas a las partículas minerales impidiendo cualquier interacción biológica de los metales; así, la fracción metálica de interés en este estudio es la que está "débilmente" unida a las partículas minerales del sedimento, es altamente soluble, forma complejos inestables, y puede interaccionar fácilmente con otros compuestos y/o organismos, esta fracción, representa la porción de metales que fueron inicialmente intemperizados e introducidos en las descargas inducidas natural y/o antropogénicamente, quedando débilmente unidos a los sedimentos y materia orgánica (precipitación, floculación o adsorción); consecuentemente, esta fracción es la denominada biodisponible ya que puede ser incorporada desde el factor abiótico, como lo son los sedimentos, por los organismos (Campbell y Tessier, 1990).

De acuerdo con Chukwuma (1996) el tratamiento con ácido nítrico diluido (45%) permite extraer esta fracción de metales, que están adsorbidos débilmente a los carbonatos, compuestos amorfos fácilmente solubles del manganeso y del fierro, y también aquellos metales adsorbidos débilmente a la materia orgánica. Sin embargo y de acuerdo a los resultados obtenidos, es probable que esta concentración de ácido y su acción, no solo halla

extraído a los metales débilmente adsorbidos, sino que también pudo afectar la estructura principal de los sedimentos y de las estructuras de los silicatos y óxidos de Fe y Mn, liberando parte de la fracción no biodisponible, debido a la gran cantidad de carbonatos (75 % de carbonato de calcio biogénico) presentes en el sedimento de las zonas de muestreo (Emery, 1963; Morelock y Koenig, 1967).

Pocos son los trabajos en los que se ha analizado la disponibilidad de los metales en sedimento marino y prácticamente no se han realizado trabajos de este tipo en sedimentos arrecifales, sin embargo los trabajos donde se intenta obtener la concentración de metales biodisponibles se observan diferencias importantes entre las técnicas utilizadas por cada autor. Algunos autores emplean técnicas muy "suaves" (González *et al.*, 1994; Rodríguez, 1994), otros emplean técnicas fraccionadas (Tessier *et al.*, 1984; Tessier y Campbell, 1987; Campbell y Tessier, 1990) y algunos emplean técnicas un poco más violentas (Chukwuma, 1996).

A fin de evitar una sobreinterpretación debe tomarse en cuenta que ninguna extracción química puede con exactitud predecir la biodisponibilidad de cualquier elemento, esto se debe en parte a que el conocimiento que se tiene de la disponibilidad biológica de los metales en sedimento marino es escasa y la disponibilidad de un elemento va a depender de diversos factores como las características fisicoquímicas de los sedimentos, la distribución de metales en las diferentes fracciones del sedimento, el tipo de metal, su forma química, los métodos utilizados para extraer los metales y los procesos que controlan la bioacumulación de los metales en los organismos, además del tipo de exposición a los metales, es decir por contacto directo con el sedimento, en solución o por

el alimento (Forstner y Wittman, 1979; Loring, 1979; Turner, 1986; Tessier y Campbell 1987; Luoma, 1989; Campbell y Tessier, 1990; Arjonilla y Gómez Parra, 1994).

Entre los trabajos en los que se ha analizado la biodisponibilidad de los metales pesados en sedimentos marinos están los de Álvarez *et al.* (1986), Paez-Ozuna *et al.* (1986), Ríos (1993), González *et al.* (1994), Rodríguez (1994) y Hernández *et al.* (1995) que si bien han sido con sedimentos marinos, estos tienen características distintas a los de la zona de estudio (sedimentos de origen terrígeno principalmente), además cada uno utiliza una técnica diferente para la extracción metálica; sin embargo estos datos pueden dar un punto de referencia acerca de las concentraciones obtenidas en este trabajo; de esta manera, las concentraciones de metales biodisponibles encontradas tanto en el arrecife La Gallega así como las encontradas en el arrecife El Verde son considerablemente mayores a las reportadas por los autores antes mencionados (Tabla 8).

Tabla 8.- Concentración de metales pesados biodisponibles ($\mu\text{g/g}$, peso seco) para sedimentos de las áreas de estudio y otras regiones.

Áreas	Al	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Referencia
Sontecomapan	-----	N.D	2.33	0.73	3.7	ND	4.18	Gonzalez <i>et al.</i> 1994
Laguna Salada	-----	0.45	4.01	7.46	4.04	28.76	17.21	Rodríguez <i>et al.</i> 1994
L. El llano	-----	0.37	3.41	9.88	3.12	32.04	15.93	
L. La mancha	-----	0.28	4.19	7.46	2.47	34.12	10.44	
L. Mandinga	-----	0.31	6.51	7.94	2.81	9.67	9.25	Hernández <i>et al.</i> 1995
Coatzacoalcos	-----	0.36	3.0	1.3	2.9	6.0	14.0	Villanueva 1987
L. Ostión	-----	0.43	N.D.	0.3	2.0	ND	11	
R. Blanco	-----	0.22	N.D.	-----	1.95	2.40	8.78	Alvarez 1986
P.Continental	-----	0.53	1.11	2.96	2.64	6.07	5.08	Ríos 1993
A. La Gallega	4970.8	6.24	13.98	10.59	25.27	44.47	25.57	Este estudio
A. El Verde	2784.4	4.75	13.93	10.59	28.58	49.99	32.3	Este estudio

N.D. no detectable

Las concentraciones de metales biodisponibles en ambos arrecifes son incluso, comparables a las concentraciones de metales totales obtenidas por Guzmán y Jiménez

(1992) en sedimentos calcáreos de 23 arrecifes del Caribe (Al 5442.3 $\mu\text{g/g}$, Cd 6.6 $\mu\text{g/g}$, Cr 11.7 $\mu\text{g/g}$, Cu 5.2 $\mu\text{g/g}$, Ni 95 $\mu\text{g/g}$, Zn 16.8 $\mu\text{g/g}$) y Bastidas *et al.* (1999) (Cu 15.2 $\mu\text{g/g}$, Cr 23.9 $\mu\text{g/g}$, Pb 24 $\mu\text{g/g}$, Zn 48.5 $\mu\text{g/g}$) en sedimentos arrecifales de las costas de Venezuela, y considerablemente menores a las reportadas por Lyons *et al.* (1983) (Cd 3.7 $\mu\text{g/gr}$, Cr 101 $\mu\text{g/gr}$, Cu 72.2 $\mu\text{g/gr}$, Pb 105.6 $\mu\text{g/gr}$, Zn 50.2 $\mu\text{g/gr}$) para los sedimentos cercanos a zonas urbanas de las Bermudas. Cabe señalar que las concentraciones en estos arrecifes son consideradas por los autores como concentraciones contaminantes.

ALGAS

La tendencia a la acumulación de metales en algas, hacen de éstas especies organismos ideales para las mediciones de metales en el ambiente marino (Karez *et al.*, 1994; Kureishy, 1992).

De manera general, la incorporación de metales en algas se lleva a cabo en la membrana celular y va a variar de acuerdo con el tipo de compuestos que presentan los diferentes tipos de algas en su membrana celular. Los polisacáridos son componentes estructurales de las membranas celulares de las algas rojas y pardas. Los metales iónicos bivalentes pueden intercambiarse con iones de los polisacáridos como se muestra en el siguiente ejemplo:



Me = Metal
Alg = Alginato

Reacciones similares se llevan a cabo con compuestos los polifenoles, metaloenzimas y fitoquelatinas. Las cantidades excesivas de metales pesados en las algas

producen cambios en su morfología, crecimiento y metabolismo celular (Kuyucak y Volesky, 1994).

Los datos obtenidos en este trabajo fueron comparados con algunos datos que pertenecen a zonas arrecifales y de zonas costeras tropicales no arrecifales, cercanas a zonas urbanas y no urbanas, para proporcionar un buen punto de comparación de los datos obtenidos en el presente estudio.

En este sentido, tenemos que las concentraciones encontradas en las algas de los arrecifes La Gallega y el Verde son considerablemente más altas de acuerdo a lo reportado por Denton y Burdon Jones (1986b) quienes examinaron las concentraciones de metales de 48 especies de algas de la Gran Barrera Arrecifal Australiana, es importante señalar que estas concentraciones son consideradas por los autores como naturales (Tabla 9). De igual manera las concentraciones de metales en la Gallega y el Verde también resultaron ser más altas que las reportadas por Kureishy (1992) quien considera que las concentraciones de metales obtenidas en las algas de la costa de Katar no exceden los niveles naturales, en contraste, las concentraciones elementales obtenidas en ambos arrecifes son similares a las reportadas por Black y Mitchell (1952), Güven *et al.* (1993), Karez *et al.* (1994), Pulich (1980), para zonas costeras no arrecifales altamente contaminadas, exceptuando las concentraciones de Pb, Ni y Cr que en las algas de los arrecifes tratados en este estudio resultaron aún más altas que lo reportado (Tabla 9).

