



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

**“ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES
PESADOS EN HUEVOS DE TORTUGA BLANCA (*Chelonia mydas*)
Y TORTUGA CAGUAMA (*Caretta caretta*) DE ZONAS DE
ANIDACIÓN AL SUR DEL ESTADO DE QUINTANA ROO,
MÉXICO”.**

TESIS

Para obtener el grado de

**Licenciatura en Manejo de Recursos
Naturales**

PRESENTA

Marilyn de los Angeles Contreras Carmona

DIRECTOR DE TESIS

Dr. María del Pilar Blanco Parra

ASESORES

Dr. Carlos Alberto Niño Torres

Dr. Alberto Pereira Corona

M.C. Benito Prezas Hernández

Ing. Roberto Herrera Pavón



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO
ÁREA DE TITULACIÓN

Chetumal Quintana Roo, México, noviembre del 2022





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Tesis del programa de licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

LICENCIATURA EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

Dr. María del Pilar Blanco Parra

ASESOR:

Dr. Carlos Alberto Niño Torres

ASESOR:

Dr. Alberto Pereira Corona

ASESOR:

M.C. Benito Prezas Hernández

ASESOR:

Ing. Roberto Herrera Pavón



Tabla de contenido

RESUMEN	5
1.- INTRODUCCIÓN	6
3.- JUSTIFICACIÓN	20
4.- HIPÓTESIS	23
5.- OBJETIVOS	24
6.- ÁREA DE ESTUDIO	25
7.- MATERIALES Y MÉTODOS	28
Protocolo de campo	28
Procesamiento de muestras en laboratorio	29
Análisis de datos	30
8.- RESULTADOS	32
9- DISCUSIÓN	44
10.- CONCLUSIONES	54
11. RECOMENDACIONES	55
11.- REFERENCIAS	56
12.- APENDICE 1	67
12.- APENDICE 2	75
12.- APENDICE 3	80

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las personas que han contribuido para lograr este paso en mi formación académica.

A mi comité tutorial: la Dra. María del Pilar Blanco Parra y a mis asesores Dr. Carlos Alberto Niño Torres, Dr. Alberto Pereira Corona, al M.C. Benito Prezas Hernández y al Ing. Roberto Herrera Pavón, gracias por su apoyo, paciencia y enseñanza para que pudiera realizar este proyecto.

A mi abuelita por interesarse en todo lo relacionado a mis estudios, por apoyarme, por apretarme las orejas cuando me enfocaba en otras cosas, por ser mi amiga en todo momento. Un abrazo y beso hasta el cielo mamita hermosa. Esto va por ti... te amo.

A mi mamá que siempre estuvo motivándome para terminarla, gracias a tus palabras pude confiar en mis aptitudes, te amo demasiado.

A mi papá que sé que te esfuerzas cada día para sacarnos adelante, gracias por todo lo que haces por mí, te amo y agradezco siempre.

A mis amigos Jhonatan y Dafne, quienes siempre están, gracias por su amor y cariño, los amo.

A mi pareja German, gracias por siempre motivarme y estar presente en este camino, te amo.

RESUMEN

La contaminación de los ambientes oceánicos causada por el hombre somete a la tortuga marina y otras especies a diversos problemas. El objetivo de este trabajo fue evaluar las concentraciones de metales pesados (Zn, Cd, Pb, Cu, Mn, Ni, Cr y As) en tejidos de ejemplares nonatos, crías muertas (músculo, hígado y carapacho) y fracciones de huevo (yema, albúmina, yema-albúmina y cascarón) en dos especies de tortugas marinas *Chelonia mydas* y *Caretta caretta* colectados en una playa de anidación "Punta Herradura" de la localidad de Mahahual, en el Sur del Estado de Quintana Roo. Para la determinación de los metales pesados se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica usando una técnica de flama. Se encontraron concentraciones detectables de la mayoría de los metales (excepto de Pb) en todas las fracciones analizadas. Concentraciones muy altas de Arsénico se encontraron en todos los tejidos y fracciones de huevo, principalmente en albúmina y músculo de nonatos. *Caretta Caretta* tuvo las concentraciones más altas comparada con *Chelonia mydas*. En general las concentraciones promedio de metales pesados en fracciones de huevo y tejidos de nonatos y crías muertas presentaron el siguiente patrón en las dos especies: As > Zn > Ni > Cr > Cu > Mn > Cd.

1.- INTRODUCCIÓN

De las siete especies de tortugas marinas que existen en el mundo, seis se encuentran en México; la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*), tortuga verde o blanca (*Chelonia mydas*), tortuga caguama (*Caretta caretta*), tortuga lora (*Lepidochelys kempii*), tortuga golfina (*Lepidochelys olivácea*) y tortuga de carey (*Eretmochelys imbricata*) (CONAGUA, 2017). Desde hace mucho tiempo los habitantes de las regiones costeras han incorporado a las tortugas marinas como parte de su vida; alimento, cultura y tradición (CONANP, 2013), por ejemplo, en México durante los años sesenta la captura de tortugas marinas para autoconsumo fue parte de un sector económico importante, llegando a convertirse en una pesquería comercial de gran magnitud tanto fuera como dentro del país (Marquez & Garduño, 2014), lo que llevó a que las poblaciones disminuyeran (SEMARNAT, 2018b).

Desde principios de los años ochenta se implementaron los centros de protección y conservación de tortugas marinas, con el objetivo de proteger de la explotación a las hembras reproductoras y de esta manera asegurar las nidadas. Actualmente, todas las especies de tortugas marinas se encuentran listadas en la categoría de peligro de extinción en la NOM-059-SEMARNAT-2010, en particular, la tortuga verde se encuentra clasificada en la lista roja de especies amenazadas de la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) bajo la categoría de “peligro” (Seminoff, 2004) y la tortuga caguama en la categoría “vulnerable” (Casale & Tucker, 2017), así mismo, se enlistan en los Apéndices I y II de la Convención Sobre la Conservación de las Especies Migratorias de Animales Silvestres (CMS) y

en el apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES).

La disminución de las poblaciones de tortugas marinas se ha dado tanto por factores biológicos (mortalidad natural) como antropogénicos (Contreras, 2008). El uso de las zonas costeras por el hombre ejerce presión sobre todos estos ecosistemas costeros, tanto marinos como terrestres, generando alteraciones de diversos grados de magnitud y en ocasiones irreversibles sobre el medio natural (Dueñas & Abreu, 1994). A pesar de que se haya avanzado en la conservación de las tortugas marinas, siguen estando en peligro debido a la captura incidental, la extracción de huevos, la destrucción, la contaminación y degradación en sitios de alimentación y anidación (PROFEPA, 2019).

Unos de los principales problemas que comprometen la salud, el ambiente y la seguridad alimentaria es la contaminación por metales pesados y metaloides en recursos hídricos y terrestres (Reyes et al., 2016). Actividades como la fundición de metales, la refinación del petróleo, los efluentes industriales, la explotación agrícola y los residuos urbanos, han ocasionado que los niveles de estos elementos aumenten en el medio marino (Aureoles, 2007).

Debido al potencial que tienen los metales pesados de bioacumularse y biomagnificarse por la red trófica, organismos como las tortugas marinas pueden acumular concentraciones altas de estos metales y presentar problemas de salud, puesto que estos contaminantes están asociados a un gran número de patologías (Aguirre et al., 2006; Ley-Quíñonez, 2013).

2.- ANTECEDENTES

Características generales de tortugas marinas

Las tortugas marinas se consideran cosmopolitas debido a que habitan en todas las cuencas oceánicas, algunas especies tienen un comportamiento más apegado a zonas tropicales y otras hacia aguas más frías como la laúd (Pritchard, 1971). Las tortugas marinas adultas pasan gran parte de su vida en sitios de alimentación, algunos de estos sitios son; mantos de algas marinas, zonas de surgencias o donde ocurren afloramientos estacionales de medusas o invertebrados bénticos (Obeso, 2013).

Carr et al. (1978) crearon un modelo de la historia de vida de la tortuga verde (*Chelonia mydas*) el cual explica los cambios tanto estacionales como ontogénicos de esta especie (Fig. 2), la primera fase es “el año perdido”, este periodo ocurre en un hábitat pelágico y comprende un tiempo de aproximadamente 7 a 14 meses, la segunda fase “hábitats de desarrollo” se encuentran normalmente tortugas inmaduras y se localizan en hábitats costeros, la fase “hábitats de adultos”, en este periodo es donde pasan la mayor parte de su vida y normalmente son sitios de alimentación o también conocidos como zonas de forrajeo, la otra fase es la “inter-anidatorios” en esta como bien lo dice el nombre, se refiere al lapso durante la temporada de reproducción, las tortugas adultas se trasladan cerca de las playas de anidación, donde pueden permanecer varios meses. Con este modelo también podemos comprender la historia de vida del resto de las especies de tortugas marinas, ya que manifiestan varios rasgos en común en su comportamiento, sobre todo en la reproducción.

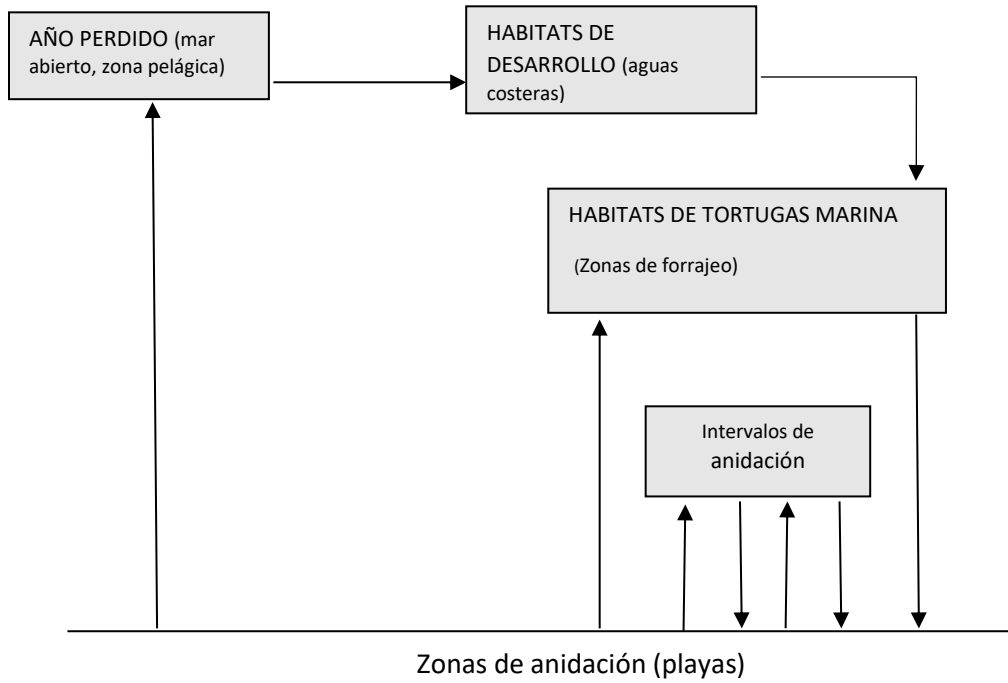


Fig. 2. Diagrama sobre los cambios estacionales y ontogenéticos en la ecología geográfica y hábitat de la *Chelonia mydas*. Basado de Carr et al., (1978)

- Tortuga blanca, *Chelonia mydas*. (Linnaeus, 1758)

Distribución. Esta especie se encuentra en todos los mares tropicales del mundo (Buitrago et al. 2015), habita en aguas por encima de los 20°C durante todo el año. En el Golfo y Caribe Mexicano se distribuyen desde Tamaulipas hasta Quintana Roo (Fig. 4) (SEMARNAT, 2018b).

Hábitat. Oceánico y costero durante el periodo reproductivo.



Fig. 4. Distribución de las zonas de anidación de la tortuga blanca (*Chelonia mydas*) en el Golfo y Mar Caribe de México. Basado de (SEMARNAT 2018b)

Alimentación: En etapa como crías y juveniles son omnívoras (moluscos, crustáceos, briozoarios, esponjas, medusas y equinodermos), los adultos son estrictamente herbívoros (*Thalassia testidium*, *Gracillaria*, *Rhodimonia*, *Gelidium*, *Grateloupia*, *Gigartina*, *Griffitsia*, *Sargassum*, *Padina*, *Ulva* y *Cladophora*) (Fitzgerald, 2004).

Temporada de anidación: En el Caribe es de mayo a septiembre (Huerta et al., 2006).

- **Tortuga caguama. *Caretta caretta* (Linnaeus, 1758).**

Distribución. Habita en todos los océanos (CIT, 2005). En el Golfo de México y Caribe Mexicano se distribuyen en Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Veracruz y Tamaulipas (Fig. 9) (Lara & Rodriguez, 2014).

Hábitat. Oceánico y costero, principalmente zonas tropicales y subtropicales (Lara & Rodriguez, 2014).



Fig. 9. Distribución de las zonas de anidación de la tortuga caguama (*Caretta caretta*) en el Golfo y Mar Caribe de México. Basado de (SEMARNAT, 2018a)

Alimentación. Carnívora durante todo su ciclo de vida, se alimenta principalmente de animales pelágicos cuando son juveniles y bentónicos cuando son adultos (UICN, 2010).

Temporada de anidación. En el Caribe es de mayo a septiembre (Huerta et al., 2006).

Información más detallada sobre las especies en el apéndice 1.

Metales pesados

Los metales pesados son aquellos elementos con un peso atómico entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg) y con densidad superior a $4,5 \text{ g cm}^{-3}$ (Gadd & Griffiths, 1977). Sin embargo, ahora también se consideran metales pesados a algunos elementos con densidad menor a $4,5 \text{ g cm}^{-3}$ (Wayland, 2000).

Los metales pesados se clasifican en dos grupos de acuerdo con su interrelación con los seres vivos:

Los oligoelementos, esenciales o micronutrientes: estos se requieren para el funcionamiento de sistemas enzimáticos y son necesarios para que los organismos vivos completen su ciclo vital, sin embargo, llegan a ser tóxicos pasando cierto umbral (Martorell, 2010).

Metales pesados sin función biológica: no tienen una función biológica conocida y pasando cierto umbral llegan a ser tóxicos (Martorell, 2010).

Una de las características principales de los metales pesados es que son persistentes, esto quiere decir que no pueden ser creados o degradados, ni por procesos biológicos, ni por el hombre (Martorell, 2010). Se sabe que en ciertas concentraciones la presencia de metales juegan un papel esencial en el metabolismo y crecimiento de los animales como el Cu, Fe, Cr, y Ni, en especial los dos primeros, ya que sirven como transportadores de oxígeno, producción de energía y actividad enzimática (CGACC, n.d.), sin embargo pueden ser tóxicos por encima de cierto umbral (Jacobson et al., 1994).

La absorción de los metales y los daños que ocasiona al organismo está determinada por muchos factores, como la cantidad, la forma química, duración y el medio en el que entro el contaminante, así como también, por las características propias del ejemplar como son la edad, talla, sexo, peso, dieta, estadio, capacidad de adaptación, entre otros (Ramírez & Azcona, 2017).

Los elementos químicos tienden a precipitarse y acumularse en los sedimentos, sin embargo pequeñas partículas se adhieren a otras suspendidas en el agua, pudiendo ser ingeridas por organismos y de esta manera ocasionar una bioacumulación en ellos (Bruland., 1983).

Las tortugas marinas tienen acceso a los metales pesados a través del alimento y del agua, mientras que las crías obtienen concentraciones de estos elementos por medio de la madre, dado que los reptiles y aves excretan metales pesados del organismo a través de los huevos (Burger, 1994). Las tortugas marinas durante la época de anidación y la producción de huevos beben considerables cantidades de agua para reducir su temperatura corporal, lo que las hace más susceptibles a la exposición a contaminantes (Kenyon et al., 2001). Además, se ha evidenciado que durante el periodo de incubación los nidos pueden absorber contaminantes del medio donde fueron depositados (Contreras, 2016).

Se sabe que algunos elementos son altamente carcinogénicos, teratogénicos y embriotóxicos en tortugas marinas (Hoffman, 1979; Storelli & Marcotrigiano, 2003). Metales como el Cadmio tienen la capacidad de acumularse y permanecer por al menos 30 años en hígado y riñón, ocasionando daños irreversibles aun cuando la ingesta haya sido poca (Reyes et al., 2016). Por otra parte, se ha demostrado que

altas concentraciones de Cromo provocan huevos infértiles, además de ser altamente corrosivo en tejidos de tortugas marinas (Villanueva & Botello 1992; Ozdilek et al. 2007). El Arsénico es uno de los más tóxicos y puede ser almacenado por el hígado, riñón, corazón y pulmón, en bajas cantidades es encontrado en músculo y tejido nervioso, este metal es un carcinógeno que afecta principalmente al pulmón, riñón, vesícula y piel (Reyes et al., 2016). El Plomo es uno de los elementos más utilizado por las actividades humanas, tiende a acumularse y almacenarse en diferentes zonas del cerebro (como en la corteza parietal, hipocampo y cerebelo) (Reyes et al., 2016). El Cobre y el Zinc son elementos esenciales para todos los organismos, sin embargo, a niveles altos pueden ocasionar intoxicaciones, se ha demostrado que la ingestión puede producir daños en el hígado y riñones, así como también en el desarrollo embrionario (ATSDR, 2004). El Manganeseo en altas concentraciones puede ser un potente neurotóxico que tiende a acumularse en huesos, hígado, cerebro y sangre (Ramírez & Azcona, 2017). Por último, la intoxicación por Níquel puede causar dermatitis, bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y cáncer en los pulmones, en animales se ha observado inflamación en pulmón, daño en los senos nasales y problemas en la función pulmonar (ATSDR, 2005). En la tabla 1 se presenta de manera general las múltiples actividades antropogénicas que para su desarrollo usan y/o producen metales pesados.