Tabla 9. Concentración de metales pesados ($\mu\text{g/g}$, peso seco) en algas de las áreas de estudio áreas arrecifales y otras regiones costeras urbanas no arrecifales.

ESPECIE	Al	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	REFERENCIA
Concentración promedio	-----	0.39	-----	2.3	1.7	2.4	5.8	Denton y Burdon 1986
<i>Cystoseira myrica</i>	-----	0.5	-----	5.1	2.2	1.5	5.7	Kureishy 1992
<i>C. indica</i>	-----	0.8	-----	5.7	2.8	0.6	2.1	
<i>Hormophysa triquetra</i>	-----	0.6	-----	4.7	2.1	1.7	13.6	
<i>Laminaria digitata</i>	-----	-----	1.5	70	1.7	20	93	Black y Mitchell 1952
<i>L. cloustoni</i>	-----	-----	0.9	30	0.9	13	59	
<i>Padina gymnospora</i>	-----	1.3	3.3	3.2	-----	4.2	307.0	Karez et al. 1994
<i>Gracilaria sp 1</i>	-----	0.37	4.7	5.2	-----	5.2	96.5	
<i>Gracilaria sp 2</i>	-----	0.40	2.4	3.2	-----	6.0	69	
<i>Sargassum stenophyllum</i>	-----	0.37	2.2	2.5	-----	2.9	108.4	
<i>Spyridia clavata</i>	-----	0.51	4.5	4.4	-----	6.3	150	
<i>Acanthophora spicifera</i>	-----	0.50	1.8	5.2	-----	7.3	102.8	
<i>Hypnea sp.</i>	-----	0.30	1.7	5.1	-----	3.5	61	
<i>Ulva lactuca</i>	-----	1.14	4.87	13.47	12.05	11.5	51.33	
<i>Cystoseira barbata</i>	-----	1.46	3.93	10.70	11.48	12.04	51.30	
<i>Enteromorpha compressa</i>	-----	2.50	9.79	26.79	22.76	18.43	68.45	
<i>Ceramium rubrum</i>	-----	1.60	3.92	10.80	12.05	10.40	31.37	Güven et al. 1993
<i>Ulva lactuca</i>	-----	0.22	-----	12.5	6.7	-----	55	
<i>U. fasciata</i>	-----	0.60	-----	12.5	6.1	-----	80	Pulich 1980
<i>Dicthyota volubilis</i> -	5708.2	1.62	9.75	12.87	40.6	25.93	61.99	Este estudio
<i>Cerithium crinale</i> *	5848.3	0.65	28.14	31.01	61.39	38.85	67.48	

* La Gallega

- El Verde

PASTO MARINO

Además de las algas, las plantas marinas también contribuyen de manera importante a la producción primaria marina. Las angiospermas marinas conocidas como "pastos marinos" forman extensas praderas en los arrecifes la Gallega y el Verde; estas praderas sirven como hábitat para muchos animales, además de servir como filtros y estabilizadores de las aguas y sedimentos oceánicos (Dawes, 1991).

Los pastos marinos han sido reportados como acumuladores de metales por Schroeder y Thorhaug (1980), Botello y Villanueva (1983), Brix y Lyngby (1983), Brix et al. (1983), Whabeh (1984), Nienhuis (1986) y Güven et al. (1993); además si se toma en

cuenta la gran biomasa que representan estas comunidades, los pastos pueden servir como un importante reservorio de metales (Whabeh, 1984).

La mayor parte de los estudios acerca de la concentración de metales en pastos marinos se han realizado en la especie *Zostera marina*, en contraste existen muy pocos trabajos realizados con *Thalassia testudinum*. De tal manera, hasta el momento los trabajos realizados que contemplen a *Thalassia* en zonas arrecifales son prácticamente nulos; teniendo en cuenta lo anterior se realizó la comparación de las concentraciones encontradas en *Thalassia* en ambos arrecifes con las concentraciones de otras especies de pastos marinos en zonas arrecifales y en zonas no arrecifales de diversas partes del mundo para tener un punto de referencia acerca de las concentraciones encontradas en los arrecifes.

En general las concentraciones elementales encontradas en los arrecifes la Gallega y el Verde son altas, siendo más altas que las reportadas por Nienhuis (1986) en 7 especies de pastos marinos (consideradas como naturales) en las zonas arrecifales de Indonesia. Por otra parte las concentraciones encontradas en ambos arrecifes son menores a las reportadas por Pulich (1980) y Güven *et al.* (1993) para zonas no arrecifales altamente contaminadas. Schroeder y Thrhaug (1980) indican que las praderas de "pastos marinos" cercanas a una refinería petrolera en la Florida U.S.A., están siendo afectadas severamente por las concentraciones metálicas que dicha refinería desecha; las concentraciones que se encontraron en la Florida son más bajas que las encontradas en los arrecifes estudiados en este trabajo (Tabla 10).

Tabla 10.- Concentración de metales pesados ($\mu\text{g/g}$, peso seco) en pastos marinos de las áreas de estudio y otras regiones.

	Al	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	REFERENCIA
<i>Zostera marina</i>	—	1.92	8.34	23.4	12.8	26.05	48.7	Güven <i>et al.</i> 1993
<i>Halodule ovalis</i>	—	5.1	—	—	—	—	217.9	Whabeh 1984
<i>H. stipulacea</i>	—	6.0	—	—	—	—	68.7	
<i>H. uninervis</i>	—	3.5	—	—	—	—	115.0	
<i>Thalassia testudinum</i>	—	—	—	13	11	—	18	
<i>Cymodocea rotundata</i>	—	0.49	—	6.6	—	2.0	21	Nienhuis 1986
<i>C. serrulata</i>	—	0.68	—	5.8	—	2.1	23	
<i>Thalassia hemprichii</i>	—	0.57	—	7.0	—	2.8	23	
<i>Syringodium sp.</i>	—	0.16	—	3.4	—	2.6	15	
<i>Enhalos acoroides</i>	—	0.36	—	4.4	—	1.7	16	
<i>Halodule uninervis</i>	—	0.60	—	5.6	—	2.6	24	
<i>Thalassiodendron sp.</i>	—	1.54	—	6.0	—	2.5	20	
<i>Halodule wrightii</i>	—	3.6	—	20.0	—	—	87	
<i>Thalassia testudinum</i>	—	1.3	—	3.9	6.9	9.1	24	Schroeder 1980
<i>Thalassia testudinum</i> *	9457.2	0.94	11.09	13.59	12.2	15.48	83.96	Este estudio
<i>Thalassia testudinum</i> -	2650.96	1.0	2.71	7.89	6.83	10.73	35.9	

* La Gallega

- El Verde

De acuerdo con los trabajos que se tomaron como punto de referencia para comparar las concentraciones de metales presentes tanto en algas como en pasto marino, puede sugerirse que existe una alta contaminación por metales en los arrecifes La Gallega y El Verde.

Es importante señalar que las concentraciones de todos los elementos analizados en algas, fueron más altas que las obtenidas de los "pastos marinos", esto puede deberse a las diferencias morfofisiológicas entre ambos grupos, y al comportamiento metabólico de cada metal. Las algas tienden a acumular los metales directamente en las células, mientras que los pastos los pueden fijar en las raíces o en las hojas y translocarlos de un lugar a otro de la planta (Welsh y Denny, 1979 citado en Lyngby *et al.*, 1982), o incluso pueden acumular los metales en las hojas y posteriormente regresarlos al agua. La absorción de metales por consiguiente es más rápida en algas que en los pastos (Pulich, 1980).

GASTRÓPODOS

Los moluscos han sido utilizados como indicadores biológicos de metales en los ambientes acuáticos (Tessier *et al.*, 1996). Generalmente la concentración de metales en sus tejidos es proporcional a la concentración en el ambiente. Una de las principales vías de entrada que tienen los metales a los gastrópodos es el alimento (Brooks y Rumsby, 1965).

De manera general, los gastrópodos pueden concentrar grandes cantidades de metales sin presentar algún síntoma adverso. Esta capacidad de acumulación se debe a los mecanismos de neutralización de metales en gránulos minerales. Esta “destoxificación” se lleva a cabo en el aparato digestivo donde las células basófilas de la glándula digestiva forman intracelularmente gránulos minerales de P y Mg; en estos gránulos son incorporados los metales excedentes. Posteriormente, los gránulos son transferidos a las células “R” del hepatopáncreas en donde se termina su formación. Por este motivo el órgano “crítico”, es decir, el órgano de mayor acumulación es la glándula digestiva y en segundo término el músculo (Segar y Riley, 1971; Masson y Simkiss, 1983).

Los metales tienden a acumularse en la mayoría de los tejidos de los gastrópodos, sin embargo ciertos metales tienen más afinidad para concentrarse en un tejido en específico, Langston y Zhou (1987) y Mason y Simkiss (1983) mencionan que el Cd y el Cr, tienden a acumularse principalmente en la glándula digestiva y Cu es el músculo de los moluscos, esta tendencia de acumulación también se presentó en *Aplysia*.

El órgano del gastrópodo que presentó mayor concentración de metales en ambos arrecifes fue en todos los casos la glándula digestiva, exceptuando la concentración de Cu,

que en músculo fueron las más altas; estas concentraciones pudieran deberse al contenido de Cu en la hemocianina, la cual recorre una amplia red vascular en el músculo. El Al fue otro metal que presentó una alta concentración en la glándula digestiva, estas concentraciones son similares a las reportadas por Segar y Riley (1971) las cuales considera normales ya que es el metal más abundante de la corteza terrestre. Las concentraciones obtenidas en *A. dactylomela* en general se pueden considerar como altas y son similares a las reportadas por Masson y Simkiss (1983), Ober *et al.* (1987), Nicolaidou y Nott (1990) y Wet *et al.* (1994) en diferentes especies de gastrópodos en zonas costeras contaminadas por minas y zonas urbanas (Tabla 11).

Tabla 11. Concentración de metales pesados ($\mu\text{g/g}$, peso seco) en gastrópodos de áreas de estudio y otras regiones.

ESPECIE		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	REFERENCIA
<i>Pseudocrenilabrus philander</i>		-----	-----	9	80	71	279	Wet <i>et al.</i> 1994
<i>Litorina litorea</i>	M	1.12	-----	187.8	2.64	3.36	117.9	Mason <i>et al.</i> 1988
	G	4.47	-----	49.7	13.83	4.45	482.21	
<i>Polymesoda coroliniana</i>		-----	-----	6	N. D.	-----	56	Villanueva 1988
<i>Rangia flexuosa</i>		-----	-----	17	N. D.	-----	31	
<i>Crassostrea virginica</i>		-----	-----	38	84	-----	144	
<i>C. rhizophora</i>		-----	-----	59	147	-----	138	
<i>Mercenaria campechiensis</i>		-----	-----	N. D.	110	-----	44	
<i>Cerithium vulgatum</i>		18.07	113.6	125.39	44.89	-----	1652.9	
<i>Monodonta articulata</i>		5.11	24.69	301.32	10.42	-----	101.40	Nicolaidou y Nott 1990
<i>M. mutabilis</i>		5.77	24.17	222.55	6.46	-----	135.25	
<i>M. turbinata</i>		4.33	6.68	157.39	18.39	-----	113.38	
<i>Comus mediterraneus</i>		9.34	0.67	497.75	13	-----	220.75	
<i>Patella coerulea</i>		-----	8.15	27.10	-----	-----	180.04	
<i>Murex trunculus</i>		1.53	1.48	20.20	26.81	-----	3444.8	
<i>Mytilus edulis</i>		N. D.	1	9.4	1	13.6	86	Ober <i>et al.</i> 1987
<i>Aulacomya ater</i>		3.3	N. D.	9.8	3.5	18.6	96	
<i>Chlamys purpurata</i>		8.2	2.2	32.7	N. D.	32.7	164	
<i>Concholepas concholepas</i>		N. D.	N. D.	21.9	2.2	7.6	56	
<i>Ameghinomya antiqua</i>		2.8	1.4	8.1	4.2	12.6	65	
<i>Thais chocolata</i>		4.9	0.7	26.3	0.4	9.6	138	
<i>Aphysia dactylomela</i> *	M	2.76	0.83	143.54	40.09	28.28	44.46	Este estudio
	G	8.44	16.32	34.27	120.7	39.7	-----	
<i>Aphysia dactylomela</i> -	M	4.12	1.12	109.16	29.16	28.51	43.37	
	G	20.92	24.12	25.44	99.92	52.15	-----	
Moluscos comestibles		0.5	-----	-----	-----	1.0	-----	Norma Oficial

* La Gallega / M = músculo, G = glándula
- El Verde / N. D. no detectable

Es importante señalar que la cantidad de metales en los gastrópodos esta sujeta a factores fisiológicos como el sexo, edad, ciclo de vida, crecimiento, tamaño, hábitos alimenticios y especie, es probable que las altas concentraciones encontradas en *Aplysia* se deban a que es considerablemente más grande que la mayor parte de los gastrópodos comúnmente utilizados para este tipo de análisis.

La Norma Oficial Mexicana NOM-031-SSA1-1993 establece las especificaciones sanitarias para productos de la pesca, Moluscos Bivalvos frescos, refrigerados y congelados; ésta norma contempla en la sección 5 (contaminación por metales pesados), los límites máximos permisibles para los elementos que a su consideración son altamente tóxicos, y considera un máximo de 1.0 $\mu\text{g/g}$. de peso seco para plomo, y 0.5 $\mu\text{g/g}$. de peso seco para cadmio. Aunque *Aplysia* no es un organismo de consumo humano, los límites permisibles de la Norma Oficial brindan un punto de referencia sobre lo que se puede considerar contaminado. De esta manera y de acuerdo a los resultados obtenidos, las concentraciones de al menos Pb y Cd (y muy probablemente las demás concentraciones) en los gastrópodos de los arrecifes La Gallega y el Verde se pueden considerar como contaminantes.

Aplysia dactylomela es un importante herbívoro de las comunidades bentónicas, ya que pasa la mayor parte del día alimentándose, consumiendo diariamente la tercera parte de su peso en algas (Carefoot, 1987) esto además de su tamaño, su evidente capacidad de acumulación de metales y su distribución, cumplen con las características consideradas para un organismo ideal para el análisis de metales y probablemente como un buen bioindicador de estos (Ravera y Riccardi, 1997).

EXCRETAS

La materia fecal en arrecifes de coral representa una de las principales fuentes de nutrientes y constituye la fuente de alimento para la cadena alimenticia detrítica (D'Elia, 1988), consecuentemente si las concentraciones de metales en las excretas son elevadas y podrían ser tóxicas para los consumidores de excremento (Nott y Nicolaidou, 1996).

Gran parte de la composición de las excretas es material algal no digerido, sin embargo la concentración de metales en la materia fecal se debe principalmente a la excreción de los gránulos minerales. El epitelio de la glándula digestiva tiene un ciclo simple funcional; cuando las células que lo componen son necrosadas, se desintegran y pasan al lumen digestivo de la glándula. Estas células muertas son subsecuentemente excretadas con todo y los gránulos minerales que contienen (Boothe y Knauer, 1972).

Las concentraciones de metales determinadas en las excretas de *Aplysia* son altas (Tabla 12), consecuentemente estas cantidades sugieren que las concentraciones expulsadas al medio por el gastrópodo también son considerables. Sin embargo, no todos los metales se comportan de la misma manera en los organismos.

Langston y Zhou (1987) indican que el Cd se acumula en los tejidos de los gastrópodos y la excreción del metal es muy lenta; esto pudiera ocurrir en *Aplysia* ya que las concentraciones de Cd en la glándula digestiva con respecto a las concentraciones de las excretas de *Aplysia* (Tabla 7), son altas, sugiriendo que el elemento es excretado lentamente. Contrariamente, las concentraciones del Cr y el Pb son más altas en las excretas

que en la glándula, sugiriendo que la acumulación de estos metales no es tan alta como la del cadmio y su excreción es relativamente más rápida.

Tabla 12.- Concentración de metales pesados ($\mu\text{g/g}$. peso seco) en excretas de los organismos de las áreas de estudio y otras regiones.