Tabla 1. Usos y fuentes antropogénicas de metales pesados a través de los cuales pueden ser introducidos al medioambiente. Basado de (Bradl, 2005; Avila & Vizcarra, 2018)

Metal	Actividad
Cu	Industria de galvanoplastia, fundición y refinación, minería y biosólidos.
Cr	Industria galvanoplástica, lodos de aguas residuales y desechos de tenerías, fabricación de aleaciones de hierro (aceros especiales).
Cd	Baterías Ni/Cd, pigmentos, revestimientos anticorrosivos de metal, aleaciones, combustión de combustible fósil, fertilizantes de fosfato, lodos de aguas residuales
Pb	Minería y fundición de minerales, combustión de gasolina con plomo. pigmentos, vidrios, cerámica, plásticos, aleaciones, láminas, cables, soldadura, tuberías
As	Aditivos en la alimentación animal, preservantes de madera, vidrios especiales, cerámicas, plaguicidas, herbicidas, textil y curtido, pigmentos y pinturas antiincrustante, medicina veterinaria.
Mn	Producción de aceros de ferromanganeso, dióxido de manganeso electrolítico para su uso en baterías, aleaciones, catalizadores, fungicidas, agentes antidetonantes, pigmentos, secadores, protectores de la madera, revestimiento de varillas de soldadura.
Ni	Aleación en la industria del acero, galvanoplastia, baterías de Ni/Cd, pigmentos para pinturas y cerámica, prótesis dentales y quirúrgicas, moldes para cerámicas y vidrio, componentes informáticos, catalizadores.
Zn	Aleaciones de Zn (bronce, latón), revestimiento contra la corrosión, pilas, latas, PVC, estabilizantes, en medicamentos y productos químicos, industria del caucho, pinturas, soldadura.

Los estudios de metales pesados se hacen mayormente en hígado, riñón, masa encefálica y hueso (Ley-Quiñonez, 2013). En México se han realizado estudios en tortugas marinas con el fin de determinar las concentraciones de metales pesados, sin embargo, siguen siendo pocos los trabajos realizados (Ley-Quiñonez, 2013).

Estudios en México sobre concentraciones de metales en tortugas marinas.

Gardner et al. (2006) realizaron un estudio sobre la acumulación de metales pesados en 4 especies de tortugas marinas en Baja California Península: *C mydas*, *C. caretta*, *L. olivácea* y *E. imbricata*. Las concentraciones de cadmio medido en riñón de la tortuga verde fueron las más altas jamás antes reportadas hasta esa fecha para esta especie, con un valor de 653 mg kg⁻¹ dw (peso seco). Las concentraciones de metales entre las especies no vario mucho, sin embargo, en el riñón y tejido adiposo de *C. mydas* se encontraron las concentraciones más altas de Zn.

Ley-Quiñónez (2009) Analizó la acumulación de metales pesados (Zn, Ni, Mn, Cu, Se, As, Pb, Cd y Hg) en sangre de; *C mydas agassizii*, *C. caretta*, *L. olivácea* y *E. imbricata*, las concentraciones promedio de los metales fueron Zn>Se>Ni>As>Cu>Mn>Cd. La mayor concentración promedio de los metales tóxicos no esenciales fueron de arsénico (6.121 mg kg⁻¹) y cadmio (1.014 mg kg⁻¹) en *C. caretta*.

Talavera et al. (2007) Hizo un estudio sobre el contenido de metales pesados en tejidos y especies de plantas que se encontraban en el estómago de *Chelonia mydas*, también se analizaron las mismas especies de plantas en un área de refugio

de tortugas marinas “Estero Banderitas”. Encontraron que no había diferencia en el contenido de metales en tejidos con las muestras de plantas encontradas en el estómago, por lo que concluyeron que las tortugas muestreadas de la Bahía Magdalena se alimentan fuera de esta área, ya que las concentraciones encontradas en los tejidos de las tortugas no eran similares a las encontradas en las plantas.

Quintana Roo

Talavera (2010) determinó las concentraciones de metales pesados en hembras anidadoras y crías de tortuga blanca *Chelonia mydas*, en las playas Xel Ha, X'cacel, Chemuyil y Aventuras DIF en Quintana Roo. Más del 50% de las muestras fueron no detectadas, en general los niveles de metales pesados encontrados en este estudio fueron muy bajos.

Estudios en huevos y crías de Tortugas Marinas

CGACC (n.d.) determinaron la presencia de metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos en huevos y embriones de tortugas que desovan en las Playas del Golfo de México, las concentraciones de metal siguieron la secuencia $Al > Ba > Cu > Cr$. En huevos el hierro y aluminio fueron encontrados en mayores concentraciones y en menores concentraciones el arsénico, cobre, níquel y vanadio.

Páez-Osuna et al. (2010) analizar Cd, Cu, Ni y Zn en *L. olivácea* en Oaxaca, los estudios se hicieron en sangre y huevos, los niveles de Zn fueron más altas en la yema ($72,3 \pm 10,9 \text{ mg kg}^{-1}$ de peso seco) y sangre ($58,4 \pm 4,7 \text{ mg kg}^{-1}$) y las de Ni fueron más altas en la cáscara ($48.5 \pm 12.9 \text{ mg kg}^{-1}$).

Contreras (2016) determinó los niveles de 14 metales pesados en huevos de *L. kempii* y *C. mydas* en la playa Villamar, del estado de Veracruz, México. El metal con el valor más alto fue Zn (5.213 mg kg^{-1}) mientras que Cr ($0.0082 \text{ mg kg}^{-1}$) y Cd ($0.0047 \text{ mg kg}^{-1}$) alcanzaron las concentraciones más bajas. Las concentraciones que obtuvieron fueron por debajo de los límites máximos permisibles, por lo que concluye que tanto las hembras anidadoras como sus nidadas están libres de contaminantes por metales pesados en la parte norte de Veracruz.

Guzmán et al. (2020) analizaron metales pesados en huevos de la tortuga Laúd en zonas de anidación de la provincia de Bocas del Toro, Panamá. Encontraron que las concentraciones de Fe, Zn, As, Se y Sr fueron las más altas jamás antes registradas para esta especie.

3.- JUSTIFICACIÓN

La inadecuada planeación de desarrollo y el mal manejo del hombre sobre los recursos naturales en las zonas costeras han sido los factores principales del aumento de los niveles de la concentración de metales pesados (Villanueva & Botello, 1998).

Los metales pesados los podemos encontrar en el ambiente de manera natural, sin embargo, el hombre ha ocasionado que estos niveles aumenten. Los factores de riesgo de estos elementos son importantes ya que aun en concentraciones muy bajas pueden generar desequilibrios metabólicos, intoxicaciones, enfermedades y con frecuencia llegan a ser letales para los animales marinos y por ende para el hombre (Madariaga, 2010). Al no poder ser degradados, tienen la capacidad de permanecer en el ambiente por muchos años, asimismo, estos elementos pueden ser transformados por procesos biogeoquímicos (Ley-Quiñónez, 2009), ocasionando que queden químicamente disponibles y puedan ser bioacumulados en los tejidos corporales de los organismos y por ende provocar una biomagnificación por la red trófica, por lo que depredadores superiores puedan alcanzar niveles mayores de contaminantes.

Las tortugas marinas son organismos que se desplazan por casi todas las cuencas oceánicas, dado a estas rutas migratorias y al uso de diferentes hábitats marinos como playas, arrecifes de coral, aguas costeras y oceánicas en sus diferentes ciclos de vida, están expuestas a los diferentes contaminantes que se encuentran en esas áreas.

Para conocer que tan afectada está una zona con estos contaminantes, se realizan estudios sobre la estimación de las concentraciones de metales pesados, por lo que es importante analizar cuáles son los niveles de estos elementos en organismos (Villanueva & Botello, 1992)

De las siete especies de tortugas marinas que existen en el mundo, cuatro llegan a las costas de Quintana Roo cada año; la tortuga verde (*Chelonia mydas*), caguama (*Caretta caretta*), carey (*Eretmochelys imbricata*) y laúd (*Dermochelys coriacea*) (Alba, 2018) en Isla Mujeres, Isla de Cozumel, Cancún, Mahahual, Tulum y Chetumal (Briseño & Abreu, 1998). La población de tortuga verde y tortuga caguama en este estado son de suma importancia para los ecosistemas marinos de todo el Atlántico Norte, Caribe, Centroamérica y México (SEMARNAT, 2018b).

Se ha demostrado que algunas de las áreas donde se alimentan estas dos poblaciones de tortugas marinas (Golfo de México y Caribe) tienen altas concentraciones de metales pesados tanto en la columna de agua como en sedimentos y organismos marinos (Villanueva & Botello, 1992; Guzmán et al., 2020), a causa de las actividades industriales aledañas a estas costas como las del refinado del petróleo, la producción de fertilizantes y actividades mineras (Páez-Osuna, 2005).

Las actividades de la Zona Sur de Quintana Roo que pudieran exponer a las tortugas marinas a riesgos de contaminación por metales son la pesca, el turismo de cruceros y los residuos municipales (Beltrán et al., 2005; Contreras, 2016), debido a que actividades como las de construcción, conservación y reparación de embarcaciones emiten importantes cantidades de metales pesados al medio marino

(Madariaga, 2010). Además, estas costas al recibir grandes masas de sargazo podrían estar expuestas a los contaminante que traen estas algas, ya que se ha comprobado que el sargazo aumenta los niveles de contaminantes del sustrato donde llega a descomponerse.

El conocer el grado de contaminación que puedan tener estos individuos así como la posible transferencia hacia las nuevas generaciones, nos ayudara a conocer cuáles son los impactos que generan las actividades antropogénicas y los efectos producidos en los organismos de las dos especies de tortugas marinas que llegan a anidar en estas costas, además, es escasa la información sobre la acumulación de metales pesados en tortugas marinas en el Sur de Quintana Roo, por lo que, este estudio aportara a la investigación y conocimiento de estas especies así como también a las futuras evaluaciones de concentraciones de metales pesados en esta zona. De modo que, en este trabajo se analizaran las concentraciones de metales pesados en crías muertas y huevos no eclosionados de las tortugas marinas que llegan anidar a esta zona; tortuga blanca (*Chelonia mydas*) y caguama (*Caretta caretta*).

4.- HIPÓTESIS

Debido a que en la región se han encontrado concentraciones altas de elementos como arsénico, manganeso, níquel y zinc; en este trabajo se espera encontrar tanto en las crías muertas como en los huevos no eclosionados de *Chelonia mydas* y *Caretta caretta* concentraciones similares a las reportadas en la región.

5.- OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la concentración de metales pesados en huevos no eclosionados de *Chelonia mydas* y *Caretta caretta*, en el Sur del Estado de Quintana Roo.

Objetivos específicos

Determinar la concentración de los metales: Zn, Cd, Pb, Cu, Mn, Ni, Cr y As, en hígado, músculo y caparazón de crías muertas y ejemplares nonatos de *Chelonia mydas* y *Caretta caretta*.

Determinar la concentración de los metales: Zn, Cd, Pb, Cu, Mn, Ni, Cr y As, en yema, albúmina, yema- albúmina y cascarón de *Chelonia mydas* y *Caretta caretta*

6.- ÁREA DE ESTUDIO

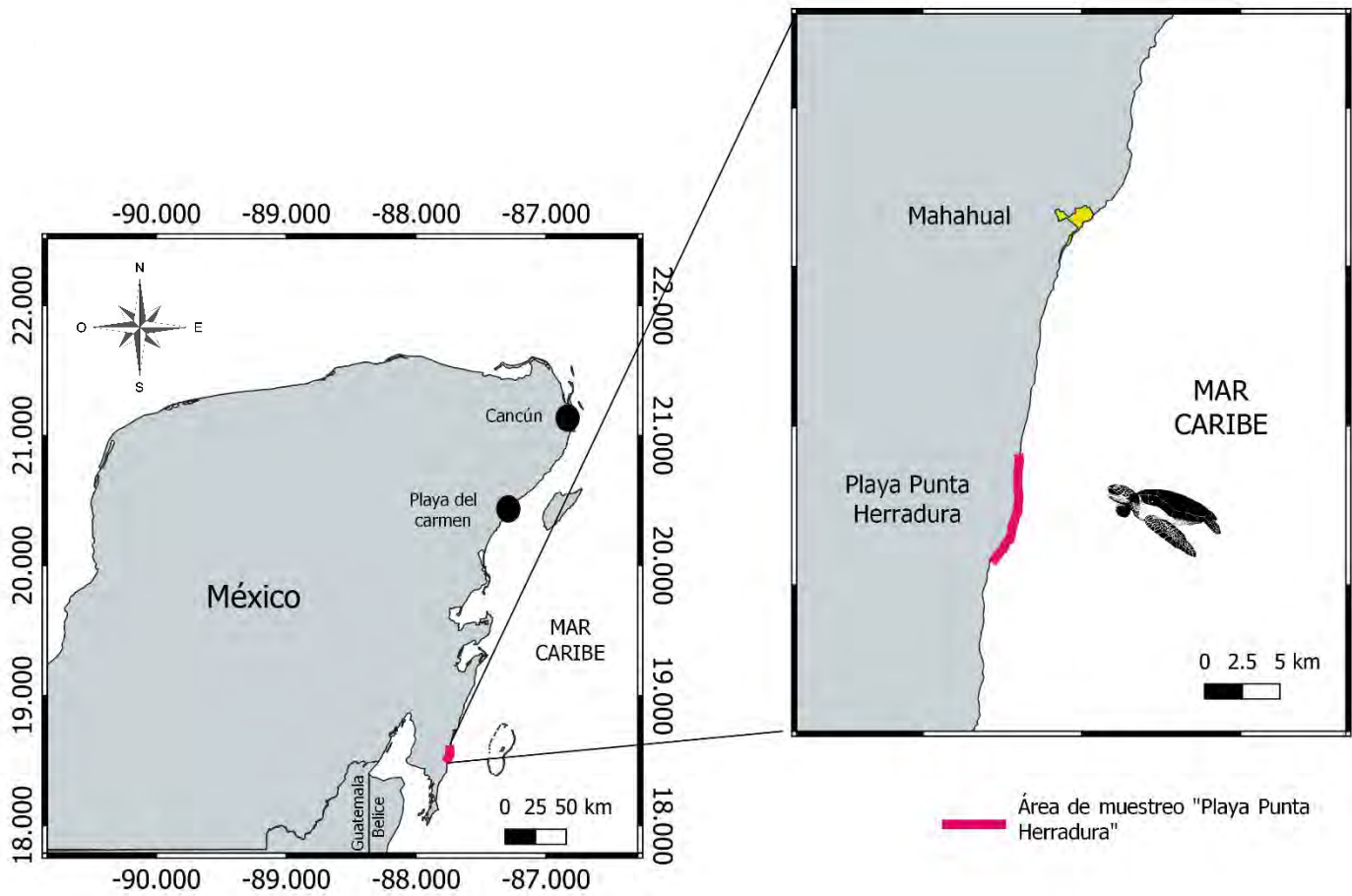


Fig. 11.- Mapa de la Península de Yucatán donde se localiza el Estado de Quintana Roo y la playa de anidación "Punta Herradura" de tortuga blanca *Chelonia mydas* y caguama *Caretta caretta* al Sur del Estado.

Mahahual se encuentra en la zona sur del Caribe Mexicano, en el litoral del Estado de Quintana Roo, dentro de la región denominada "Costa Maya", un destino turístico emergente en el mar Caribe que incluye el corredor Xcalak - Punta Herrero (SEDETUS, 2021), con un total de 130 km de costa, este puerto es importante por ser un centro turístico en desarrollo. Esta localidad está integrada al municipio de Othón P. Blanco (SEMAR, n.d.).

La playa donde se recolectaron las muestras está delimitada al sur por el poblado de Xcalak y al norte por el poblado de Mahahual, en las coordenadas 18°32'14"N 87°44'36"W, aproximadamente a 15 km del poblado de Mahahual. La playa se distingue por ser de tipo rocoso en la parte que va desde Punta Herrero hasta Punta Herradura. Hacia el sur la playa es de tipo arenoso, plana y con áreas de piedras (SEMAR, n.d.). El clima es cálido subhúmedo, con lluvias en verano e invierno (Aw1) y una temperatura promedio anual de 28.5°C (SEDETUS, 2021).

Mahahual cuenta con diversas especies de flora y fauna con relevancia biológica, en el podemos encontrar zonas de manglar, dunas costeras, sabanas y una riqueza de especies de fauna protegidas como el venado de cola blanca, mapaches, pecaríes, zorra gris, tortugas marinas, pumas, entre otros (SEDETUS, 2021).

El Rio Huach desemboca en el mar Caribe, con una longitud de 1.5 km y una anchura de 6 m, ubicado en 18°25'29"N y longitud 87 45'54"O (SEMAR, n.d.).