ESPECIE	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	REFERENCIA
<i>Cerithium vulgatum</i>	34.7	35.55	61	34.85	-----	426	Nott <i>et al.</i> 1996
<i>Pugettia producta</i>	3.2	4.1	30	-----	35	78	Boothe 1972
<i>Aplysia dactylomela</i> *	0.21	87.38	24.74	111.6	44.9	654.16	Este estudio
<i>Aplysia dactylomela</i> -	0.26	33.1	17.35	83.3	37.88	355.35	

* La Gallega

- El Verde

Las concentraciones de Cr y Ni en las excretas de *Aplysia* son considerablemente más altas que las reportadas por Boothe y Knauer (1972), incluso más que las reportadas por Nott y Nicolaidou (1996) para zonas contaminadas (Tabla 12), sin embargo, las demás concentraciones presentan cierta similitud. Esta diferencia en las concentraciones de Cr y Ni en las excretas de *Aplysia* y las reportadas puede deberse a la alimentación de las especies y/o las localidades en donde se realizaron los análisis. Cabe señalar que las altas concentraciones de metales excretadas por *A. dactylomela* pueden tener efectos negativos en otros organismos, ya que de acuerdo al estudio realizado por Nott y Nicolaidou (1996) los altos niveles de metales en excretas del gastrópodo *Cerithium vulgatum* pueden ser tóxicos para los consumidores de excremento.

CORRELACIÓN

Aún cuando se encontraron algunas correlaciones significativas entre algunos de los "niveles" propuestos, la evidencia es insignificante en el contexto de la situación experimental de este trabajo, es decir, que los datos en los que se basa la prueba, no proporcionan evidencia suficiente que apoye una clara relación entre las muestras. Consecuentemente en este estudio, el espectro de variación de las concentraciones de metales es independiente entre las muestras relacionadas tróficamente. Esto no implica que no exista una relación entre los niveles tróficos propuestos en este estudio y las concentraciones de metales en cada nivel, de hecho las Figuras 4 a 10 muestran, una tendencia en la acumulación de metales de acuerdo al aumento en la posición trófica; esta tendencia, también es reportada por Jennings y Rainbow (1979), Weis y Weis (1993), Van Haften y Lasenby (1994) y Wallace y López (1996); sin embargo esta información no es del todo aceptable ya que solo se trata de una observación cualitativa.

Jennings y Rainbow (1979), Ettajani *et al.* (1992), Weis y Weis (1993), Francesconi *et al.* (1994), Van Haften y Lasenby (1994), Wallace y López (1996) y González *et al.* (1998) encontraron relaciones entre diferentes grupos de organismos acuáticos marinos relacionados tróficamente, de hecho estos autores proponen que el alimento es la mayor fuente de metales para tejidos como el intestino, glándula digestiva o inclusive para todo el organismo.

Es probable que la puntualidad de los muestreos pudo no haber permitido que se determinaran variaciones en las concentraciones metálicas de las muestras, que pudieran indicar alguna relación de dependencia entre los diferentes niveles tróficos propuestos.

Ettajani *et al.* (1992) y Francesconi *et al.* (1994) mencionan que en éste tipo de trabajos se deben controlar las concentraciones de metales que entran al sistema y así poder detectar cualquier variación en las concentraciones de cada nivel y con estas variaciones determinar alguna relación.

Este tipo de estudios es muy complejo ya que además de lo anterior se deben incluir en él, factores como el tipo de organismo con el que se trabaja, el estado fisiológico de este, la concentración del contaminante en el ambiente, la forma química del elemento, el tiempo de residencia en el organismo, el tejido donde se acumula, el sexo del organismo, la dieta y factores de acumulación en los organismos (Forstner y Wittmann, 1979; Nicoulaidou y Nott, 1990; Dallinger, 1994; Nott y Nicoulaidou, 1996; Ravera y Riccardi, 1997).

Es importante señalar que aunque no se hayan encontrado correlaciones entre las muestras, los sedimentos pueden ser una fuente muy importante de metales para el sistema, ya que las concentraciones de metales en ellos son altas, y los fenómenos meteorológicos conocidos como "Nortes" y las actividades de dragado del canal de entrada al puerto, resuspenden importantes cantidades de sedimentos, removiendo los metales que se encuentran en ellos y los ponen en contacto directo con la biota; las descargas de los ríos más cercanos al SAV, La Antigua, Jamapa y Papaloapan llevan consigo altas proporciones de sedimento (probablemente con grandes cantidades de metales también) que llegan hasta los arrecifes y pasan a formar parte de los "nuevos" sedimentos del arrecife (Horta-Puga en prensa).

COMPARACIÓN ENTRE ARRECIFES

Los metales en el medio acuático se transportan principalmente de manera soluble o particulada, esto los mantiene en suspensión coloidal hasta que reaccionan químicamente para formar sólidos o interactúan físicamente para construir masas coloidales más grandes (Forstner y Wittman, 1979; Trefry, 1981; Páez-Ozuna, 1996); eventualmente estas formas se incorporan a los sedimentos o a la biota acuática por medio de adsorción, precipitación, floculación, coloidal, o fijaciones biológicas (Mandelli, 1979; Florence, 1982).

Las concentraciones de los metales Cr, Cu y Zn fueron más altas en el arrecife La Gallega, mientras las concentraciones de Al, Ni y el Pb no presentaron diferencias entre ambos arrecifes, es decir tanto en La Gallega como en El Verde las concentraciones de estos metales son similares, el Cd presentó mayor concentración en el arrecife el Verde debido probablemente a su alta solubilidad (Villanueva y Páez-Ozuna 1996). De acuerdo con la Secretaría de Marina (1988) todos estos metales son muy utilizados por algunas industrias que tienen sus instalaciones en el Puerto de Veracruz (parte del Puerto se encuentra construido sobre el arrecife la Gallega), entre estas industrias se encuentran Metales de Veracruz, Astilleros de Veracruz, Muelle de Pemex y Planta Empacadora de Alimentos Hérdex; también menciona que es probable que como consecuencia de la utilización de estos elementos, en los desechos de estas industrias se puede encontrar cantidades considerables de los citados metales, los cuales pueden posteriormente depositarse en el mar; aunado a esto, las aguas de desecho de la ciudad de Veracruz, que incluyen las aguas de desecho del área industrial, son descargadas al mar en Playa Norte,

en un área entre los arrecifes de Punta Gorda y la Gallega, aún cuando existe una planta de tratamiento, esta no tiene la capacidad para tratar toda el agua de desecho que llega, consecuentemente parte es descargada directamente, sin previo tratamiento al mar (Horta com pers). Es evidente que el arrecife la Gallega por su cercanía a la ciudad y Puerto sea el que presente mayor concentración de metales, sin embargo y aún con estas diferencias, ambos arrecifes presentan ciertas similitudes entre las concentraciones de metales, por consiguiente la distancia entre ellos no es significativa como para que se presenten diferencias marcadas entre las concentraciones, y así poder considerar que uno de estos arrecifes está menos contaminado que el otro.

La similitud en las concentraciones de metales en ambos arrecifes puede deberse a que el patrón de dispersión que pueden tener los metales en el medio acuático depende primordialmente de las corrientes locales de la zona (Mandelli, 1979). Específicamente existen dos corrientes que pudieran estar afectando la dispersión de los metales en el SAV: la corriente principal y la corriente de la bocana del puerto. La corriente principal está determinada por la dirección del viento, normalmente tiene dirección NO y cuando se presenta los vientos del norte su dirección cambia al SE. La corriente de la bocana del puerto no presenta una relación tan marcada con los vientos y varía solamente en proporción a la influencia de estos presentando un comportamiento de "abanico", es decir en Marzo el 63% de la corriente proveniente de la bocana se dirige al SE y S y el 37% tiene dirección N-NO, y en Agosto el 54% se dirige al N-NO y NE, el 26% al E y el 18% al SO (Hernández, 1982; Vázquez, 1983). Es probable que este patrón de corrientes sea el responsable de distribuir los productos de desechos de la ciudad y Puerto de Veracruz a todos los arrecifes "ceranos".

Es imprescindible señalar que el presente estudio arroja datos muy importantes en cuanto al grado de contaminación por metales pesados en áreas arrecifales. Sin lugar a dudas la elaboración del presente estudio contribuye al conocimiento de la contaminación que existe en ecosistemas de esta naturaleza, principalmente en los arrecifes cercanos al Puerto y ciudad de Veracruz, Veracruz.