El Sistema arrecifal mesoamericano se extiende desde la parte nororiental de la península de Yucatán hasta las costas de Honduras, la laguna arrecifal es protegida por el arrecife coralino, y tiene una profundidad que no excede a los 4 m, pasando

la barrera, hay una profundidad de 15 a 30 m y después en la zona del canal de Cozumel llega a una profundidad de hasta 800 metros (Castellanos & Suarez, 1997), el sustrato de la laguna arrecifal es arenoso y está cubierto de praderas de pastos marinos, principalmente de *Thalassia testudinum* o también conocida como hierba de tortuga ya que es parte de la dieta de *Chelonia mydas* (Talavera, 2016). La laguna arrecifal constituye un hábitat para muchas especies amenazadas, brindando zonas de desove, anidamiento, reproductivas y de forrajeo.

7.- MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras se obtuvieron en playas de Mahahual cuya zona se distingue por ser sitio de anidación de dos especies de tortugas marinas; *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*, bajo el permiso de colecta científica N° SGPA/DGVS/006294/18 de la DGVS.

Protocolo de campo

Colecta de muestras y preparación en campo

Las muestras de huevos y crías de *Caretta caretta* y *Chelonia mydas* se obtuvieron en el año 2018 - 2019 a final de la temporada de anidación (septiembre). Para la búsqueda de nidos se realizaron monitoreos durante el día. Cada nido se identificó por su morfología para así identificar la especie que construyó cada uno de ellos y posteriormente se procedió a excavar para sacar los huevos no eclosionados. De cada nido se colectaron de 3 a 4 huevos, se guardaron en bolsas plásticas herméticas y se etiquetó con el nombre de la especie y fecha. Cada bolsa fue congelada hasta su análisis. En total se recogieron 41 huevos y 4 crías muertas de 13 nidos diferentes de *Chelonia mydas* y *Caretta caretta*.

Limpieza de material:

Toda la cristalería y el material plástico utilizado se lavó previamente con jabón neutro libre de fosfatos EXTRAN y fueron sumergidos en ácido nítrico al 10% por 24 h, después se enjuagaron con abundante agua desionizada.

Procesamiento de muestras en laboratorio

Los huevos y crías fueron descongelados por aproximadamente dos horas. Los huevos fueron lavados con agua desionizada, se pesaron y se midió el diámetro. Posteriormente se procedió a separar la cáscara, la yema y la albúmina con ayuda de pinzas quirúrgicas y bisturís de acero inoxidable, el material utilizado se lavó entre cada muestra. Las submuestras de yema y albúmina, se colectaron con ayuda de una jeringa que había sido previamente pesada, luego se tomó 1 ml de cada muestra, y la jeringa fue pesada nuevamente para determinar por diferencia, el peso exacto de 1ml de muestra.

Las cáscaras se secaron al aire libre y después en un horno a 70° C durante 24-48 horas para deshidratarlas y molerlas en un mortero de ágata.

Una vez descongelados, los ejemplares nonatos y crías muertas se disectaron de acuerdo con el método de (Wyneken, 2004), y se colectaron muestras de hígado, músculo y caparazón, después de haber sido pesadas, cada una de estas submuestras fueron secadas en el horno a 70 °C durante 48h, finalmente se pulverizaron en un mortero de ágata.

Digestión

Las muestras fueron digeridas con 10ml de HNO₃ al 33%. Para acelerar la digestión, se sometieron las muestras a un proceso de aceleración en condiciones alta temperatura y presión en un horno de microondas (MAE) modelo CEM MarsX.

Cuantificación

Una vez terminada la digestión, cada una de las muestras se aforaron a un volumen de 50 ml con agua desionizada en matraces aforados. Finalmente, los metales presentes en cada una de las soluciones se cuantificaron en un espectrofotómetro de absorción atómica *ThermoScientific-ICE-3500*, empleando la técnica de ionización a la llama y comparando las absorbancias contra curvas de calibración elaboradas para dicho fin, a partir de estándares ultrapuros para cada elemento.

Análisis de datos

Las concentraciones para cada uno de los elementos analizados se expresaron como la media \pm 1 desviación estándar en mg kg⁻¹ de peso seco (dw). De manera general, todos los datos fueron analizados con los programas GrandPad Prism 9 XML Project y Past 4.10. Para conocer si existen diferencias significativas en las concentraciones de metales entre los tejidos, partes de huevo y las dos especies (*Chelonia mydas* y *Caretta caretta*), se utilizó la prueba chi² (Mood median). También se utilizó la prueba de Tukey para identificar posibles diferencias significativas en la concentración de metales entre tejidos y partes de huevo de la

misma especie. En este estudio se utilizó el límite de rechazo de $p < 0.05$ para todas las comparaciones.

8.- RESULTADOS

El presente estudio analizó trece nidos de tortugas marinas *Chelonia mydas* (5 nidos; 16 huevos) y *Caretta caretta* (8 nidos; 25 huevos), agrupando un total de 45 muestras incluyendo huevos no eclosionados y neonatos muertos.

Para *C. caretta* un total de 63 submuestras fueron analizadas (25 de cascarón, 15 de yema y albúmina homogeneizadas, cuatro de yema, cuatro de albúmina y cinco ejemplares completos nonatos a los cuales se analizó por separado el hígado, músculo y caparazón.

Para *C. mydas* un total de 60 submuestras fueron analizadas (16 de cascarón, cuatro de yema y albúmina homogeneizadas, ocho de yema, ocho de albúmina, cuatro nonatos y cuatro neonatos muertos, a los cuales se analizó por separado el hígado, músculo y caparazón.

Las concentraciones promedio para los ocho metales analizados (Cd, Ni, Mn, Cu, Zn, Pb, As y Cr) en huevos, tejidos de neonatos y nonatos de tortugas marinas *C. caretta* y *C. mydas* se presentan en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Concentraciones (media \pm DE mg kg⁻¹ peso seco) de metales pesados en huevos (yema, cáscara, albúmina) y tejidos (músculo, hígado y carapacho de nonatos y neonatos muertos) de *Caretta caretta* colectadas en la playa "Punta Herradura" ubicada en la Zona Sur de Quintana Roo, México. Los valores que comparten la misma letra de la tabla 1 y 2 son significativamente diferentes ($p < 0.05$). DLD= Debajo del Límite de Detección.

	Cd	Ni	Mn	Cu	Zn	Pb	As	Cr
Yema								
(dry wt, n= 4)	0.90 \pm (0.35)	5.74 \pm (2.05)	2.33 \pm (0.84)	4.63 \pm (1.51)	44.49 \pm (28.15)	DLD	87.44 \pm (35.95)	12.03 \pm (1.82)
(wet wt)	0.362 \pm (0.142)	2.297 \pm (0.82)	0.932 \pm (0.339)	1.852 \pm (0.60)	17.799 \pm (11.262)		34.98 \pm (14.383)	4.815 \pm (0.73)
Albúmina								
(dry wt, n=4)	13.64 \pm (11.59)	53.44 \pm (19.29)	26.55 \pm (22.8) ^a	40.27 \pm (21.36)	96.67 \pm (126.90)	DLD	1161.51 \pm (242.15)	150.06 \pm (103.97)
(wet wt)	0.68 \pm (0.579)	2.67 \pm (0.965)	1.33 \pm (1.14)	2.01 \pm (1.06)	4.83 \pm (6.347)		58.07 \pm (12.107)	7.50 \pm (5.2)
Yema y albúmina								
(dry wt, n= 15)	14.66 \pm (20.9) ^b	87.87 \pm (127.81) ^b	29.42 \pm (16.14)	61.48 \pm (36.87)	555.1 \pm (267.9) ^b	DLD	1505.7 \pm (881.59) ^b	132.98 \pm (44.97) ^b
(wet wt)	0.58 \pm (0.84)	3.51 \pm (5.112)	1.17 \pm (0.646)	2.45 \pm (1.474)	22.20 \pm (10.719)		60.22 \pm (35.264)	5.31 \pm (1.8)
Cáscara								
(dry wt, n=25)	2.93 \pm (0.87)	17.32 \pm (5.18)	3.16 \pm (1.16)	10.94 \pm (3.23)	13.4 \pm (10.22)	DLD	206.10 \pm (80.17)	16.23 \pm (6.76)
Hígado								
(dry wt, n= 5)	12.08 \pm (4.20)	78.98 \pm (28.22)	7.18 \pm (4.16)	29.54 \pm (5.38)	57.7 \pm (18.03)	DLD	632.2 \pm (169.75)	43.5 \pm (20.33)
(wet wt)	4.26 \pm (1.61)	28.27 \pm (12.33)	2.68 \pm (2.11)	10.69 \pm (3.75)	20.16 \pm (6.75)		219.22 \pm (59.83)	15.19 \pm (6.28)
Músculo								
(dry wt, n=5)	43.30 \pm (14.47)	286.87 \pm (99.32)	25.09 \pm (10.56)	77.34 \pm (22.44)	124.98 \pm (36.91)	DLD	2121.08 \pm (614.44)	156.24 \pm (72.10)
(wet wt)	13.02 \pm (3.87)	85.93 \pm (25.87)	7.43 \pm (2.54)	23.31 \pm (6.5)	36.55 \pm (6.07)		641.12 \pm (197.73)	45.83 \pm (14.91)
Carapacho								
(dry wt, n=5)	33.77 \pm (5.41)	218.38 \pm (39.08)	21.76 \pm (7.17)	56.76 \pm (7.74)	114.69 \pm (49.57)	DLD	1615.65 \pm (254.23)	120.64 \pm (17.81)
(wet wt)	16.9 \pm (8.47)	109.37 \pm (56.33)	11.21 \pm (7.4)	28.59 \pm (14.78)	49.67 \pm (8.62)		796.36 \pm (344.65)	59.73 \pm (27.21)

Tabla 2. Concentraciones (media \pm DE mg kg⁻¹ peso seco) de metales pesados en huevos (yema, cáscara, albúmina) y tejidos (músculo, hígado y carapacho de nonatos y neonatos muertos) de *Chelonia mydas* colectadas en la playa “Punta Herradura” ubicada en la Zona Sur de Quintana Roo, México. Los valores que comparten la misma letra de la tabla 1 y 2 son significativamente diferentes ($p < 0.05$). DLD= Debajo del Límite de Detección.

	Cd	Ni	Mn	Cu	Zn	Pb	As	Cr
Yema								
(dry wt, n=8)	1.26 \pm (0.884)	8.67 \pm (7.36)	2.15 \pm (1.13)	4.86 \pm (2.370)	44.63 \pm (9.60)	DLD	117.52 \pm (124.3)	14.82 \pm (7.50)
(wet wt)	0.507 \pm (0.354)	3.47 \pm (2.94)	0.86 \pm (0.455)	1.944 \pm (0.948)	17.852 \pm (3.842)		47.011 \pm (49.722)	5.931 \pm (3.00)
Albúmina								
(dry wt, n=8)	9.78 \pm (6.25)	67.57 \pm (56.21)	8.87 \pm (6.10) ^a	33.86 \pm (12.23)	57.72 \pm (46.62)	DLD	1121.15 \pm (1106.7)	105.72 \pm (29.07)
(wet wt)	0.489 \pm (0.31)	3.38 \pm (2.81)	0.444 \pm (0.307)	1.695 \pm (0.611)	2.886 \pm (2.334)		56.058 \pm (55.335)	5.285 \pm (1.45)
Yema y Albúmina								
(dry wt, n=4)	16.20 \pm (1.60) ^b	107.76 \pm (22.12) ^b	22.34 \pm (4.07)	51.98 \pm (10.61)	372.41 \pm (97.37) ^b	DLD	2517.8 \pm (401.59) ^b	144.83 \pm (13.85) ^b
(wet wt)	0.648 \pm (0.064)	4.31 \pm (0.88)	0.895 \pm (0.165)	2.078 \pm (0.422)	15.015 \pm (3.89)		100.715 \pm (16.06)	5.793 \pm (0.55)
Cáscara								
(dry wt, n=16)	2.93 \pm (1.54)	17.73 \pm (9.76)	3.03 \pm (1.65)	10.72 \pm (4.32)	6.41 \pm (2.39)	DLD	170.96 \pm (78.69)	14.10 \pm (6.66)
(wet wt)								
Hígado								
(dry wt, n=8)	19.9 \pm (15.60)	102.62 \pm (47.34)	9.58 \pm (8.16)	37.56 \pm (20.09)	43.25 \pm (15.13)	DLD	776.7 \pm (485.92)	63.82 \pm (48.65)
(wet wt)	5.62 \pm (3.86)	29.41 \pm (11.94)	2.68 \pm (2.02)	10.66 \pm (4.89)	12.34 \pm (2.77)		219.22 \pm (116.29)	18.18 \pm (12.14)
Músculo								
(dry wt, n=8)	32.85 \pm (13.39)	202.84 \pm (85.8)	14.05 \pm (7.12)	56.02 \pm (25.88)	89.36 \pm (36.03)	DLD	1346.60 \pm (611.56)	105.41 \pm (40.32)
(wet wt)	5.7 \pm (2.7)	35.03 \pm (17.06)	2.42 \pm (1.36)	9.67 \pm (5.07)	15.92 \pm (7.21)		237.3 \pm (119.84)	18.05 \pm (8.01)
Carapacho								
(dry wt, n=8)	28.28 \pm (5.336)	169.97 \pm (32.57)	13.33 \pm (4.838)	46.08 \pm (10.28)	95.25 \pm (18.77)	DLD	1156.08 \pm (269.49)	95.77 \pm (23.32)
(wet wt)	14.33 \pm (15.43)	84.48 \pm (87.30)	7.54 \pm (10.05)	24.01 \pm (27.70)	46.98 \pm (47.93)		570.62 \pm (586.77)	47.74 \pm (49.65)

Al comparar las concentraciones en yema entre ambas especies analizadas, no se encontraron diferencias significativas (X^2 ; $p > 0.05$) en ningún metal. De manera general el orden de las concentraciones encontradas sigue el patrón $As > Zn > Cr > Ni > Cu > Mn > Cd$. Las concentraciones promedio más altas se encontraron en la especie *C. mydas* presentando valores de As de $117.5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$, seguido por el Zn 44.63 mg kg^{-1} y Cr 14.8 mg kg^{-1} (Fig. 12). En seis de las ocho muestras de yema de la especie *C. mydas* el arsénico fue detectado.

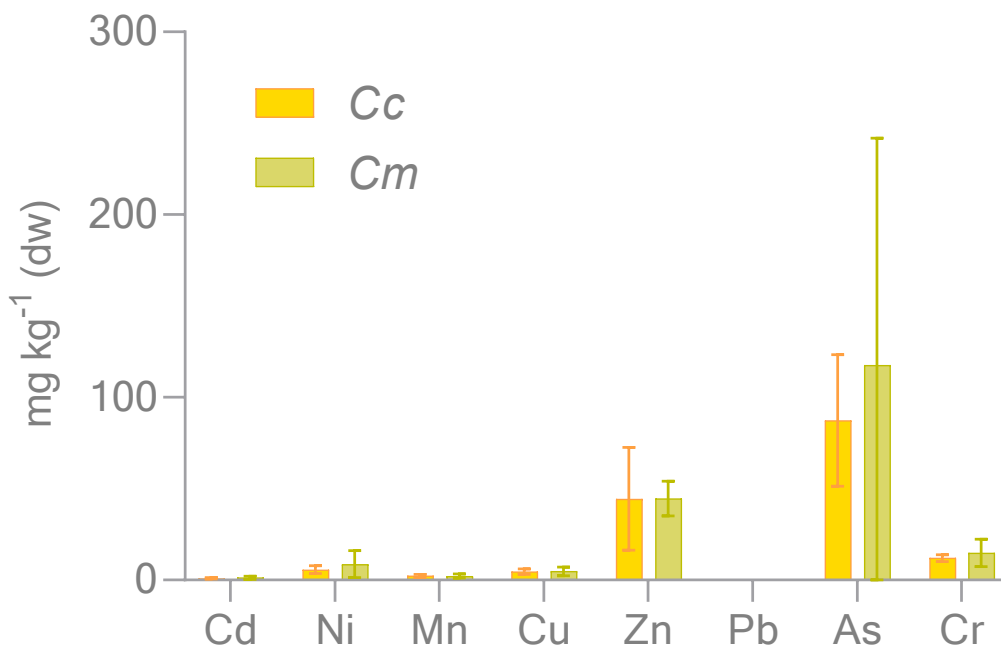


Figura 12.- Concentraciones de metales pesados (media \pm 1DE) en **yema** de huevos de tortuga *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*.

En albúmina, el elemento con las concentraciones promedio más altas fue As 1161.50 mg kg⁻¹dw para *C. caretta* y 1121.10 mg kg⁻¹dw para *C. mydas*. De todos los elementos analizados *C. caretta* fue la especie que tuvo las concentraciones promedio más altas excepto en Ni (Fig. 13). Al comparar las concentraciones de metales pesados para ambas especies no se encontraron diferencias significativas con excepción de las concentraciones de Mn (X²; p=0.01) (tabla 7).