CONCLUSIONES

- Las concentraciones de metales pesados en los sedimentos, algas, pastos marinos, gastrópodos y excretas de los arrecifes La Gallega y El Verde son altas en comparación con los niveles naturales.
- Los metales que presentaron mayor concentración en todas las muestras fueron el aluminio, el níquel y el cobre en el músculo.
- El metal que presentó menor concentración en todas las muestras fue el cadmio.
- Las concentraciones más altas de metales pesados se presentaron en los tejidos de *A. dactylomela* tanto en la glándula digestiva como en el músculo.
- No se encontró relación alguna entre los diferentes niveles tróficos propuestos, sin embargo es probable que sí que exista relación entre los niveles tróficos propuestos.
- Las concentraciones de Cr, Cu y Zn fueron mayores en el arrecife La Gallega, mientras que las concentraciones de Al, Ni y Pb no presentaron diferencias entre arrecifes. Las concentraciones de Cd fueron más altas en el arrecife El Verde.
- La cercanía a la ciudad y Puerto de Veracruz no fue factor condicionante para que el arrecife la Gallega presentara las concentraciones más altas de todos los metales ya que el arrecife El Verde también presentó altas concentraciones elementales.
- De acuerdo con los datos obtenidos en el presente trabajo se puede concluir que tanto el arrecife La Gallega como el arrecife El Verde se encuentran altamente contaminados por metales.

REFERENCIAS.

- ✓ Álvarez, R.U., Rosales, H.L., Carranza, E.A. (1986) Heavy metals in Blanco river sediments, Veracruz, México. *Ann Ins Cienc Mar Limnol Univ Nac Auton Mex* 13: 1-10
- ✓ Arjonilla, M., Gómez-Parra, A. (1994) Sediment analysis does not provide a good measure of heavy metal Bioavailability to *Ceratoderma glaucum* (Mollusca: Bivalvia). In: *Confined Coastal Ecosystems*. *Bull Environ Contam Toxicol* 52: 810-817
- ✓ Babich, H., Stotzky, G. (1983) Physicochemical factors of natural reservoir affect the transformation and exchange of heavy metals toxic to microbes. *Ecol Bull (Stockholm)* 35: 315-323
- ✓ Bastidas, C., Bone, D., García, E.M. (1999) Sedimentation rates and metal content of sediments in a Venezuelan Coral Reef. *Mar Poll Bull* 38 (1): 16 - 24
- ✓ Black, W.A.P., Mitchell, R.L. (1952) Trace elements in the common brown algae and sea water. *Journ Mar Biol Assoc* 30: 575-584
- ✓ Boothe, P.N., Knauer, G.A. (1972) The possible importance of fecal material in the biological amplification of trace and heavy metals. *Limnol Oceanogr* 17: 270-274
- ✓ Botello, A., Villanueva, S. (1983) La contaminación y procesos geoquímicos en la Laguna de Términos, Campeche, México. In: *Gobierno del Estado de Tabasco (ed) 1988 Ecología y Conservación del delta de los ríos Usumacinta y Grijalva (memorias)*.
- ✓ Brix, H., Lyngby, J.E. (1983) The distribution of some metallic elements in eelgrass (*Zostera marina*) and sediments in Limfjord, Denmark. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 16: 455-467
- ✓ Brix, H., Lyngby, J.E., Schierup, H.H. (1983) Eelgrass (*Zostera marina*) as an indicator organism of trace metals in the Limfjord, Denmark. *Marine Environmental Research*. 8: 165-181
- ✓ Brooks, R.R., Rumsby, M.G. (1965) The Biogeochemistry of trace element uptake by some New Zeland Bivalves. *Limnol Oceanogr* 10: 521-527
- ✓ Bryan, G.W. (1969) The absorption of zinc and other metals by the brown seaweed *Laminaria digitata*. *J Mar Biol U. K.* 49: 225-243
- ✓ Bryan, G.W. (1971) The effects of heavy metals on marine and estuarine organisms. *Proc R Soc Lond (B)* 177: 389-410
- ✓ Campbell, N.A. (1992) *Biology*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.

- ✓ Campbell, P.G., Tessier, A. (1990) Biological availability of metals in sediment: analytical approaches. In: Vernet, J.P. (ed). Heavy metals in the environment. Elsevier
- ✓ Carefoot, T.H. (1987) *Aplysia*: Its biology and ecology. *Oceanogr Mar Biol Ann Rev* 25: 167-284.
- ✓ Carricart Ganivet, J.P., Horta Puga, G. (1993) Arrecifes de Coral en México. In: Salazar-Vallejo, S. I. y González, N. E. (ed) Biodiversidad Marina y Costera de México. Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México.
- ✓ CEM corporation (1996) Microwave sample preparation system. Applications manual.
- ✓ Chukwuma, C. (1996) Evaluating baseline data for trace elements, pH, organic matter content, and bulk density in agricultural soils in Nigeria. *Water, Air and Soil Pollution*. 86: 13-34.
- ✓ Ciceri, C., Maran, S., Martinotti, W., Queirazza, G. (1992) Geochemical cycling of heavy metals in a marine coastal area: benthic flux determination from pore water profiles and *in situ* measurements using benthic chambers. *Hydrobiologia*. 235(236): 501-517.
- ✓ D'elia, C.F. (1988) The cycling of essential elements in coral reefs. In: Pomeroy, J., Alberts, J. (ed) Concepts of Ecosystems Ecology. Springer, New York, 1-230.
- ✓ Dallinger, R. (1994) Invertebrate Organisms as Biological Indicators of Heavy Metal Pollution. *Applied Biochemistry & Biotechnology* 48: 27-31.
- ✓ Dawes, C.J. (1991) Botánica marina. Limusa, México
- ✓ DeAngelis, D.L. (1992) Dynamics of nutrients cycling and food webs. Chapman & Hall U.S.A.
- ✓ Denton, G.R.W., Burdon Jones, C. (1986)a Trace metals in corals from the Great Barrier Reef. *Mar Poll Bull* 17(5): 209-213
- ✓ Denton, G.R.W., Burdon Jones, C. (1986)b Trace metals in algae from the Great Barrier Reef. *Mar Poll Bull* 17(3): 98-107
- ✓ Diario Oficial de la Federación (1994) Norma Oficial Mexicana NOM-031-SSA1-1993, Productos de la pesca. Moluscos bivalvos frescos, refrigerados y congelados. Especificaciones Sanitarias. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México
- ✓ Drifmeyer, J.E., Thayer, G.W., Cross, F.A., Zieman, J.A. (1980) Cycling of Mn, Fe, Cu, and Zn by eelgrass, *Zostera marina*. *Ammer J Bot* 67(7): 1089-1096

- ✓ Emery, K.O. (1963) Arrecifes coralinos en Veracruz, México. *Geofísica Internacional* 3(1): 11-17.
- ✓ Entsch, B., Sim, R.G., Wellington, J.T. (1983) Phosphorus and nitrogen in coral reef sediments. *Limnol Oceanogr* 28: 465-476.
- ✓ Ettajani, H., Amiard Triquet, C., Amiard, J.C. (1992) Etude expérimentale du transfert de deux éléments traces (Ag, Cu) dans une chaîne trophique marine: eau-particules (sédiment naturel, microalgue) mollusques filtreurs (*Crassostrea gigas* Thunberg). *Water, Air and soil pollution* 65: 215 - 236
- ✓ Florence, T.M. (1982) The speciation of trace elements in water. *Talanta*. 29: 345-364.
- ✓ Forstner, U., Wittman, G.T.W. (1979) Metal pollution in the aquatic environment. Springer-Verlag, Berlin
- ✓ Francesconi, K.A., Moore, E.J., Edmonds, J.S. (1994) Cadmium from seawater and food by the western rock lobster *Panulirus cygnus*. *Bull Environ Contam Toxicol* 53: 219-223
- ✓ Garnham, G.W., Codd, G.A., Gadd, G.M. (1992) Kinetics of uptake and intracellular location of cobalt, manganese and zinc in the estuarine green alga *Chlorella salina*. *Appl Microbiol Biotechnol* 37: 270-276
- ✓ González, F., Silva, M., Schalscha, E., Alay, F. (1998) Cadmium and lead in a tropical marine chain. *Bull Environ Contam Toxicol* 60: 112 - 118
- ✓ González Fierro, A., Vázquez Botello, A., Villanueva Fragoso, S., Ponce Vélez, G. (1994) Presencia de metales en sedimentos recientes y organismos de la laguna Sontecomapan, Veracruz, México. *Hidrobiológica* 4(1-2): 35-43
- ✓ Greenaway, A.M., Rankine Jones, A.I. (1992) Elemental concentrations in coastal Sediments from Hellshire, Jamaica. *Mar Poll Bull* 24(8): 390-397.
- ✓ Güven, K.C., Saygi, N., Öztürk, B. (1993) Survey of metal contents of Bosphorus algae, *Zostera marina* and sediments. *Botanica Marina* 36: 175-178.
- ✓ Guzmán, H.M., Jiménez, C.E. (1992) Contamination of coral reefs by heavy metals along the Caribbean coast of Central America (Costa Rica and Panama). *Mar Poll Bull* 24(11): 554 -561
- ✓ Hernández, A.E., Hernández, V.E., Botello, A.V., Villanueva, F.S. (1995) Deterioro por metales del sistema lagunar de Mandinga, Veracruz. 6^o Congreso Nacional de Geoquímica. Instituto Nacional de Geoquímica, A. C. México. *Acta INAGEQ*. 2: 307-312.