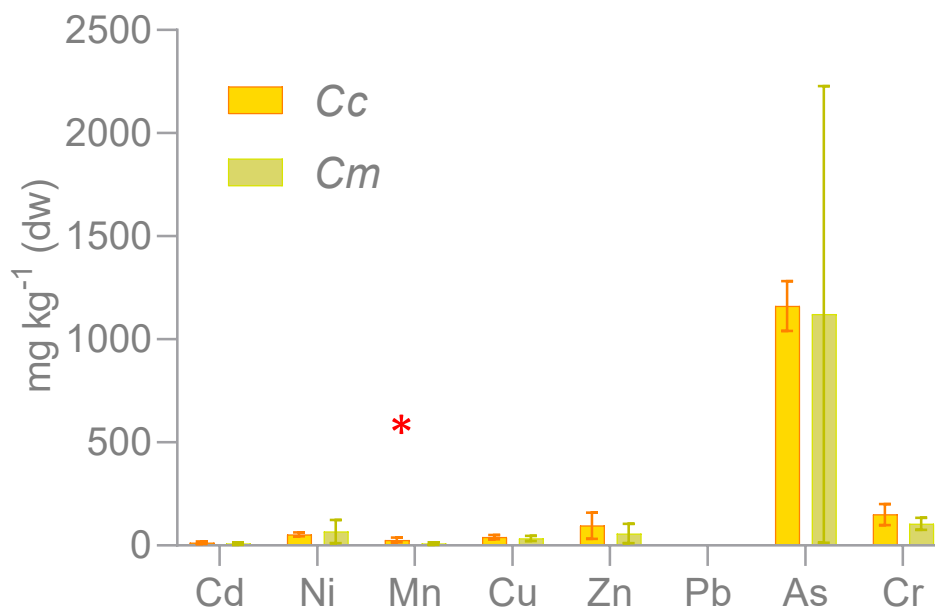


Figura 13.- Concentraciones de metales pesados (media \pm 1DE) en **albúmina** de de huevos de tortuga *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*. El * muestra donde hubo diferencias significativas.

En yema – albúmina, se encontró que el As es el elemento con las concentraciones más altas 2517.8 mg kg⁻¹dw para *C. mydas* y 1505.7 mg kg⁻¹dw para *C. Caretta*. La especie *C. mydas* presentó las concentraciones promedio más altas en Cd, Ni, As y Cr, mientras que *C. caretta* tuvo los niveles más altos en Mn, Cu y Zn (Fig. 14). Al comparar las dos especies, se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de Cd, Ni, As y Cr; (X²; P=0.01 para los 4 metales) y en Zn (X² P=0.03) (tabla 7).

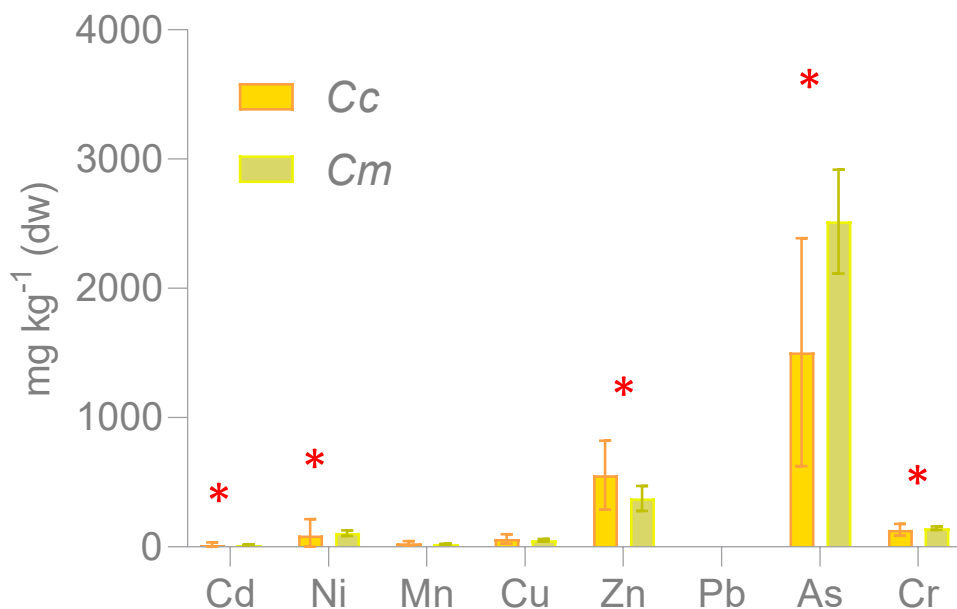


Figura 14.- Concentraciones de metales pesados (media ± 1DE) en **albúmina y yema juntas** de huevos de tortuga *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*. El * muestra donde hubo diferencias significativas.

Las concentraciones promedio de As en cáscara de *C. caretta* fueron significativamente mayores (X^2 ; $p= 0.01$) en comparación con los demás metales, en *C. caretta* se encontró niveles de $206.10 \text{ mg kg}^{-1}$ y en *C. mydas* $170.96 \text{ mg kg}^{-1}$. El metal detectado con las concentraciones más bajas fue Cd 2.928 mg kg^{-1} para *C. mydas* y 2.932 mg kg^{-1} para *C. caretta* (Fig. 15).

Para Cd, Ni, Mn y Cu las dos especies presentaron concentraciones promedio similares. Los niveles de Zn 13.4 mg kg^{-1} As $206.10 \text{ mg kg}^{-1}$ y Cr 16.23 mg kg^{-1} en *C. caretta* fueron mayores que en *C. mydas*, solo las concentraciones de Cd y Ni fueron mayores en *C. mydas*, sin embargo, al momento de hacer las comparaciones, solo se encontraron diferencias significativas para el As (tabla 7).

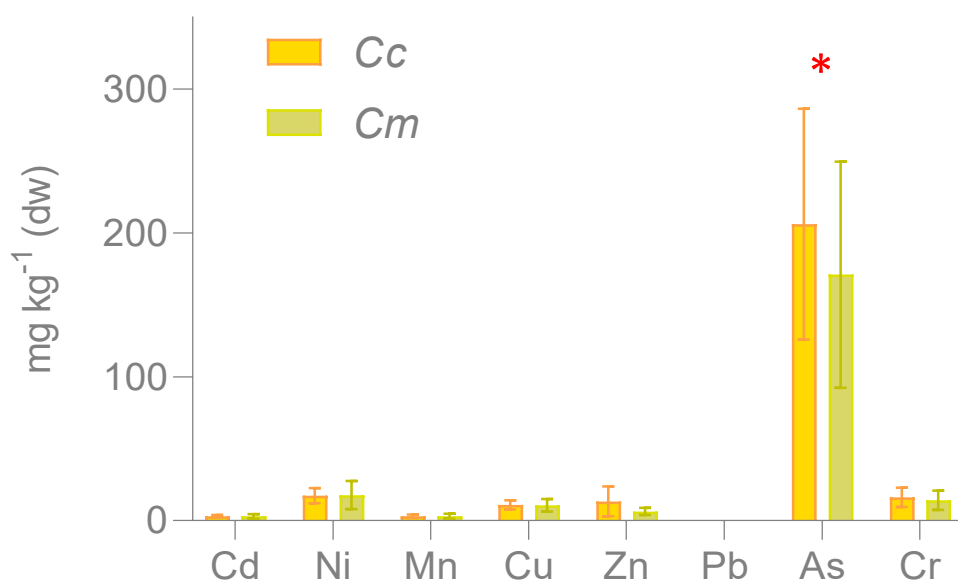


Figura 15.- Concentraciones de metales pesados (media \pm 1DE) en **cáscara** de huevos de tortuga *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*. El * muestra donde hubo diferencias significativas.

Hígado

Chelonia mydas tuvo los niveles más altos de Cd, Ni, Mn, Cu, As y Cr, mientras que *C. caretta* alcanzó la concentración más alta de Zn en hígado, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas al momento de hacer las comparaciones (Fig.16). Las concentraciones promedio de arsénico en *C. mydas* alcanzaron niveles de 776.70 mg kg⁻¹, mientras que para *C. caretta* fue de 632.20 mg kg⁻¹. De igual manera las concentraciones más altas después del As fueron de Ni con valores de 102.625 mg kg⁻¹ para *C. mydas* y 78.98 mg kg⁻¹ para *C. caretta*. En *C. mydas* el tercer metal con mayor concentración fue Cr con 63.82 mg kg⁻¹, mientras que para *C. caretta* fue Zn con 57.70 mg kg⁻¹. Para ambas especies el metal detectado con menor concentración fue Mn.

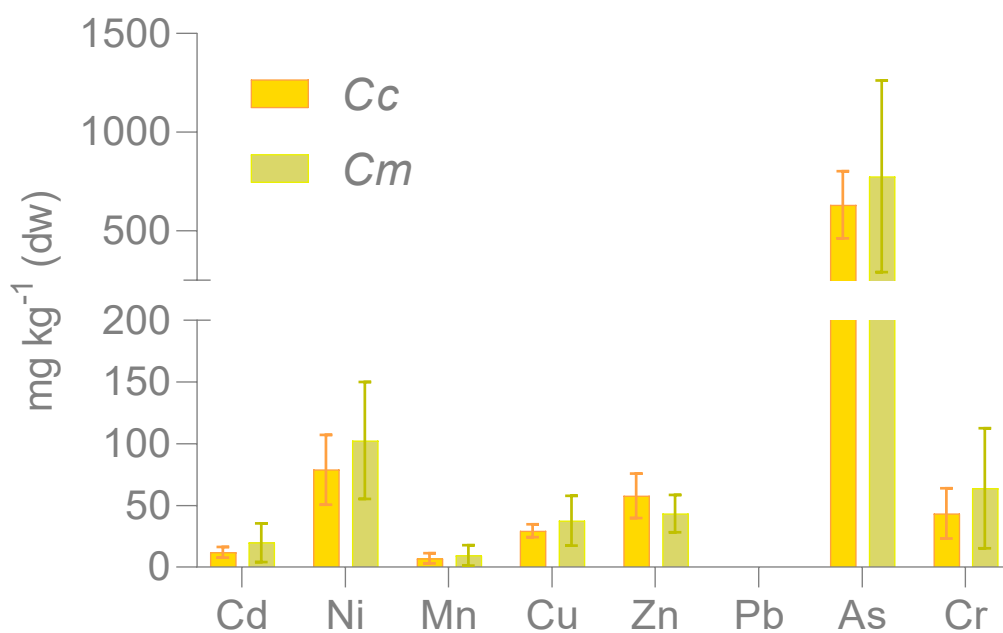


Figura 16.- Concentraciones de metales pesados (media \pm 1DE) en **hígado** de ejemplares neonatos de tortuga *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*. Los números sobre las barras señalan la cantidad de muestras con X analito.

Caretta caretta tuvo las concentraciones promedio más altas en todos los metales analizados, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas al momento de hacer las comparaciones. El As alcanzó concentraciones promedio de 2121.08 mg kg⁻¹, mientras que *C. mydas* tuvo 1346.60 mg kg⁻¹, el segundo metal que tuvo las concentraciones altas fue Ni con 286.87 mg kg⁻¹ en *C. caretta* y 202.84 mg kg⁻¹ en *C. mydas*, el metal detectado con menor concentración para ambas especies fue Mn 14.05 mg kg⁻¹ en músculo de *C. mydas* y 25.09 mg kg⁻¹ en *C. caretta* (Fig. 17).

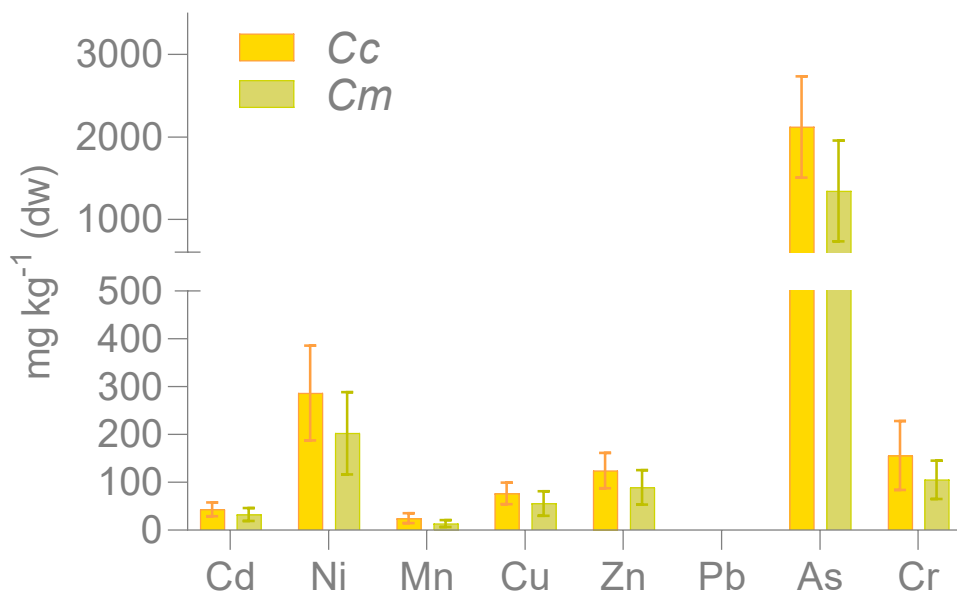


Figura 17.- Concentraciones de metales pesados (media \pm 1DE) en **músculo** de ejemplares neonatos tortuga *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*. Los números sobre las barras señalan la cantidad de muestras con X analito.

El metal que alcanzó las concentraciones más altas fue As en ambas especies, con concentraciones promedio de 1615.00 mg kg⁻¹ en carapacho de *C. caretta* y 1156 mg kg⁻¹ en *C. mydas*, seguido Ni y Cr. La especie *C. caretta* tuvo las concentraciones más altas en todos los metales analizados, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas al momento de comparar las concentraciones de ambas especies. Los niveles de Mn fueron los más bajos detectados 13.33 mg kg⁻¹ en *C. mydas* y 21.76 mg kg⁻¹ en *C. caretta* (Fig. 18).

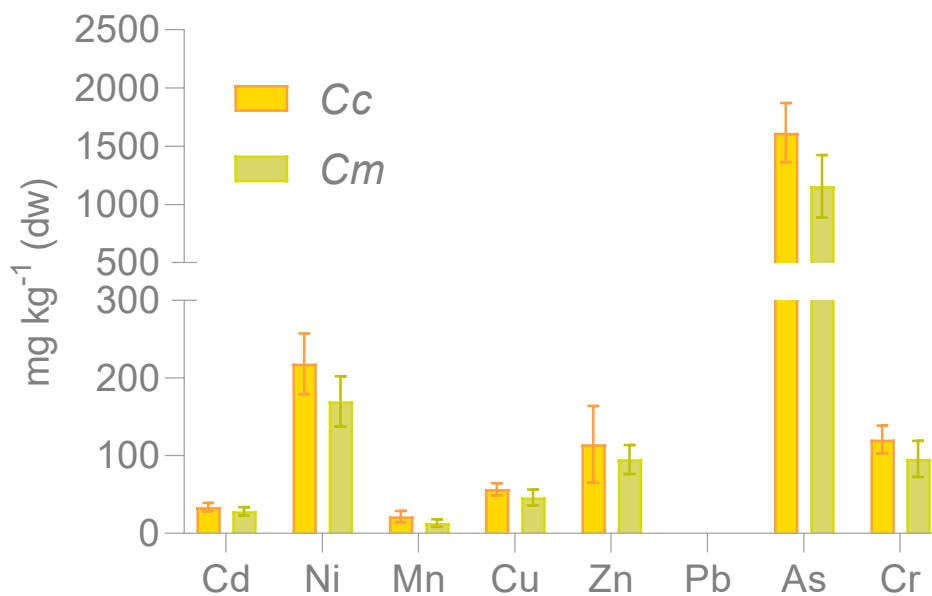


Figura 18.- Concentraciones de metales pesados (media \pm 1DE) en **carapacho** de ejemplares neonatos de tortuga *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*.

En general, los huevos de *C. caretta* alcanzaron las concentraciones más altas de Cadmio (Cd), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn), y Cromo (Cr) y *C. mydas* de Níquel (Ni) y Arsénico (As).

En los análisis de los neonatos y neonatos muertos, la especie *C. caretta* fue la que presentó las concentraciones más altas en todos los metales analizados.

Comparación intraespecífica entre las concentraciones de tejidos y partes de huevos de *Chelonia mydas*

Al comparar las concentraciones entre los tejidos y partes del huevo de *C. mydas*, se encontró que había diferencias significativas en las concentraciones de tejidos de los neonatos muertos y neonatos con los niveles de las fracciones de huevos (tabla 5).

De manera general las concentraciones de metales en tejidos presentaron el siguiente patrón músculo > carapacho > hígado, a excepción del Zn que fue el más alto en carapacho. En cuanto a las concentraciones de las partes del huevo, la albúmina tuvo las concentraciones más altas en todos los metales analizados (Tabla 2).

Comparación intraespecífica entre las concentraciones de tejidos y partes de huevos de *Caretta caretta*

Para *C. caretta*, los tejidos presentaron concentraciones significativamente más altas (para todos los metales examinados), en comparación con las partes de huevos (tabla 6). Las concentraciones de metales en los tejidos y partes de huevo

tuvieron el siguiente patrón músculo > carapacho > hígado > yema y albúmina > albúmina > yema > cáscara.

9- DISCUSIÓN

Los metales pesados son uno de los grupos de contaminantes que con gran facilidad alcanzan la zona costera y perturban el equilibrio ahí existente poniendo en riesgo la salud de los ecosistemas y del hombre (Páez-Osuna et al., 1987). Los aportes desde el continente hacia los mares y costas representan la ruta principal de entrada de estas sustancias.

Las actividades humanas contribuyen de manera significativa al incremento de los niveles de metales pesados (Gelabert et al., 2006), el crecimiento de los asentamientos humanos en las zonas costeras y el turismo, generan daños parciales o totales en estas zonas (Solis et al., 2009; Villanueva & Botello, 1992).