- ✓ Hernández, R.C. (1982) Algunos Resultados del estudio de corrientes en la bocana del Puerto de Veracruz, Ver. Dirección General de Oceanografía. Secretaria de Marina. México
- ✓ Horta Puga, G., Ramírez Palacios, R. (1996) Niveles de plomo en esqueletos del coral arrecifal *Montastraea annularis*. In: Botello, A.V., Rojas Galaviz, J.L., Benitez, J.A., Zárate Lomeli, D. (ed) Golfo de México, Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias. Universidad Nacional Autónoma de Campeche. *Epomex Serie Científica*.
- ✓ Howard, L.S., Brown, B.E. (1984) Heavy Metals and Reef Corals. *Oceanogr Mar Biol Ann Rev* 22: 195-210
- ✓ Jennings, J.R., Rainbow, P.S. (1979) Studies on uptake of cadmium by the crab *Carcinus maenas* in the laboratory. I. Accumulation from sea water and a food source. *Marine Biology* 50: 131- 139
- ✓ Kárez, C.S., Magalhaes, V.F., Pfeiffer, W.C. (1994) Trace metals accumulation by algae in Sepetiba Bay, Brazil. *Environmental Pollution* 83: 351-356
- ✓ Kureishy, T.Q. (1992) Heavy metals in algae around the coast of Qatar. *Mar Poll Bull* 22(8): 414 - 416
- ✓ Kuyucak, N., Volesky, B. (1994) Biosorption by algal biomass. In: Volesky B (ed) *Biosorption of heavy metals*. C R C Press. Boston, pp 1-198
- ✓ Langston, W.J., Zhou, M. (1987) Cadmium accumulation, distribution and metabolism in the gastropod *Littorina littorea*: The role of metal-binding proteins. *J Mar Biol Ass U.K.* 67: 585-601
- ✓ Loring, D.H. (1979) Geochemistry of cobalt, nickel, chromium and vanadium in the sediments of the estuary and Gulf of St. Lawrence. *Can J Earth Sci* 16: 1196-1209
- ✓ Loya, Y. (1975) Possible effects of water pollution on the community structure of Red Sea corals. *Mar Biol* 29: 177-185
- ✓ Luoma, S.N. (1989) Can we determine the biological availability of sediment-bound trace elements? *Hydrobiologia* 176/177: 379-396
- ✓ Lyngby, J.E., Brix, H., Schierup, H.H. (1982) Absorption and translocation of zinc in eelgrass (*Zostera marina*). *J Exp Mar Biol Ecol* 58: 259-270
- ✓ Lyons, B., Armstrong, P., Gaudette, H. (1983) Trace metals concentration and fluxes in Bermuda sediments. *Mar Poll Bull* 14(2): 65-68
- ✓ Mailman, R.B. (1980) Heavy metals. In: Guthrie FE, Perry JJ (ed) *Introduction to environmental toxicology*. Elsevier, New York

- ✓ Mandelli, E.F. (1979) Contaminación por metales pesados. Rev Com Perm Pacifico Sur 10: 209-228
- ✓ Mason, A.Z., Simkiss, K. (1983) Interaction between metals and their distribution in tissues of *Littorina littorea* (L). collected from clean and polluted sites. J Mar Biol Ass U.K. 63: 661-672
- ✓ Meyer, J.L., Schultz, E.T. (1985) Migrating haemilid fishes as a source of nutrients and organic matter on coral reefs. Limnol Oceanogr 30: 146-156
- ✓ Miller, P.A., Munkittrick, K.R., Dixon, D.G. (1992) Relationship between concentrations of copper and zinc in water, sediment, benthic invertebrates, and tissues of white sucker (*Catostomus commersoni*) at metal-contaminated sites. Can J Fish Aquat Sci 49: 978-984
- ✓ Morelock, J., Koenig, K.J. (1967) Terrigenous sedimentation in a shallow water coral reef environment. Journal of Sedimentary Petrology 37(4): 1001-1005
- ✓ Nicolaidou, A., Nott, J.A. (1990) Mediterranean Pollution from a ferro-nickel smelter: Differential uptake of metals by some gastropods. Mar Poll Bull 21(3): 137-143
- ✓ Nienhuis, P.H. (1986) Background levels of heavy metals in nine tropical seagrass species in Indonesia. Mar Poll Bull 17(11): 508-511
- ✓ North, W.J. (1980) Trace metals in giant kelp, *Macrosystis*. Amer J Bot 67(7): 1097-1101
- ✓ Nott, J.A., Langston, W.J. (1989) Cadmium and the Phosphate Granules in *Littorina littorea*. J Mar Biol Ass U.K. 69: 219-227
- ✓ Nott, J.A., Nicolaidou, A. (1990) Transfer of metal detoxification along marine food chains. J Mar Biol Ass U. K. 70: 905-912
- ✓ Nott, J.A., Nicolaidou, A. (1996) Kinetics of metal in molluscan faecal pellets and mineralized granules, incubated in marine sediments. J Exp Mar Biol Ecol 197: 203-218
- ✓ Ober, A.G., González, M., Santa María, I. (1987) Heavy metals in Molluscan, Crustacean, and other commercially important Chilean marine coastal water species. Bull Environ Contam Toxicol 38: 534 -539
- ✓ Odum, E. (1972) Ecología. Serie Biología moderna. Compañía Editorial Continental, S. A., México

- ✓ Páez Ozuna, F. (1996) Fuente de metales en la zona costera marina. In: Botello, A.V., Rojas Galaviz, J.L., Benítez, J.A., Zárate Lomeli, D. (ed) Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. *Epomex Serie Científica*, México
- ✓ Páez Osuna, F., Botello, A.V., Villanueva, S.F. (1986) Heavy metals in Coatzacoalcos estuary and Ostion Lagoon, Mexico. *Mar Poll Bull* 11: 516-519
- ✓ Paucot, H., Wollast, R. (1997) Transport and transformation of trace metals in the Scheldt estuary. *Marine Chemistry* 58: 229-244
- ✓ Pémex (1987) Evaluación de los corales escleractinios del sistema arrecifal del Puerto de Veracruz. Pémex y SECMAR. GPTA-E-01/87, Mexico
- ✓ Pulich, W.M. (1980) Heavy metals accumulation by selected *Halodule wrightii* asch. Populations in the Corpus Christi Bay area. *Contr Mar Sci* 23: 89-100
- ✓ Rainbow, P.S., Phillips, D.J., Depledge, M.H. (1990) The significance of trace metal concentrations in marine invertebrates. A need for laboratory investigation of accumulation strategies. *Mar Poll Bull* 21(7): 321-324
- ✓ Ravera, O., Riccardi, N. (1997) Biological monitoring with organisms accumulator of pollutants. *Marine Chemistry* 58: 313-318
- ✓ Ríos, L. (1993) Evaluación de las concentraciones de metales pesados en sedimentos de la plataforma continental del los estados de Veracruz y Tabasco. México. Tesis profesional. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM, México
- ✓ Rodríguez, C.P.A. (1994) Evaluación de metales en sedimentos, agua y brota de las lagunas Salada, El Llano y la Mancha, Veracruz, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM, México
- ✓ Schroeder, P.B., Thorhaug, A. (1980) Trace metal cycling in tropical-subtropical estuaries dominated by the seagrass *Thalassia testudinum*. *Amer J Bot* 67(7): 1075-1088
- ✓ Segar, D.A., Riley, J.P. (1971) The distribution of the major and some minor elements in marine animals. Part II Molluscs. *J Mar Biol Ass U.K.* 51: 131-136
- ✓ Sfriso, A., Marcomini, A., Zanette, M. (1995) Heavy metals in sediments, SPM and phytozoobenthos of the lagoon of Venice. *Mar Poll Bull* 30(2): 116-124
- ✓ Staley, J.T., Orians, G.H. (1992) Evolution and the biosphere. In: Butcher, S.S., Charlson, R.J., Orians, G.H., Wolfe, G.V. (ed) *Global Biogeochemical Cycles*. Academic Press, New York

ESTA TESIS NO DEBE
 SALIR DE LA BIBLIOTECA

- ✓ Szefer, P. (1986) Some metals in benthic invertebrates in Gdansk Bay. *Mar Poll Bull* 17(11): 503-507
- ✓ Tessier, A., Campbell, P.G.C., Auclair, J.C., Bisson, M. (1984) Relationships between the partitioning of trace metals in sediments and their accumulation in the tissues of the freshwater mollusc *Elliptio complanata* in a mining area. *Can J Fish Aquat Sci* 41: 1463-1472
- ✓ Tessier, A., Campbell, P.G.C. (1987) Partitioning of trace metals in sediments: Relationships with bioavailability. *Hidrobiologia* 149: 43-52
- ✓ Tessier, L., Villancourt, G., Pazdernik, L. (1996) Laboratory study of Cd and Hg uptake by two freshwater molluscs in relation to concentration, age and exposure time. *Water, Air and Soil Pollution* 86: 347-357
- ✓ Trefry, J.H. (1981) A review of existing knowledge on trace metals in the Gulf of Mexico. In: *Proceedings of a Symposium on Environmental Research Needs in the Gulf of Mexico (GOMEX), Vol II B*
- ✓ Turner, D.R. (1986) Biological availability of trace metals. In: Lasserre, P., Martin, J.M. (ed), *Biogeochemical processes at the land-sea boundary*. Elsevier, Amsterdam
- ✓ Vargas Hernández, J.M., Hernández Gutierrez, A., Carrera Parra, L.F. (1993) Sistema Arrecifal Veracruzano. In: Salazar Vallejo, S.I., González, N.E. (ed) *Biodiversidad Marina y Costera de México*. Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México
- ✓ Van Haften, M., Lasenby, D.C. (1994) Changes in the amount of cadmium in food ingested by the creek chub, *Semotilus atromaculatus*. *Bull Environ Contam Toxicol* 53: 224-229
- ✓ Varian (1988) *Analytical methods for graphite tube atomizers*. Australia
- ✓ Varian (1989) *Analytical methods for flame absorption spectrometry*. Australia
- ✓ Vázquez, C.A. (1983) *Corrientes marinas en las cercanías al Puerto de Veracruz en febrero de 1980*. Dirección General de Oceanografía. Secretaría de Marina, México
- ✓ Viarengo, A. (1985) Biochemical effects of trace metals. *Mar Poll Bull* 16(4): 47-61
- ✓ Villanueva, S., Botello, A. (1998) Metal pollution in coastal areas of Mexico. *Rev Environ Contam Toxicol* 157: 53-94
- ✓ Villanueva, F.S., Botello, V.A. (1992) Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: una revisión. *Rev Int Contam Ambien* 8(1): 47-61
- ✓ Villanueva FS, Páez-Ozuna F (1996) Niveles de metales en el Golfo de México: agua, sedimentos y organismos. In: Botello, A.V., Rojas Galaviz, J.L., Benitez, J.A., Zárate

Lomeli, D. (ed) Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. *Epomex* Serie Científica, México

- ✓ Wallace, W., Lopez, G. (1996) Relationships between subcellular cadmium distribution in prey and cadmium trophic transfer to a predator. *Estuaries* 9 (4): 923 - 930
- ✓ Waldichuck, M. (1989) The state of pollution in the marine environment. *Mar Poll Bull* 20(12): 598-602
- ✓ Webb, K.L., D'elia, C.F., DuPaul, W.D. (1977) Biomass and nutrients flux measurements on *Holothuria atra* populations on windward reefs flats at Enewetak, Marshall islands. *Proc. 3rd Int Coral Reef Symp.* 1: 409-414
- ✓ Weis, J.S., Weis, P. (1993) Trophic transfer of contaminants from organisms living by chromated-copper-arsenate (CCA)-treated wood to their predators. *J Exp Mar Biol Ecol* 168: 25-34
- ✓ Wet, L.M., Schoonbee, H.J., Wet, L.P.D., Wiid, A.J. (1994) Bioaccumulation of metals by the southern mouthbrooder, *Pseudocrenilabris philander* (Weber, 1897) from a mine-polluted impoundment. *Water SA* 20(2): 119-125
- ✓ Whabeh, M.I. (1984) Levels of zinc, manganese, magnesium, iron and cadmium in three species of seagrass from Aqaba (Jordan). *Aquatic Botany* 20: 179-183
- ✓ Wiebe, W.J., Johannes, R.E., Webb, K.L. (1975) Nitrogen fixation in a reef community. *Science* 188: 257-259
- ✓ Williams, S.L., Gill, I.P., Yarish, S.M. (1985) Nitrogen cyclin in backreef sediments. *5th Int Coral Reef Symp* 3: 389-394
- ✓ Winemiller, K.O., Polis, G.A. (1996) Food Webs: What can they tell us about the world? In: Polis, G.A., Winemiller, K.O. (ed) *Food webs. Integration of patterns and dynamics.* Chapman & Hall. International Thompson Publishing,

ANEXO I

ALUMINIO

El Aluminio se deriva del nombre "alum" del doble sulfato $KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$ el cual era usado medicinalmente en la antigua Grecia y Roma. Su número atómico es 13 y su peso atómico es 27. El primer aislamiento del metal se realizó en 1854 por C. Deville usando sodio, en ese tiempo era considerado un metal precioso y era exhibido y utilizado junto a las joyas de la corona en la exposición de París en 1855. Hacia fin de siglo se desarrollo la técnica de electrólisis la cual permite aislar fácilmente el metal de la criolita (Na_3AlF_6). Esta innovación provocó una rápida producción mundial.

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre (8.3 %) y solo es superado en abundancia por el O (45.5 %) y el Si (25.7 %); es constituyente principal de las rocas ígneas, feldspatos y micas. También se presenta en algunos minerales como en la criolita (Na_3AlF_6), garnet ($Ca_3Al_2(SiO_4)_3$). El corundo (Al_2O_3) es una de las sustancias más duras y por consiguiente es usado como abrasivo; muchas gemas son formas impuras del Al_2O_3 , como el rubí (Cr), zafiro (Co), la turquesa ($Al_2(OH)_3PO_4H_2O/Cu$). Comercialmente el mineral más importante es la bauxita $Al_2O_3 \cdot xH_2O$. El aluminio es el metal no ferroso más utilizado en la industria de la construcción, de la transportación, y para la fabricación de contenedores, líneas eléctricas, empaque, maquinaria, etc. Es posible que el aluminio actúe interfiriendo con el metabolismo normal de las células nerviosas, dejándolas silenciosas eléctricamente, incapaces de conducir señales nerviosas. Sin embargo esto no se ha probado aún.

CADMIO

El cadmio fue descubierto en 1817 por F. Stromeyer de Gottingen en una muestra de "cadmia" (ahora conocida como calamita). Su número atómico es 48, con un peso atómico 112.41 y con un punto de fusión y ebullición de 321 C y 756 C respectivamente.

La abundancia del cadmio en la corteza terrestre es cerca de .16 ppm. Es un elemento calcófilo y cuando la corteza terrestre se solidificó, este metal se separó en conjunción con el azufre, por esta razón los minerales más importantes de este metal son sulfuros. El cadmio es encontrado principalmente como greenockita (CdS)(calamita), pero comercialmente hablando los minerales más utilizados son los relacionados con el zinc. La mayor parte del cadmio se utiliza como recubrimiento anticorrosivo, también en varias aleaciones metálicas, dado su punto de fusión bajo. Se usa en soldaduras suaves y de aluminio, en la manufactura de baterías recargables de níquel y cadmio.

El cadmio no tiene funciones biológicas conocidas y junto con el mercurio es uno de los elementos más tóxicos. El cadmio es extremadamente tóxico y se acumula en los riñones e hígado, con una prolongada exposición a pequeñas cantidades provoca disfunción en los riñones, descalcificación y su inhalación produce al nivel de vías respiratorias edema y fibrosis alveolar en un período de 48 horas. Al cabo de 7 días la complicación produce neumonía intersticial proliferativa causando incluso la muerte; la reacción del cadmio en el organismo es al nivel de proteínas uniéndose a los grupos SH inhibiendo enzimas que llevan este grupo, también puede inhibir enzimas a partir de zinc ya que compite por la posición de éste metal en la proteína sustituyéndolo.