La toxicidad de los metales pesados depende de su concentración en el medio y de su combinación con compuestos orgánicos presentes y su ingreso a las cadenas alimentarias, donde pueden ocurrir procesos de concentración, bioacumulación y biomagnificación (Velez & Botello, 1991).

Al analizar las diferentes fracciones de huevo, se encontró que la cáscara presentaba concentraciones más altas en comparación con la yema para todos los metales analizados (a excepción del Zn), esto puede deberse a que el cascarón es un medio de excreción de metales de la madre (Talavera, 2010); algunos autores han evidenciado que los huevos pueden absorber minerales durante la incubación por el contacto directo con la arena, ocasionando que las concentraciones de diferentes compuestos (metales incluidos) en este tejido sean mayores comparado con otros presentes en el huevo (Sakai et al., 2000). Por ejemplo, Burger & Gibbons

(1998) encontraron que las concentraciones de Pb, Hg y Se eran mayores en el contenido de los huevos, mientras que el Cromo era más alto en la cáscara. Lo que demuestra que la cascara presenta afinidad por cierto elementos.

Para las dos especies, las concentraciones de Zn en yema fueron altas en comparación con los demás metales. Esto se debe a que el Zn es un elemento esencial para el desarrollo del tejido embrionario, el cual actúa como fuente de nutrientes para el embrión (Talavera 2010), se sabe que la transferencia de elementos esenciales entre la madre y las crías a través de la yema es necesaria, ya que contribuyen a procesos fisiológicos para el buen desarrollo del embrión, mientras que la transferencia de metales no esenciales es más limitada (Storelli & Marcotrigiano, 2003).

Ozdilek et al. (2007) encontraron que existe una relación entre las concentraciones de Zn con malformaciones en los embriones, donde a partir de 197 mg kg^{-1} los embriones presentaban deformaciones y que el valor promedio en cascarón de un embrión exitosamente desarrollado era de 4 mg kg^{-1} ; en el presente estudio se encontraron concentraciones promedio superiores a $6.4 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$ en *Chelonia mydas* y superiores a $13.4 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$ en *Caretta caretta*, alcanzando concentraciones de hasta $51.8 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$, resultados que son aproximadamente 10 veces mayores a las reportadas para huevos exitosos (4 mg kg^{-1}), por lo que se podría pensar que los huevos de esta zona presenten estos problemas.

Los valores más altos de Cu son encontrados en músculo, carapacho e hígado de ejemplares neonatos y no natos de las dos especies analizadas, en este estudio se demuestra que el Cu tiende a concentrarse principalmente en hígado de *Chelonia*

mydas tal y como lo reportan otros estudios (Sakai et al., 1995, Godley et al., 1999), esto posiblemente se debe a que este metal tiende a acumularse en organismos que se alimentan de algas y pastos marinos y no tanto en especies carnívoras (Pugh & Becker, 2001).

Las altas concentraciones de Cd encontradas en los tejidos de tortugas marinas (Max 68.2 mg kg⁻¹ dw) superan los límites máximos permisibles (2.0 mg kg⁻¹) de la norma oficial mexicana (más de 30 veces) para productos pesqueros (NOM-242-SSA1-2009); y debido a que se reconoce que el Cadmio es un elemento altamente teratogénico y embriotóxico (Storelli & Marcotrigiano, 2003), se podría pensar que las poblaciones de tortugas marinas analizadas en el presente estudio pudieran estar viéndose afectadas durante las primeras etapas de su desarrollo (Sunderman et al., 1995). Por otra parte, Bustamante et al. (1998) atribuyeron que los cefalópodos constituyen una importante fuente de Cadmio para sus depredadores, la especie *C. caretta* en todo su ciclo de vida y *C. mydas* en su etapa como cría y juvenil, se alimentan de estos invertebrados marinos (cefalópodos) por lo que pueden llegar a acumular niveles más altos de Cd y otros metales (Huerta, 2017).

Los estudios realizados previamente en el Caribe sobre las concentraciones de Cr en huevos de tortugas marinas (Stoneburner et al., 1980; Guzmán et al., 2020) son menores a los encontrados en el presente estudio, este metal fue uno en los que se encontraron las concentraciones promedio más altas (156.41 mg kg⁻¹ dw en músculo y 150.06 mg kg⁻¹ dw en albúmina de *Caretta caretta*), lo cual es preocupante ya que Ozdilek et al. (2007) encontraron que altas concentraciones de

este metal provocan huevos infértiles en tortugas marinas. Villanueva & Botello (1992) reportaron que los niveles de este metal en todas las lagunas y ríos del Golfo de México están elevados, siendo las principales fuentes, la agricultura, la industria e instalaciones petrolíferas (Campagna et al., 2011), de modo que se considera una zona de riesgo para las tortugas marinas y en especial para las hembras anidadoras de Quintana Roo ya que se sabe que esta población se alimenta tanto en el Golfo de México como en el Mar Caribe (SEMARNAT, 2018b).

Lam et al. (2006) mencionan que las concentraciones por encima de 0.02 mg kg^{-1} ww de Ni causan efectos adversos para la salud de las tortugas marinas, entre estas malformaciones embrionarias (Hoffman, 1979), por lo que en el presente estudio se espera que las tortugas que llegan anidar a las costas de Quintana Roo estén expuestas a sufrir daños por este metal ya que las concentraciones encontradas ($286.87 \text{ mg kg}^{-1}$ dw en músculo de nonatos de *C. caretta*) son mucho más alta. Gilani & Marano (1980) al estudiar la toxicidad de este metal encontraron que una inyección de 0,05 mg de cloruro de níquel en huevos de gallina *Leghorn* daba lugar a un 50% de embriones inviables, mientras que una dosis de 0,02 mg de cloruro de níquel no causaba efectos adversos asociados, con esto se da a conocer que este metal interfiere en el desarrollo temprano de los tejidos embrionarios (Lam et al., 2006).

Manganeso fue el metal en el que se encontraron las concentraciones más bajas en comparación con los demás metales analizados, a pesar de eso los niveles estaban por encima de las permitidas por las NOM. No se encontraron estudios toxicológicos previos involucrando huevos de tortugas marinas y Mn en el Caribe,

por lo que es muy difícil conocer cuáles son los patrones de acumulación que sigue este metal en los tejidos de embriones y huevos de tortugas marinas, sin embargo, se encontró un estudio realizado en Japón por Sakai et al. (2000) donde reportan concentraciones en huevos ($1.33 \text{ mg kg}^{-1} \text{ ww}$) inferiores a las reportadas en el presente trabajo ($26.55 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$ en albumina de *Caretta caretta*).

Las concentraciones de Pb estaban por debajo de los límites detectables de la técnica empleada, es necesario aclarar que a pesar de que no se haya detectado el plomo; no significa que no existan concentraciones, por lo que no se descarta que las tortugas marinas no estén contaminadas con este metal, ya que en trabajos previos se han encontrado concentraciones de este metal en huevos de tortugas marinas (Guirlet et al., 2008; Talavera, 2010; Guzmán et al., 2020).

Los resultados del presente estudio demuestran que el As fue el metal con las concentraciones más altas en todas las fracciones de huevo analizadas y tejidos de nonatos, en comparación con los demás metales. Tanto el As como el Cd pueden acumularse en órganos y tejidos, principalmente en riñón, hígado y músculo (Aguirre et al., 2006; Sakai et al., 2000). Edmonds et al. (1994); Sakai et al. (2000); Storelli & Marcotrigiano (2003) reportan al igual que este estudio que el As se encuentra principalmente en tejido muscular.

Las concentraciones encontradas en huevos con desarrollo embrionario tuvieron diferencias significativas con los que no tuvieron desarrollo (tabla 5 y 6), es decir: al analizar los tejidos (músculo, hígado y carapacho) de los embriones. Se sabe que huevos con desarrollo son alterados tanto por procesos fisiológicos como bioquímicos, que pueden ayudar a modificar las concentraciones de estos

contaminantes (Orłowski et al. 2017), diferentes estudios como el de Rie et al. (2001) encontraron que las concentraciones de Cd en cáscara y albúmina aumentaban a medida que se avanzaba en el desarrollo de la tortuga pintada (*Chrysemys picta*) (medido a las 6, 24 y 192 horas). También encontraron que el hígado acumula de manera preferencial este metal (Cd), a través de procesos en los que se sintetizan proteínas que tienen la capacidad de unirse a metales como las metalotioneínas (Di Giulio et al., 2020). También se ha encontrado que el arsénico tiende a acumularse significativamente en huevos y embriones durante la incubación, cuando este elemento está presente en altas concentraciones en el ambiente (Marco et al. 2004), especialmente en huevos de reptiles con cascarón blando/flexible como el de las tortugas marinas (Márquez M., 1996).

Similar a lo reportado por Sakai et al. (2000) y Storelli & Marcotrigiano (2003) se encontró que la tortuga *Caretta caretta* presenta una mayor carga de metales pesados comparado con *Chelonia mydas*. En general las diferencias significativas que se encontraron en las concentraciones de las dos especies se puede explicar por el tipo de alimentación entre una y otra especie. Se sabe la fuente principal de exposición a los metales pesados (Storelli & Marcotrigiano, 2003) es a través de la ingesta alimenticia. Por lo que especies carnívoras como *C. Caretta* al estar en niveles tróficos superiores tienden a tener mayores concentraciones en comparación con las especies herbívoras (Fitzgerald, 2004), llama la atención haber encontrado valores altos en hígado de ejemplares no natos y neonatos *C. mydas* ya que es una especie herbívora por lo que se esperaba encontrar concentraciones más bajas a las encontradas en *C. caretta*, sin embargo, si esta especie se

alimentara de algas con altos contenidos de As como el Sargazo podrían acumular grandes cantidades de arsénico como arsenobetaina en su hígado (Kunito et al., 2008), y ser transferidos de la madre a las crías. De manera general las diferencias encontradas entre ambas especies están relacionadas con la dieta en la etapa adulta y con la transferencia materna.

La comparación de las concentraciones encontradas en los huevos y embriones de *C. mydas* y *C. caretta* con los niveles de contaminantes reportados anteriormente para huevos y crías de tortugas marinas de otros lugares (tabla 8) sugieren que estas dos especies están expuestas en la región a concentraciones muy altas de elementos tóxicos.

Las concentraciones de Cu y Cd fueron similares en comparación con los estudios previamente realizados en tortugas marinas del Caribe (Stoneburner et al., 1980: Cu 6.0 mg kg⁻¹dw y Cd 0.11 mg kg⁻¹dw en yema, Guzmán et al., 2020: Cu 2.74 mg kg⁻¹ww y Cd 0.10 mg kg⁻¹ww en huevo), mientras que para As y Cr las concentraciones del presente estudio son considerablemente más altas que las determinadas por estos trabajos. En cuanto al Mn y Ni no se pudieron comparar debido a que no hay estudios en huevos o embriones de tortugas marinas en esta zona (tabla 8).

Las concentraciones encontradas de Cd, Zn, Ni, Mn, Cu, As y Cr en tejidos (hígado, músculo y carapacho) de ejemplares nonatos de *C. caretta* y *C. mydas* fueron considerablemente altas, desafortunadamente hay muy pocos estudios realizados en ejemplares nonatos y neonatos de tortugas marinas en el Caribe, a excepción

del trabajo de Talavera, (2010) cuyas concentraciones son menores a las del presente estudio.

Guzmán et al. (2020) en el año 2020 reportaron para huevos de tortuga laúd de Panamá las concentraciones más altas jamás antes encontradas de As en huevos de tortugas marinas ($5.37 \text{ mg kg}^{-1} \text{ ww}$). Los resultados del presente estudio sin duda alguna rebasan los niveles publicados por estos autores, lo cual genera una preocupación por el grado tan elevado de contaminación presente por este elemento, el cual podría estar afectando no solo a las poblaciones de tortugas marinas sino a los demás organismos presentes en el ecosistema.

A pesar de que la zona de muestreo se puede considerar como un lugar con poco impacto antropogénico, dado a su baja densidad poblacional y a que no hay actividades industriales mineras o agrícolas pesadas (Rodríguez, 2011; R. Rodríguez, 2020), las costas del Caribe Mexicano han recibido millones de toneladas de Sargazo desde el verano del 2014, ocasionando una acumulación a lo largo del tiempo (Rodríguez & Van, 2017), lo cual también es una fuente potencial de contaminación por metales, ya que el sargazo puede acumular y metabolizar grandes cantidades de metales tóxicos como Hg, Pb, Cd, Ni Cr y As, este último especialmente en formas inorgánicas, las cuales son consideradas las más tóxicas (Fernández et al., 2017; Mamun et al., 2019). Se sabe que el sargazo al llegar a la costa las concentraciones de As disminuyen por la lixiviación, por lo que este fenómeno es una fuente de contaminación para el ambiente costero (Devault et al. 2022). Para la región, se han reportado concentraciones elevadas de este elemento (172 mg kg^{-1} ; 225 mg kg^{-1}) en diferentes muestreos realizados entre Isla Contoy e

Xcalak en el Sur del Estado. Se cree, que este metal se acumuló a lo largo de todo su viaje por el Océano Atlántico y no cerca a las costas del Caribe Mexicano. De manera similar Pereira et al. (2021) reportaron que ha habido un incremento en las concentraciones de metales pesados en sargazo, en particular en Plomo, Cromo y Arsénico.

Los resultados de este estudio parecen indicar que los huevos de las tortugas marinas que llegan a anidar a las costas de Quintana Roo están obteniendo y/o acumulando metales pesados del sustrato contaminado a causa de la trasudación de elementos tóxicos por procesos de desorción o biodegradación de la biomasa algal (Mamun et al., 2019) que llega a esta zona. Por lo que es un factor que influye negativamente al éxito de eclosión (Sinaei & Bolouki, 2017) y por lo tanto puede ocasionar una disminución en las poblaciones de estas dos especies.

A pesar de la alarmante concentración de As encontrada en este estudio, es importante mencionar que este trabajo se llevó a cabo con un número relativamente bajo de huevos y ejemplares neonatos procedentes de pocos nidos, por lo que estas elevadas concentraciones podrían representar valores puntuales para un área específica de las playas de anidación en Mahahual y no ser representativas para la totalidad de las poblaciones de tortugas marinas y de los nidos. Por lo que futuros trabajos, empleando un mayor número de nidos, y huevos deberán ser llevados a cabo para corroborar si estas concentraciones responden a un fenómeno puntual/local o si representan el estado actual para las poblaciones de tortugas marinas que anidan en el estado de Quintana Roo.

Tabla 8. Comparación de concentraciones de metales pesados representados en (media \pm DE mg kg⁻¹) en huevos y tejidos de ejemplares nonatos y crías muertas de tortugas marinas de trabajos realizados en el Caribe.

Especie	Lugar	Fracción	Cu	Zn	As	Cr	Cd	Pb	Ni	Mn	Autor
<i>Dermochelys coriacea</i>	Caribe Panamá	Huevo	2.74	69.80	5.37	0.88	0.10	0.19	-	-	(Guzmán et al., 2020) ww
	Guayana Francesa	Huevo	0.63	14.16	-	-	0.024	0.036	-	-	(Guirlet et al., 2008) ww
<i>Caretta caretta</i>	Florida	Yema	6.0	77	-	1.1	0.11	2.2	0	-	(Stoneburner et al., 1980)dw
	Georgia	Yema	5.0	74	-	1.2	0.19	1.1	0.257	-	(Stoneburner et al., 1980) dw
<i>Chelonia mydas</i>	Mar Caribe Mexicano	Yema	4.63	44.4	87.4	12.03	0.90	DLD	5.74	2.33	Este estudio (dw)
		Albúmina	40.2	96.6	1161.5	150.0	13.64	DLD	53.4	26.5	
		Yema y albúmina	61.4	555.1	1505.7	132.9	14.6	DLD	87.8	29.4	
		Cáscara	10.94	13.4	206.10	16.21	2.93	DLD	17.32	3.16	
		Hígado	29.54	57.7	632.2	43.5	12.08	DLD	78.98	7.18	
		Músculo	77.34	124.98	2121.08	156.2	43.30	DLD	286.87	25.09	
	Mar Caribe Mexicano	Carapacho	56.76	114.69	1615.65	120.642	33.77	DLD	218.38	21.76	Este estudio (dw)
		Yema	4.86	44.6	44.6	14.8	1.26	DLD	8.67	2.15	
		Albúmina	33.8	57.7	57.75	105.7	9.78	DLD	67.5	8.87	
		Yema y albúmina	51.9	372.4	372.4	144.8	16.2	DLD	107.7	22.34	
		Cáscara	10.75	6.41	170.96	14.10	2.93	DLD	17.73	3.03	
		Hígado	37.56	43.25	776.7	63.82	19.9	DLD	102.62	9.58	
		Músculo	56.02	89.36	1346.6	105.41	32.85	DLD	202.84	14.058	
		Carapacho	46.08	95.25	1156.08	95.77	28.28	DLD	169.97	13.33	
	Yema	-	21.15	-	-	0.02	0.02	-	-	(Talavera, 2010) dw	
	Cáscara	-	26.4	-	-	<0.01	0.04	-	-		
	Hígado crías(Max)*	-	nd	-	-	0.98	0.59	-	-		
	Caparazón (Max)*	-	22.85	-	-	0.05	0.14	-	-		
	Crías	-	12.24	-	-	0.32	0.17	-	-		

Guion= No analizado; DLD= Debajo del Límite de Detección. *Concentración representada como máxima. nd= no detectado, ww: peso en base húmeda, dw: peso en base seca

10.- CONCLUSIONES

Como principales conclusiones se pueden mencionar las siguientes:

1.- La evaluación de metales pesados sobre estas dos especies de tortugas marinas, pone en evidencia una alta concentración de metales pesados.