CROMO

El cromo fue descubierto por el francés L. N Vauquelin en 1797. Vauquelin descubrió el óxido de un nuevo elemento en un mineral siberiano conocido como crocoita ($PbCrO_4$), y el siguiente año aisló el metal llamándolo cromo (del griego *chroma*: color) debido a la variedad de colores encontrados en este elemento. El cromo se encuentra en unas 112 ppm en las rocas de la corteza terrestre y es comparable en abundancia con el vanadio (136 ppm) y el cloro (126 ppm). Su número atómico es 24, su peso atómico 51.99, densidad 7.14 y punto de fusión y ebullición de 1900 y 2642 °C respectivamente.

El único mineral de importancia comercial es la cromita FeCrO_4 , otras fuentes menos utilizadas es la crocoita PbCrO_4 ; algunas gemas como la esmeralda y el rubí obtienen su color del cromo.

El cromo es utilizado para diversos usos, como colorantes, pigmentos, plaguicidas, el cromado electrolítico o galvano plastia, curtido de pieles y cueros, productos para la conservación de madera, cerámica metálica, fotograbado, cerillos, explosivos, linóleo, etc. Los compuestos derivados del cromo pueden ingresar a los organismos por exposición accidental. El cromo III es un elemento esencial en el metabolismo de los mamíferos y junto a la insulina es responsable de la limpieza de la glucosa en el torrente sanguíneo. El cromo III se encuentra en la cromita pero al entrar en contacto con el oxígeno se oxida convirtiéndose en cromo VI. En el hombre la intoxicación aguda por ingestión de dicromato de potasio (del ion exavalente) causa daños gastrointestinales, insuficiencia hepatorenal, lesiones cutáneas, nasales y es considerado un agente carcinogénico.

COBRE

El cobre es conocido como metal moneda junto con la plata y el oro porque ciertamente es el uso más común de estos metales. Es uno de los primeros metales conocidos por el hombre. Se estima que el cobre es utilizado desde hace 5000 años pero se tiene certeza de que se extraía en medio oriente desde los 3500 Y 3000 A. C. cuando estaba en su esplendor la época de bronce y era muy apreciado en la India, Mesopotamia y Grecia.

El nombre cobre y el símbolo Cu se deriva del latín *aescyprum* desde la época de los romanos quienes fueron los primeros en obtener el cobre como metal. Su número atómico es 29, su peso atómico es 63.546, densidad 8.94 y punto de fusión y ebullición de 1083 y 2595 °C respectivamente.

Su abundancia en la corteza terrestre es de 68 ppm, es encontrado principalmente como sulfuro, óxido o carbonato. Los principales minerales son la pirita CuFe S_2

(calcopirita) en donde se encuentra aproximadamente el 50% de todos los depósitos de Cu, la cuprita Cu_2O , malaquita $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ y al calcocita Cu_2S .

El cobre es utilizado para una gran diversidad de productos como en la producción de bronce, latón y otras aleaciones. En la manufactura de monedas, conductores eléctricos, tuberías, municiones, sales de cobre, esculturas de arte, etc.

El cobre es un elemento esencial para las plantas y animales. Necesario en la síntesis de complejos biológicos tales como la feofitina hemocianina, tirocinasa, ceruloplasmina, etc. El cobre por sí mismo es poco tóxico, el sulfato de cobre es un fuerte irritante de la piel y membranas mucosas. Los vapores de óxido de este metal pueden causar fiebre, también se ha relacionado al cobre como un posible causante de la hematocromatosis.

NÍQUEL

Una aleación de níquel fue conocida en China hace 2000 años. Era un mineral muy familiar para los mineros de Saxon; debido a su color rojizo, a su dureza (NiAs) y a que este mineral cubre superficialmente al Cu_2O e complicaba la extracción del cobre, atribuyeron este problema a un deminio y llamaron a este metal "kupfernickel". En 1751 A. F. Cronsted aisló el metal impuro de algunos minerales suecos e identificó el componente metálico del "kupfernickel" y lo llamó níquel.

Su número atómico es 28, peso atómico 58.69, densidad 8.9, punto de fusión y ebullición de 1555 y 2837 °C respectivamente. El níquel es el séptimo metal de transición más abundante y ocupa el lugar 22 en abundancia de la corteza terrestre (99 ppm). Es un mineral comercialmente importante y se clasifica en 2 tipos:

- 1) Lateritas. Con óxidos/silicatos como la garnierita $(\text{Ni, Mg})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, y limonita niquelífera $(\text{Fe, Ni})\text{O}(\text{OH}) \cdot n \text{H}_2\text{O}$, los cuales se concentran en áreas húmedas y lluviosas tropicales.
- 2) Sulfido. Como la pentlandita $(\text{Ni, Fe})_9\text{S}_8$, asociado a cobre, cobalto y metales preciosos. Esta forma se encuentra comúnmente en zonas templadas.

El níquel es usado en trabajos de niquelado, en diversas aleaciones para monedas, electrotipos, baterías eléctrica, magnetos, lámparas, electrodos, bujías, partes de maquinaria, etc. Como catalizador en la producción de aceites y otras sustancias orgánicas. En su mayoría se usa para la producción de acero inoxidable.

El níquel se cree que no es peligroso en aguas o alimentos, de echo, se considera como un elemento traza o esencial. Sin embargo si se esta expuesto a grandes cantidades causa vomito, diarrea, dermatitis, y en algunos casos causa cáncer.

PLOMO

El plomo es uno de los elementos más viejos conocidos por el hombre; ya es mencionado en el antiguo testamento. Fue usado en el antiguo Egipto para vidriar alfarería (7000-5000 A. C.). En los jardines colgantes de Babilonia fue colocado en láminas para detener la humedad. Los romanos utilizaron extensivamente para sus cisternas y tuberías.

Su número atómico es 82, peso atómico 207.2, densidad 11.34, punto de fusión y ebullición de 327.4 y 1740 C respectivamente. El plomo esta lejos de ser un metal abundante en la corteza terrestre su abundancia esta relacionada con sus 4 isótopos naturales (204, 206, 207, y 208). El mineral más común es la galena PbS , aunque existe también la anglesita (PbSO_4) , cerusita (PbCO_3) , piromorfita $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2\text{Cl}$ y mimetesita $(\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl})$.

Aunque el plomo ya no es usado en las aleaciones, aún es muy usado en pilas alcalinas, en pigmentos, praimer, pinturas para el acero y el fierro, en galvanizados en plásticos, etc.

El plomo es ahora reconocido como un metal venenoso y actúa por complejos con grupos oxo de enzimas y afecta virtualmente en todos los pasos del proceso de hematosíntesis y metabolismo porfirino, también inhibe la acetilcolinesterasa, fosfatasa ácida, ATPasa, anhidrasa carbónica e inhibe la síntesis de proteínas probablemente por la modificaciones que provoca en el RNAt. La conjunción con el O₂ el Pb también inhibe las SH enzimas (aunque su reacción es menor que el Cd y el Hg) especialmente por los residuos de la cisteína en las proteínas.

Los síntomas típicos de envenenamiento por el plomo son cólicos, anorexia, dolor de cabeza, convulsiones, daños en el riñon, cerebro y desordenes en el sistema nervioso central.

ZINC

Aparentemente fue usado por primera vez en la India en el siglo XIII. En china fue usado para hacer monedas de la dinastía Ming (1368-1644).

El zinc no fue utilizado intensivamente en la Europa medieval, las pequeñas cantidades eran obtenidas por una condensación accidental en la producción de plomo y plata. Este metal era importado de China en 1605. El zinc fue aislado por A Von Suab en 1742. Su número atómico es 30, peso atómico 63.58, densidad 7.14, punto de fusión y ebullición de 419.5 y 908 °C respectivamente. Su abundancia en la corteza terrestre es de 0.02 %. El mayor mineral de zinc es la blenda (ZnS) y la calamina o smithsonita (ZnCO₃). Minerales menos importantes son hemimorfita Zn₄Si₂O₇(OH)₂H₂O y franklinita (Zn, Fe)O Fe₂O₃.

El zinc es usado en diversas aleaciones como bronce, aluminio, plata alemana y en moldes y troqueles. Como cubierta anticorrosiva. En aparatos eléctricos, baterías, utensilios caseros, materiales de la construcción y equipo automotriz, como agente reductor en química orgánica, en la purificación de grasas y jabones.

En realidad el zinc es de gran importancia en los organismos ya que forman parte de la carboxipeptidasa y la carbonianhidrasa (A, B, C). Sin embargo la inhalación de sus vapores produce resequedad en garganta, sensación de sabor dulce, expectoración, debilidad, cuerpo cortado, fiebre, nauseas y vómito.