2.- *Caretta Caretta* tuvo las concentraciones más altas comparada con *Chelonia mydas*.

3.- Ambas especies presentaron el mismo patrón de niveles de contaminantes;

As > Zn > Ni > Cr > Cu > Mn > Cd

4.- Las concentraciones más altas encontradas fueron de Arsénico, encontrándose principalmente en albúmina y en el músculo de tortugas marinas.

11. RECOMENDACIONES

Futuros trabajos deberán ser llevados a cabo para evaluar las concentraciones de metales en la región. Incluyendo estudios sobre los patrones de acumulación de metales en el desarrollo fetal de las tortugas y en su éxito de eclosión, así como también realizar análisis de contaminantes en el sustrato (arena) en áreas de anidación o de manera puntual tanto en la arena de nidos donde se toman huevos para analizar.

Por otra parte, si el sargazo que está llegando a descomponerse esta contaminando las playas de Quintana Roo y en general del Caribe, deben tomarse medidas urgentes para evitar estos problemas ambientales

11.- REFERENCIAS

- Aguirre, A. A., Gardner, S. C., Marsh, J. C., Delgado, S. G., Limpus, C. J., & Nichols, W. J. (2006). Hazards associated with the consumption of sea turtle meat and eggs: A review for health care workers and the general public. In *EcoHealth* (Vol. 3, Issue 3, pp. 141–153). <https://doi.org/10.1007/s10393-006-0032-x>
- Alba, M. (2018). *Quintana Roo, pionero en el manejo y monitoreo de tortugas marinas en México*. <https://centrosconacyt.mx/objeto/tortugas-marinas-mexico/>
- ATSDR. (2000). *RESUMEN DE SALUD PÚBLICA Manganeso Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. www.atsdr.cdc.gov/es
- ATSDR. (2004). *Resumen de Salud Pública: Cobre*. www.atsdr.cdc.gov/es
- ATSDR. (2005). *Resumen de Salud Pública: Níquel*. www.atsdr.cdc.gov/es
- Aureoles, V. (2007). *CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA TORTUGA NEGRA, Chelonia mydas EN BAJA CALIFORNIA SUR*.
- Avila, V., Vizcarra, I., & González, T. (2018). *Sustentabilidad ambiental. Una visión interdisciplinaria de los DAAD-Alumni en México*. <https://www.researchgate.net/publication/327189838>
- Baldwin, S., Deaker, M., & Maher, W. (1994). Low-volume microwave digestion of marine biological tissues for the measurement of trace elements. *Analyst*, 119(8), 1701-1704.
- Beltran, J., Villasol, A., Botello, A., & Palacios, F. (2005). *Golfo de México: contaminación e impacto ambiental : diagnóstico y tendencias* .
- Beltrán, M., & Gomez, A. (2015). *Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación Heavy metals (Cd, Cr and Hg): impact on environment and possible biotechnological strategies for remediation* (Issue 2).
- Bradl, H. B. (2005). Chapter 1 Sources and origins of heavy metals. *Interface Science and Technology*, 6(C), 1–27. [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(05\)80020-1](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(05)80020-1)
- Briseño, D., & Abreu, G. (1998). *Las tortugas y sus playas de anidación en México*. CONABIO; Ciudad de México, México. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfP066.pdf>.

- Bruland K. (1983). *Trace elements in seawater, in Chemical Oceanography. London: Academic Press, 8, 157-220*
- Buitrago, J., Vera, V., Cruz, M., & Montiel Villalobos, M. (2015). *Tortuga Verde - Chelonia mydas - Libro Rojo de la Fauna Venezolana.*
- Burger, J. (1994). Heavy metals in avian eggshells: Another excretion method. *Journal of Toxicology and Environmental Health, 41(2), 207–220.* <https://doi.org/10.1080/15287399409531837>
- Burger, J., & Gibbons, J. W. (1998). Trace Elements in Egg Contents and Egg Shells of Slider Turtles (*Trachemys scripta*) from the Savannah River Site. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology 1998 34:4, 34(4), 382–386.* <https://doi.org/10.1007/S002449900334>
- Bustamante, P., Caurant, F., Fowler, S. W., & Miramand, P. (1998). Cephalopods as a key of the transfer of cadmium to top marine predators. *Science of the Total Environment, 220(1), 71–80.* [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00250-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00250-2)
- Cahuich, A., Mena, G., Ojeda, W., & Pech, C. (2006). *Conservación de la tortuga marina (Chelonia mydas) en Cozumel.*
- Campagna, C., Short, F. T., Polidoro, B. A., McManus, R., Collette, B. B., Pilcher, N. J., Mitcheson, Y. S. de, Stuart, S. N., & Carpenter, K. E. (2011). Gulf of Mexico oil blowout increases risks to globally threatened species. *BioScience, 61(5), 393–397.* <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.5.8>
- Carr, A. F. 1909-, Carr, M. Harris., & Meylan, A. B. (1978). *The ecology and migrations of sea turtles. 7, The West Caribbean green turtle colony. Bulletin of the AMNH; v. 162, article 1.* <https://digitallibrary.amnh.org/handle/2246/1287>
- Casale, P., & Tucker, A. (2017). *Caretta caretta. THE IUCN RED LIST OF THREATENED SPECIES™.* <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T3897A119333622.en>
- Castellanos, I., & Suarez, E. (1997). *Observaciones sobre el zooplancton de la zona arrecifal de Mahahual, Quintana Roo (Mar Caribe Mexicano).*
- CGACC. (n.d.). *MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE METALES E HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS EN TEJIDOS DE TORTUGAMARINA DEL GOLFO DE MÉXICO.*
- CIT. (2005). *LA TORTUGA CAGUAMA O CABEZONA (Caretta caretta).* www.cccturtle.org

CONABIO. (2017). *LISTA DE ÁREAS PRIORITARIAS MARINAS DE MÉXICO.*

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rmp_067.html

CONAGUA. (2017). *México, santuario ancestral de las tortugas marinas | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx.*
<https://www.gob.mx/conagua/articulos/mexico-santuario-ancestral-de-las-tortugas-marinas?idiom=es>

CONANP. (2009). *FICHA DE IDENTIFICACIÓN.*
<http://www.conanp.gob.mx/sig/imgmapoteca/mapoteca.htm>.

CONANP. (2013). *Guía Ilustrada de tortugas marinas conanp .*

CONANP. (2020). *PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVACIÓN DE TORTUGAS MARINAS.*

Contreras, L. (2016). "METALES PESADOS EN HUEVOS DE TORTUGA LORA (*Lepidochelys kempii*) Y VERDE (*Chelonia mydas*) Y SU RELACIÓN CON EL ÉXITO DE ECLOSIÓN."

Contreras, P. (2008). Las Tortugas Marinas y Nuestro Tiempo. *Acta Universitaria*, 18(1), 32–35. <https://doi.org/10.15174/AU.2008.149>

Cuevas, E. (2017). Dimensiones espacial y temporal de los procesos de selección de hábitats críticos por las tortugas marinas. *Undefined*, 52(2), 187–199. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572017000200001>

Devault, D. A., Massat, F., Baylet, A., Dolique, F., & Lopez, P. J. (2022). Arsenic and chlordecone contamination and decontamination toxicokinetics in Sargassum sp. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 6–16. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12127-7>

Di Giulio, R. T., Benson, W. H., Sanders, B. M., & van Veld, P. A. (2020). Biochemical Mechanisms: Metabolism, Adaptation, and Toxicity. *Fundamentals of Aquatic Toxicology*, 523–561. <https://doi.org/10.1201/9781003075363-20/BIOCHEMICAL-MECHANISMS-METABOLISM-ADAPTATION-TOXICITY-DI-GIULIO-BENSON-SANDERS-VAN-VELD>

DOF. (1990). *Diario Oficial de la Federación.*
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4658226&fecha=31/05/1990

Dueñas, B., & Abreu, A. (1994). *Las tortugas y sus playas de anidación en México.* <https://1library.co/document/ydmeg7ly-informe-final-del->

proyecto-p066-las-tortugas-y-sus-playas-de-anidacion-en-mexico.html

- Eckert, K., Bjørndal, K., Abreu-Grobois, A., & Donnelly M. (2000). *Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas. Grupo Especialista en Tortugas Marinas UICN/CSE Publicación No. 4.* <https://www.iucn-mtsg.org/tecnicas-de-investigacion>
- Edmonds, J. S., Shibata, Y., Prince, R. I. T., Francesconi, K. A., & Morita, M. (1994). ARSENIC COMPOUNDS IN TISSUES OF THE LEATHERBACK TURTLE, *DERMOCHELYS CORIACEA*. In *mar. biol. Ass. U.K* (Vol. 74).
- Fernandez, F., Boluda, C., Olivera, J., Guillermo, L., Gomez, B., Echavarría, E., & Gomez, A. (2017). *Análisis Elemental Prospectivo de la Biomasa algal acumulada en las costas de la República Dominicana durante 2015.* http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2223-48612017000100002&script=sci_arttext&tlng=en
- Fitzgerald, S. L. (2004). *Los metales pesados en cuatro especies de tortugas marinas de Baja California, México.* <http://dSPACE.cibnor.mx:8080/handle/123456789/92>
- Gadd, G. M., & Griffiths, A. J. (1977). Microorganisms and heavy metal toxicity. *Microbial Ecology*, 4(4), 303–317. <https://doi.org/10.1007/BF02013274>
- Gardner, S. C., Fitzgerald, S. L., Vargas, B. A., & Rodríguez, L. M. (2005). Heavy metal accumulation in four species of sea turtles from the Baja California peninsula, Mexico. *BioMetals*, 19(1), 91–99. <https://doi.org/10.1007/s10534-005-8660-0>
- Gelabert, R., Jiménez, J., ciencia, R. B.-U. y, & 2006, undefined. (2006). Efectos tóxicos del níquel y el zinc en *Artemia franciscana* (Crustacea: Branchiopoda: Anostraca). *Redalyc.Org*, 22(1), 65–74. <https://www.redalyc.org/pdf/154/15402205.pdf>
- Gilani, S. H., & Marano, M. (1980). Congenital abnormalities in nickel poisoning in chick embryos. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 9(1), 17–22. <https://doi.org/10.1007/BF01055496>
- Godley, B., Thompson, D., & Furness, R. (1999). *Do Heavy Metal Concentrations Pose a Threat to Marine Turtles from the Mediterranean Sea?*
- Guirlet, E., Das, K., & Girondot, M. (2008). Maternal transfer of trace elements in leatherback turtles (*Dermochelys coriacea*) of French

- Guiana. *Aquatic Toxicology*, 88(4), 267–276.
<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2008.05.004>
- Guzmán, H. M., Kaiser, S., & van Hinsberg, V. J. (2020). Accumulation of trace elements in leatherback turtle (*Dermochelys coriacea*) eggs from the south-western Caribbean indicates potential health risks to consumers. *Chemosphere*, 243.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125424>
- Hoffman, D. J. (1979). Embryotoxic Effects of Crude Oil Containing Nickel and Vanadium in Mallards. In *Bull. Environm. Contain. Toxicol* (Vol. 23).
- Huerta, M. (2017). *RELACIÓN DEL SISTEMA CRÁNEOMANDIBULAR Y LOS HÁBITOS ALIMENTARIOS EN DOS ESPECIES DE TORTUGAS MARINAS.*
- Huerta, P., Vasconcelos, D., Ocampo, E., Tavera, A., & Ángeles, M. A. (2006). *Caparazón: concha de la tortuga Textos: Ilustraciones y Diseño originales: Fotografías.* www.wwf.org.mx
- Jacobson, E. R., Wronski, T. J., Reggiardo, C., Berry, K. H., Schumacher, J., & Berry, K. H. (1994). CUTANEOUS DYSKERATOSIS IN FREE-RANGING DESERT TORTOISES, GOPHERUS AGASSIZII, IN THE COLORADO DESERT OF SOUTHERN CALIFORNIA. In *Journal of Zoo and Wildlife Medicine* (Vol. 25, Issue 1).
<https://www.researchgate.net/publication/236935319>
- Kenyon, L. , O., Landry, A. , M. , . Jr., & Gill, G. , A. (2001). Trace metal concentrations in blood of the Kemp's ridley sea turtle (*Lepidochelys kempii*). *Chelonian Conservation and Biology*, 4(1), 128–135.
<https://eurekamag.com/research/011/579/011579694.php>
- Kunito, T., Kubota, R., Fujihara, J., Agusa, T., Tanabe, S., Kunito, T., Kubota, R., Fujihara, J., Agusa, T., & Tanabe, S. (2008). *Arsenic in Marine Mammals, Seabirds, and Sea Turtles.*
- Lam, J. C. W., Tanabe, S., Chan, S. K. F., Lam, M. H. W., Martin, M., & Lam, P. K. S. (2006). Levels of trace elements in green turtle eggs collected from Hong Kong: Evidence of risks due to selenium and nickel. *Environmental Pollution*, 144(3), 790–801.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.02.016>
- Lara, M., & Rodriguez, C. (2014). *Tortuga Caguama o Amarilla, Caretta caretta* (Linnaeus, 1758).
<https://www.researchgate.net/publication/270960852>

- Ley-Quiñónez, C. P., Zavala-Norzagaray, A. A., Réndon-Maldonado, J. G., Espinosa-Carreón, T. L., Canizales-Román, A., Escobedo-Urías, D. C., ... & Aguirre, A. A. (2013). Selected heavy metals and selenium in the blood of black sea turtle (*Chelonia mydas agasiizzi*) from Sonora, Mexico. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 91(6), 645-651.
- Madariaga, E. (2010). *Modelo de gestión de los residuos procedentes de embarcaciones en los puertos pesqueros y deportivos de Cantabria: propuestas de control ambiental*.
- Mamun, M. A. al, Omori, Y., Miki, O., Rahman, I. M. M., Mashio, A. S., Maki, T., & Hasegawa, H. (2019). Comparative biotransformation and detoxification potential of arsenic by three macroalgae species in seawater: Evidence from laboratory culture studies. *Chemosphere*, 228, 117–127. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.04.056>
- Marco, A. (2007). *Caretta caretta*. <http://www.vertebradosibericos.org/>
- Marco, A., López-Vicente, M., & Pérez-Mellado, V. (2004). Arsenic Uptake by Reptile Flexible-Shelled Eggs from Contaminated Nest Substrates and Toxic Effect on Embryos. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 72(5), 983–990. <https://doi.org/10.1007/s00128-004-0340-1>
- Márquez M., R. (1996). *Las tortugas marinas y nuestro tiempo*. Secretaría de Educación Pública.
- Marquez, R., & Garduño, M. (2014). *TORTUGAS MARINAS*. México: Instituto Nacional de Pesca.
- Martorell, J. (2010). *BIODISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN DOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS DE LA COSTA SURATLÁNTICA ANDALUZA AFECTADOS POR CONTAMINACIÓN DIFUSA*.
- Moreno, M. Dolores. (2003). *Toxicología ambiental: evaluación de riesgo para la salud humana*. <https://latam.casadellibro.com/libro-toxicologia-ambiental-evaluacion-de-riesgo-para-la-salud-humana/9788448137816/892783>
- Mrosovsky, N., & Yntema, C. L. (1980). Temperature dependence of sexual differentiation in sea turtles: implications for conservation practices. *Biological Conservation*, 18(4), 271–280. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(80\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0006-3207(80)90003-8)

NOM-242-SSA1-2009. (n.d.). *NORMA Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009, Productos y servicios*. Retrieved September 27, 2022, from <https://dof.gob.mx/normasOficiales/4295/salud2a/salud2a.htm>

Obeso, A. (2013). *Caracterización ambiental de la zona de alimentación de tortugas marinas en el litoral del municipio de Guasave, Sinaloa*. <http://www.cienciasinaloa.ipn.mx/jspui/handle/123456789/142>

O'Halloran, J., Walsh, A. R., & Fitzpatrick, P. J. (1997). The determination of trace elements in biological and environmental samples using atomic absorption spectroscopy. In *Bioremediation Protocols* (pp. 201-211). Humana Press.

OCEANA. (2004). *CONTAMINACIÓN POR CRUCEROS*.

Orłowski, G., Hałupka, L., Pokorny, P., Klimczuk, E., Sztwiertnia, H., Dobicki, W., & Polechoński, R. (2017). The pattern of distribution and interaction of metals and calcium in eggshells and egg contents in relation to the embryonic development of eggs in a small passerine bird. *Journal of Ornithology*, *158*(1), 297–309. <https://doi.org/10.1007/s10336-016-1366-y>

Ortega-Flores, P. A., Serviere-Zaragoza, E., De Anda-Montañez, J. A., Freile-Pelegrín, Y., Robledo, D., & Méndez-Rodríguez, L. C. (2022). Trace elements in pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean: Identification of key variables affecting arsenic accumulation in *S. fluitans*. *Science of The Total Environment*, *806*, 150657.

Páez-Osuna, F. (2005). *Fuentes de metales en la zona costera marina. Golfo de México. Contaminación e impacto Ambiental: Diagnostico y tendencias*, 329-340

Páez-Osuna, F., Botello, A., Bárcenas, C., Becerra, N., Celis, L., Cortés, J. M., Díaz, G., Mendelewicz, M., & Villanueva, S. (1987). *EL PROBLEMA CRUCIAL: LA CONTAMINACION*.

Páez-Osuna, F., Calderón-Campuzano, M. F., Soto-Jiménez, M. F., & Ruelas-Inzunza, J. R. (2010). Trace Metals (Cd, Cu, Ni, and Zn) in Blood and Eggs of the Sea Turtle *Lepidochelys olivacea* from a Nesting Colony of Oaxaca, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *59*(4), 632–641. <https://doi.org/10.1007/s00244-010-9516-3>

Pereira, A., Fragoso, P., Niño, C., & Blanco, M. (2021). *CARACTERIZACIÓN BROMATOLÓGICA Y ANÁLISIS DE METALES PESADOS PARA EL ADECUADO MANEJO DEL SARGAZO QUE*

ARRIBA A LAS COSTAS DEL ESTADO DE QUINTANA ROO.
<http://sigc.uqroo.mx/>

Pritchard, P. (1971). *The leatherback or leathery turtle, Dermochelys coriacea*. Monogr. 1. *Int. Union Conserv. Natur. Res., Morges, Switzerland*.

Pritchard, P., & Mortimer, J. (2000). *Taxonomía, Morfología Externa e Identificación de las Especies. Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas*.
<https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/1999-076-Es.pdf>

PROFEPA. (2019). *Protección de las tortugas marinas en México | Procuraduría Federal de Protección al Ambiente | Gobierno | gob.mx*.
<https://www.gob.mx/profepa/es/articulos/proteccion-de-las-tortugas-marinas-en-mexico?idiom=es>

Pugh, R., & Becker, P. R. (2001). *SEA TURTLE CONTAMINANTS: A Review with Annotated Bibliography*. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online],
https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=902471

Ramírez, R., & Azcona, M. (2017). Efectos tóxicos del manganeso. In *Rev Esp Méd Quir* (Vol. 22).

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jiménez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Dialnet.Unirioja.Es*, 16, 66–77.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>

Rie, M. T., Lendas, K. A., & Callard, I. P. (2001). Cadmium: tissue distribution and binding protein induction in the painted turtle, *Chrysemys picta*. In *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* (Vol. 130).

Rodriguez, L. (2011). *δ15N EN Thalassia testudinum COMO INDICADOR DE IMPACTO ANTROPOGÉNICO EN LA REGIÓN COSTERA DE MAHAHUAL, QUINTANA ROO, MÉXICO*.

Rodriguez, R. (2020). *Evaluación del efecto del sargazo pelágico en la calidad del agua de la laguna arrecifal de tres sitios del Caribe mexicano*. (Master's thesis, Tesis (MC)--Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida. Departamento de Recursos del Mar)

- Rodríguez, R., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M., & van Tussenbroek, B. I. (2020). Element concentrations in pelagic Sargassum along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, 2020(2), e8667. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.8667/SUPP-1>
- Rodríguez, R., & Van, B. I. (2017). *Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa. Florecimientos Algales Nocivos en México*. p, 438. <https://www.researchgate.net/publication/317222216>
- Sakai, H., Ichihashi, H., Suganuma, H., & Tatsukawa, R. (1995). Heavy Metal Monitoring in Sea Turtles Using Eggs. In *Marine Pollution Bulletin* (Vol. 30, Issue 5. 347-353).
- Sakai, H., Saeki, K., Ichihashi, H., Suganuma, H., Tanabe, S., & Tatsukawa, R. (2000). *Species-Specific Distribution of Heavy Metals in Tissues and Organs of Loggerhead Turtle (Caretta caretta) and Green Turtle (Chelonia mydas) from Japanese Coastal Waters*. *Marine Pollution Bulletin*, 40(8), 701-709.
- SEDETUS. (2021). *PROGRAMA DE DESARROLLO URBANO DE CENTRO DE POBLACIÓN DE MAHAHUAL*.
- SEMAR. (n.d.). *MAHAHUAL QUINTANA ROO I. DATOS GENERALES DEL PUERTO*.
- SEMARNAT. (2018a). *PROGRAMA DE ACCION PARA LA CONSERVACIÓN DE LA ESPECIE TORTUGA CAGUAMA (Caretta caretta)*. www.mx.undp.org
- SEMARNAT. (2018b). *Programa de Acción para la Conservación de la Especie Tortuga Verde/Negra (Chelonia mydas)*, Semarnat/Conap, México. <https://www.gob.mx/conanp/documentos/programa-de-accion-para-la-conservacion-de-la-especie-tortuga-verde-negra-chelonia-mydas>
- Seminoff, J. A. (. (2004). *Chelonia mydas*. *The IUCN Red List of Threatened Species*. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2004.RLTS.T4615A11037468.en>
- Sinaei, M., & Bolouki, M. (2017). Metals in Blood and Eggs of Green Sea Turtles (*Chelonia mydas*) from Nesting Colonies of the Northern Coast of the Sea of Oman. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 73(4), 552–561. <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0421-x>

- Solis, K., Isaac, O., Martínez, A., Lavoisier, E., & Herrera-Silveira. (2009). *Trace Metals in the Sea grass Thalassia Testudinum from Mexican Caribbean Coasts.*
- Southwood, A., Andrews, R., Paladino, F., & Jones, D. (2005). *Effects of Diving and Swimming Behavior on Body Temperatures of Pacific Leatherback Turtles in Tropical Seas.*
- Stoneburner, D. L., Nicora, M. N., Blood, E. R., Stoneburner¹, D. L., Nicora², M. N., & Blood², E. R. (1980). Society for the Study of Amphibians and Reptiles Heavy Metals in Loggerhead Sea Turtle Eggs (*Caretta caretta*): Evidence to Support the Hypothesis That Demes Exist in the Western Atlantic Population Heavy Metals in Loggerhead Sea Turtle Eggs (*Caretta caretta*): Evidence to Support the Hypothesis that Demes Exist in the Western Atlantic Population. In *Source: Journal of Herpetology* (Vol. 14, Issue 2).
- Storelli M., G. O. Marcotrigiano, M. (2000). Total Organic and Inorganic Arsenic from Marine Turtles (*Caretta caretta*) Beached Along the Italian Coast (South Adriatic Sea). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 65(6), 732–739. <https://doi.org/10.1007/s001280000184>
- Storelli, M., & Marcotrigiano, G. (2003). *Heavy metal residues in tissues of marine turtles Related papers.* www.elsevier.com/locate/marpolbul
- Sunderman, F. W., Antonijczuk, K., Antonijczuk, A., Grbac-Ivankovic, S., Varghese, A. H., Korza, G., & Ozols, J. (1995). Xenopus lipovitellin 1 is a Zn²⁺- and Cd²⁺-binding protein. *Molecular Reproduction and Development*, 42(2), 180–187. <https://doi.org/10.1002/MRD.1080420207>
- Tabor, Gary M., & Aguirre, A. A. (2004). Ecosystem Health and Sentinel Species: Adding an Ecological Element to the Proverbial ?Canary in the Mineshaft? *EcoHealth*, 1(3). <https://doi.org/10.1007/s10393-004-0092-8>
- Talavera. (2010). *Evaluación de metales pesados en hembras y crías de tortuga blanca Chelonia mydas (Reptilia, Cheloniidae) de las costas de Quintana Roo, México.*
- Talavera, R. (1997). *Dispositivos excluidores de tortugas marinas.*
- Talavera, S. (2016). *HÁBITOS ALIMENTICIOS DE LA TORTUGA VERDE (Chelonia mydas) DEL LITORAL CENTRAL DE QUINTANA ROO, MÉXICO: USO DEL δ 13 C Y δ 15 N -.*

- Talavera-Saenz, A., Gardner, S. C., Riosmena Rodriguez, R., & Acosta Vargas, B. (2007). Metal profiles used as environmental markers of Green Turtle (*Chelonia mydas*) foraging resources. *Science of the Total Environment*, 373(1), 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.10.012>
- UICN. (1995). *Estrategia mundial para la conservación de las tortugas marinas* | UICN. <https://www.iucn.org/es/content/estrategia-mundial-para-la-conservacion-de-las-tortugas-marinas>
- UICN. (2010). *Tortuga Careta en el mar de Alborán*. 5(12), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015465>
- Velez, P., & Botello, A. (1991). *ASPECTOS GEOQUIMICOS Y DE CONTAMINACION POR METALES PESADOS EN LA LAGUNA DE TERMINOS, CAMPECHE*.
- Villanueva, S., & Botello, A. (1992). *METALES PESADOS EN LA ZONA COSTERA DEL GOLFO DE MEXICO Y CARIBE MEXICANO: UNA REVISION*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 8(1), 47-61.
- Villanueva, S., & Botello, A. (1998). *Metal Pollution in Coastal Areas of Mexico*.
- Wallace, B. P., Sotherland, P. R., Tomillo, P. S., Bouchard, S. S., Reina, R. D., Spotila, J. R., & Paladino, F. v. (2006). Egg components, egg size, and hatchling size in leatherback turtles. *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, 145(4), 524–532. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.08.040>
- Wallace, B. P., Williams, C. L., Paladino, F. v., Morreale, S. J., Lindstrom, R. T., & Spotila, J. R. (2005). Bioenergetics and diving activity of interesting leatherback turtles *Dermochelys coriacea* at Parque Nacional Marino Las Baulas, Costa Rica. *Journal of Experimental Biology*, 208(20), 3873–3884. <https://doi.org/10.1242/JEB.01860>
- Wayland, M. (2000). *Metals as threats to wildlife*.
- Wyneken, J. (2004). *La Anatomía de las Tortugas Marinas*. U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE Donald L. Evans, Secretary. 182.

12.- APENDICE 1

Tortuga blanca, *Chelonia mydas*. (Linnaeus, 1758)

Distribución: Esta especie se encuentra en todos los mares tropicales del mundo (Buitrago et al. 2015) habita en aguas por encima de los 20°C durante todo el año. En el Golfo y Caribe Mexicano se distribuyen desde Tamaulipas hasta Quintana Roo (**Fig. 4**) (SEMARNAT, 2018b). Las playas de mayor importancia en el Golfo y Caribe de México son: Tamaulipas: playa Rancho Nuevo, Veracruz; playa Lechuguillas y Totonacapan, Campeche; playa Isla Aguada y Chenkan, en Quintana Roo: playa de Holbox, Isla Contoy, Isla Mujeres, Akumal, Isla Cozumel, Chemuyil, Aventuras DIF, Xel- Ha y Xcacel-Xcacelito (CONANP, 2009, 2020).

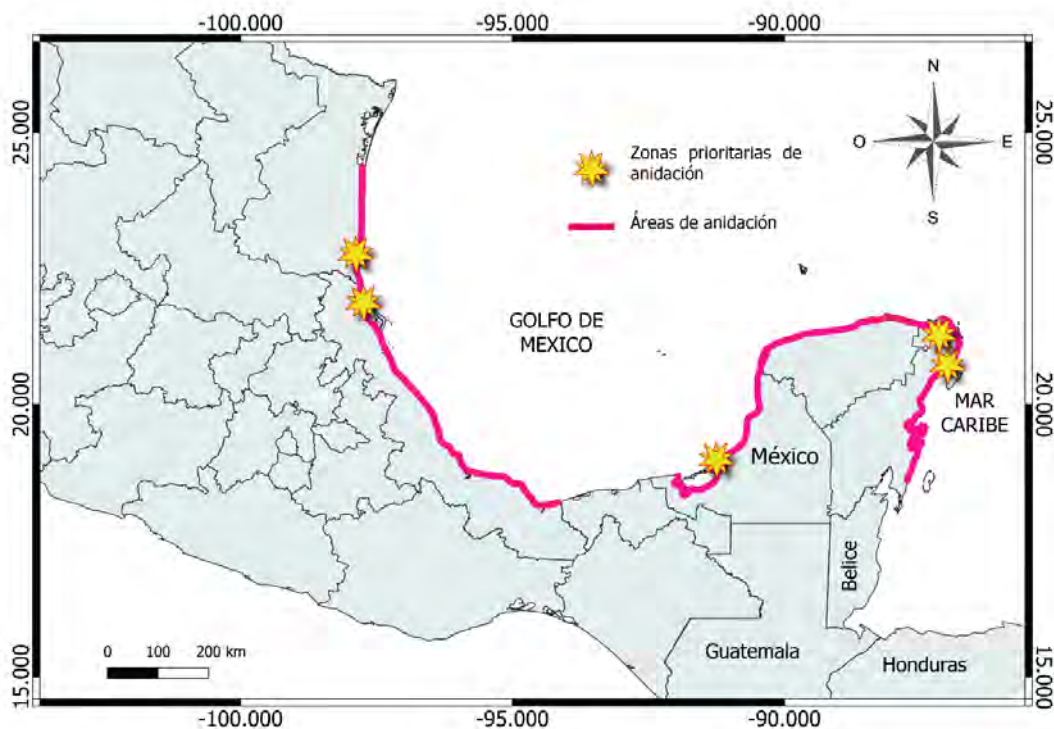


Fig. 4.

Distribución de las zonas de anidación de la tortuga blanca (*Chelonia mydas*) en el Golfo y Mar Caribe de México. Basado de (SEMARNAT 2018b)

Anatomía

La tortuga blanca se caracteriza por su caparazón liso, el color del caparazón va cambiando conforme la edad, en las tortugas recién nacidas el caparazón es negro (**Fig. 5a**), en la fase juvenil tiende a cambiar a color marrón con canela (**Fig. 5c**), y en los adultos tiende a ser color verde oliva o verde-grisáceo, muchas veces llegan a presentar pequeñas manchas amarillas y marrones, el plastrón es blanco en los recién nacidos, cambiando a un color amarillo cremoso conforme van creciendo (Wyneken, 2004). Los rasgos anatómicos de la **cabeza** de *Chelonia mydas* son que tiene la cabeza con perfil redondeado, su ancho es de hasta 13 cm, tiene un par de escamas prefrontales; y tres pares de escamas postorbitales (postoculares) (**Fig. 6**), la mandíbula inferior es aserrada lo que le permite cortar fácilmente pastos marinos y algas, ya que de estos recursos se basa su dieta principal. Las **aletas** son más largas en comparación con las demás especies y llegan a pesar hasta unos 120 kg (70 kg en promedio) (Pritchard & Mortimer, 2000).

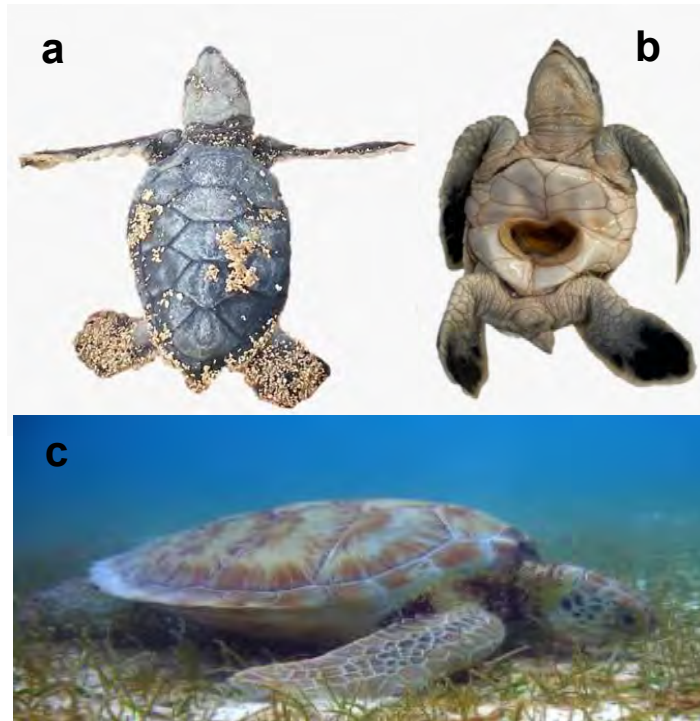


Fig. 5. *Chelonia mydas*. Caparazón negro (a) y plastron blanco (b) de neonatos y caparazon de un juvenil (c). (Foto a y b: Contreras M. b: Herrera R).

Las crías de la tortuga *Chelonia mydas*, se pueden identificar debido a que tienen caracteres distintivos como el color, variación en número y configuración de los escudos del caparazón y el tamaño. Las extremidades anteriores son blancas, las escamas de la cabeza son negras, normalmente tiene cuatro escamas postorbitales, el plastrón es completamente blanco (**Fig. 5b**) y el carapacho (LRC) mide aproximadamente 49 mm (Pritchard & Mortimer, 2000).

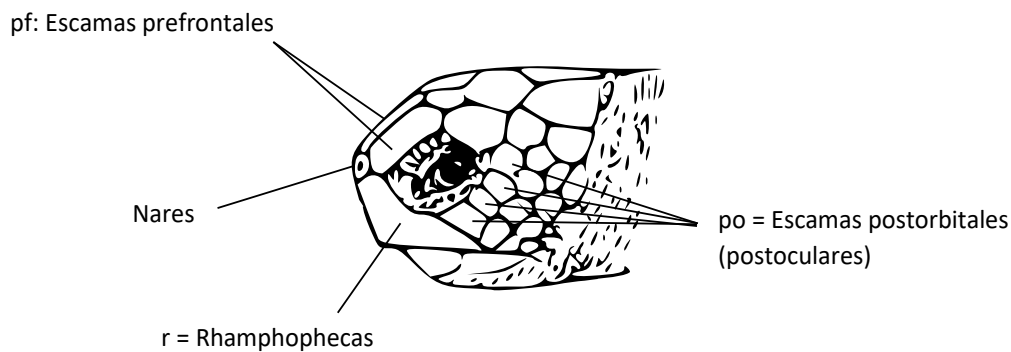


Fig. 6. Rasgos anatómicos de la cabeza de *Chelonia mydas*. Basado de Pritchard & Mortimer (2000).

Alimentación

La alimentación de la tortuga verde varía de acuerdo con su estadio de vida, cuando son crías y juveniles son omnívoras, su dieta consiste mayormente de pequeños invertebrados como moluscos, crustáceos, briozoarios, esponjas, medusas y equinodermos, los adultos son estrictamente herbívoros y se alimenta principalmente de pastos marinos y algas; *Thalassia testidium*, *Gracillaria*, *Rhodimonia*, *Gelidium*, *Grateloupia*, *Gigartina*, *Griffitsia*, *Sargassum*, *Padina*, *Ulva* y *Cladophora* (Fitzgerald, 2004).

Otra singularidad de estos animales es su fidelidad a su playa de nacimiento, ya que las hembras acuden a desovar una y otra vez al mismo sitio, a este fenómeno se le llama **filopatría** (Cuevas, 2017). La temporada de **anidación** de esta especie en el Caribe es de mayo a septiembre, y los meses con mayor frecuencia son junio y julio, llegan a tener de 2 hasta 3 puestas en promedio por temporada con un intervalo de 11 a 15 días y una remigración de 2 a 3 años, el tamaño de nidada es

de 65 a 112 huevos por nido y el periodo de incubación es de 50 a 58 días (Huerta et al., 2006). La temperatura es un factor de suma importancia para el sexo de las tortugas marinas, a mayor temperatura hay mayores probabilidades de que aumente la proporción de hembras y a menores temperaturas la probabilidad de que sean machos es mayor (Mrosovsky & Yntema, 1980).

Tortuga Caguama. *Caretta caretta* (Linnaeus, 1758).

Distribución

Es una tortuga marina pelágica que habita en todos los océanos, principalmente en las zonas tropicales y subtropicales (CIT, 2005). Prefieren los hábitats pelágicos en las primeras etapas de su vida, una vez adultas migran hacia la zona nerítica por el cambio en su alimentación (Lara & Rodriguez, 2014).

En México se distribuyen en Quintana Roo, estado que tiene el mayor número de playas de anidación, Yucatán, Campeche, Veracruz y Tamaulipas (Fig. 9) (Lara & Rodriguez, 2014). Aproximadamente 200 km de las playas de Quintana Roo son zonas de anidación (SEMARNAT, 2018a). Las playas principales son; Xcacel, Xcacelito, Chemuyil, Aventuras Dif y Xel-Ha (CONANP, 2020).



Fig. 9.

Distribución de las zonas de anidación de la tortuga caguama (*Caretta caretta*) en el Golfo y Mar Caribe de México. Basado de (SEMARNAT, 2018a)

Anatomía

Se distingue por ser la especie más grande de la familia Cheloniidae, y también por el gran tamaño de su cabeza, por lo que recibe el nombre “cabezona” (CIT, 2005). Su tamaño y peso varían según la zona donde se desarrollen, sin embargo, puede llegar alcanzar una longitud recta del caparazón de 120 cm y un peso de 200 kg (Marco, 2007). Las **mandíbulas** tienen ramphotecas, las cuales son estructuras en forma de picos, gruesas y robustas, usadas para triturar conchas y caparazones de invertebrados (Wyneken, 2004). Los machos presentan caracteres sexuales secundarios externos hasta la maduración sexual (Marco, 2007). Los machos son

más grandes que las hembras, además de tener una cola más larga y robusta, las uñas de las aletas las tienen más desarrolladas, ya que facilitan la sujeción en el caparazón de la hembra durante la cópula.

En los recién nacidos el caparazón es marrón con matices color gris (Fig. 10a), el **plastrón** es crema a marrón (Fig. 10b), en juveniles y adultos el caparazón es café rojizo (Fig. 10c) (Wyneken, 2004).

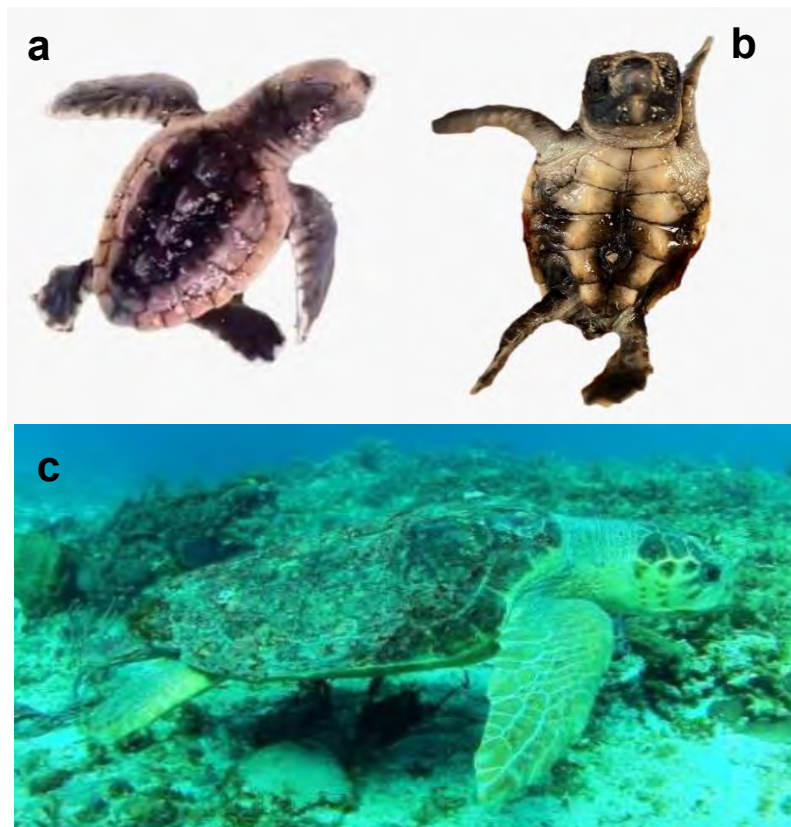


Fig. 10. *Caretta caretta*. Caparazón (a) y plastrón (b) de recién nacido, caparazón de adulto (c). (Fotos a y b: Contreras M. b: Mex P.)

Esta especie también se distingue por mantener en su carapacho grandes comunidades de organismos epibiontes (Marco, 2007) como algas, crustáceos, moluscos, anélidos, entre otro tipo de invertebrados marinos (Lara & Rodriguez, 2014).

Alimentación

En cuanto a su alimentación, esta especie es carnívora durante todo su ciclo de vida, la dieta de esta especie se basa de animales principalmente pelágicos cuando son juveniles y bentónicos cuando son adultos. Las medusas pueden llegar a constituir la mitad de su dieta, plancton en menor cantidad, e invertebrados pequeños como cangrejos. Los juveniles grandes se desplazan a zonas pocas profundas, su alimentación es variada; crustáceos, moluscos y medusas (UICN, 2010). Su pico queratinizado es muy fuerte, lo que le permite destrozarse las conchas y caparazones de moluscos como los de género *Strombus* (SEMARNAT, 2018a).

Los neonatos se alimentan durante periodos prolongados de residuos de vitelo sobrantes del desarrollo embrionario, La temporada de anidación para esta especie en el caribe es de mayo a septiembre, llegan a tener 4 puestas en promedio por temporada con un intervalo de 15 días y una remigración de 2 a 3 años, el tamaño de nidada es de aproximadamente 100 huevos por nido y el periodo de incubación es de 56 días (Huerta et al., 2006).

12.- APENDICE 2

Tabla 5. Valores de p obtenidos con la prueba de tukey pairwise para las concentraciones de metales pesados entre tejidos y partes de huevo de *Chelonia mydas*. Se marca en color rosado aquellos grupos de valores con diferencias significativas.

Cd	Yema	Albúmina	yema y albúmina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.3664	0.05728	0.9991	0.0005105	4.97E-09	3.18E-07
Albúmina	2.973		0.8519	0.4567	0.1819	1.12E-05	0.00057
yema y albúmina	4.257	1.829		0.06985	0.989	0.02342	0.2054
Cáscara	0.673	2.76	4.142		0.0002302	3.42E-10	4.09E-08
Hígado	6.502	3.529	1.052	6.835		0.03569	0.3855
Músculo	11.02	8.048	4.742	12.05	4.519		0.9171
Carapacho	9.428	6.455	3.441	10.21	2.926	1.593	

Ni	Yema	Albúmina	Yema y albúmina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.1154	0.008135	0.999	0.001255	7.44E-11	1.93E-08
Albúmina	3.834		0.7375	0.1322	0.6744	1.60E-06	0.0003451
yema y albúmina	5.267	2.136		0.008571	1	0.01261	0.2456
Cáscara	0.6812	3.746	5.242		0.0006786	1.10E-12	1.66E-09
Hígado	6.116	2.282	0.2729	6.381		0.0004839	0.04564
Músculo	12.64	8.806	5.054	13.91	6.524		0.7359
Carapacho	10.5	6.666	3.307	11.44	4.385	2.14	

Mn	Yema	Albúmina	yema y albúmina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.1272	5.06E-07	0.9996	0.06623	0.0003331	0.0008648
Albúmina	3.772		0.001107	0.1246	1	0.3924	0.5724
yema y albúmina	9.25	6.17		1.60E-07	0.002331	0.1227	0.07189
Cáscara	0.5702	3.785	9.691		0.05813	0.0001081	0.0003356
Hígado	4.173	0.4012	5.843	4.248		0.5711	0.7505
Músculo	6.681	2.91	3.795	7.145	2.508		1
Carapacho	6.277	2.506	4.125	6.678	2.104	0.404	

Cu	Yema	Albúmina	Yema y albúmina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.0017	1.49E-05	0.9546	0.0002857	1.69E-08	3.51E-06
Albúmina	5.983		0.3354	0.004828	0.9981	0.03249	0.5662
Yema y albúmina	7.937	3.052		3.38E-05	0.6075	0.999	0.9918
Cáscara	1.397	5.512	7.612		0.0006612	9.11E-09	4.33E-06
Hígado	6.745	0.7621	2.429	6.392		0.1203	0.8742
Músculo	10.55	4.57	0.6796	10.79	3.808		0.7721
Carapacho	8.502	2.519	0.9949	8.421	1.757	2.051	

Zn	Yema	Albumina	Yema y albúmina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.9845	0	0.1241	1	0.1145	0.04901
Albúmina	1.124		0	0.01184	0.9743	0.4766	0.2739
Yema y albúmina	23.18	22.26		0	0	0	0
Cáscara	3.788	5.085	28.32		0.1526	7.23E-06	1.61E-06
Hígado	0.1186	1.242	23.28	3.651		0.09481	0.03955
Músculo	3.839	2.715	20.04	8.221	3.958		0.9998
Carapacho	4.345	3.221	19.63	8.805	4.463	0.5057	

As	Yema	Albumina	Yema y albúmina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.1457	6.71E-07	0.9999	0.296	0.002631	0.01688
Albúmina	3.682		0.001202	0.1154	0.9998	0.7496	0.9758
Yema y albúmina	9.141	6.135		1.60E-07	0.0004417	0.04323	0.01074
Cáscara	0.4174	3.834	9.69		0.2712	0.0008858	0.008402
Hígado	3.158	0.5242	6.563	3.229		0.5148	0.8758
Músculo	5.789	2.107	4.415	6.267	2.631		0.9958
Carapacho	4.909	1.227	5.133	5.251	1.751	0.8795	

Cr	Yema	Albumina	Yema y albúmina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		3.09E-07	4.93E-09	1	0.01176	3.35E-07	4.48E-06
Albúmina	9.44		0.2426	5.44E-09	0.04846	1	0.99
yema y albúmina	11.02	3.317		2.70E-10	0.0002117	0.2344	0.06772
Cáscara	0.08664	10.99	12.14		0.001782	5.98E-09	1.22E-07
Hígado	5.088	4.351	6.869	5.962		0.05129	0.242
Músculo	9.408	0.03194	3.343	10.95	4.319		0.9916
Carapacho	8.407	1.033	4.16	9.794	3.319	1.001	

Tabla 6. Valores de p obtenidos con la prueba de tukey pairwise para las concentraciones de metales pesados entre tejidos y partes de huevo de *Caretta caretta*. Se marca en color rosado aquellos grupos de valores con diferencias significativas.

Cd	Yema	Albúmina	Yema y albumina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.7167	0.3687	0.9999	0.7843	2.62E-05	0.001768
Albúmina	2.185		1	0.6151	1	0.006422	0.1543
Yema y albumina	2.965	0.2197		0.04722	0.9995	0.000276	0.03721
Cáscara	0.4566	2.413	4.357		0.6823	5.57E-08	2.83E-05
Hígado	2.02	0.2833	0.6075	2.264		0.001594	0.06689
Músculo	7.664	5.361	6.724	9.993	5.987		0.8527
Carapacho	5.941	3.638	4.486	7.634	4.159	1.827	

Ni	Yema	Albúmina	Yema y albumina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.9613	0.3862	0.9999	0.7161	3.94E-06	0.0006835
Albúmina	1.351		0.9761	0.9623	0.9981	0.0001512	0.01594
Yema y albumina	2.923	1.225		0.04985	1	2.28E-05	0.01205
Cáscara	0.4305	1.344	4.326		0.5652	3.54E-09	6.20E-06
Hígado	2.186	0.7623	0.3449	2.521		0.0003891	0.04251
Músculo	8.393	6.969	7.718	11.02	6.583		0.7236
Carapacho	6.348	4.924	5.062	8.22	4.414	2.169	

Mn	Yema	Albúmina	Yema y albumina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.0252	0.0003791	1	0.9921	0.02747	0.09209
Albúmina	4.692		0.9988	0.001737	0.09413	1	0.9926
yema y albumina	6.594	0.698		3.62E-09	0.001947	0.9828	0.7805
Cáscara	0.2121	5.949	11.01		0.9846	0.001141	0.009005
Hígado	0.9903	3.956	5.899	1.123		0.1066	0.2945
Músculo	4.647	0.2986	1.149	6.13	3.879		0.9986
Carapacho	3.969	0.9769	2.03	5.202	3.159	0.7195	

Cu	Yema	Albúmina	Yema y albumina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.1845	0.0001253	0.9972	0.5336	3.43E-05	0.005662
Albúmina	3.515		0.5155	0.1213	0.9852	0.1109	0.8864

yema y albumina	7.045	2.628		6.56E-09	0.05102	0.7351	0.9993
Cáscara	0.818	3.797	10.79		0.5075	2.38E-07	0.0004517
Hígado	2.589	1.116	4.313	2.646		0.007785	0.3541
Músculo	7.558	3.854	2.142	9.45	5.271		0.6801
Carapacho	5.419	1.715	0.637	6.521	3.002	2.269	

Zn	Yema	Albúmina	Yema y albumina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.9982	3.93E-07	0.9996	1	0.9761	0.9882
Albúmina	0.7532		4.82E-06	0.9205	0.9995	0.9999	1
yema y albumina	9.263	8.316		7.32E-12	8.55E-08	2.95E-06	1.73E-06
Cáscara	0.5894	1.579	16.93		0.9946	0.655	0.748
Hígado	0.2009	0.5931	9.833	0.923		0.9871	0.9947
Músculo	1.225	0.4308	8.503	2.325	1.086		1
Carapacho	1.068	0.2742	8.706	2.111	0.9199	0.1661	

As	Yema	Albúmina	Yema y albumina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.04044	5.54E-05	0.9993	0.6324	1.13E-06	0.0003219
Albúmina	4.442		0.8648	0.009272	0.663	0.06422	0.7996
yema y albumina	7.37	1.789		6.88E-10	0.01524	0.1925	0.9994
Cáscara	0.6443	5.188	11.64		0.5547	1.19E-09	3.73E-06
Hígado	2.375	2.307	4.946	2.543		0.0001867	0.03324
Músculo	8.865	4.183	3.485	11.43	6.884		0.6496
Carapacho	6.661	1.98	0.6225	8.413	4.547	2.337	

Cr	Yema	Albúmina	Yema y albumina	Cáscara	Hígado	Músculo	Carapacho
Yema		0.0001202	1.97E-05	1	0.8913	1.96E-05	0.002144
Albúmina	7.061		0.9863	8.13E-07	0.002751	1	0.9187
yema y albumina	7.775	1.098		2.94E-11	0.0008255	0.9085	0.9962
Cáscara	0.282	8.99	12.93		0.7868	2.20E-08	2.33E-05
Hígado	1.697	5.747	6.269	2.013		0.0005375	0.04265
Músculo	7.777	0.3336	1.63	10.34	6.449		0.7778
Carapacho	5.857	1.586	0.8644	7.71	4.412	2.037	

Se marca en color rosado aquellos grupos de valores con diferencias significativas.

Tabla 7.- Valores de p obtenidos con la prueba chi² (mood median) al comparar las concentraciones de *Chelonia mydas* y *Caretta caretta* en tejidos y partes de huevo.

12.- APENDICE 3

Tabla 9. Porcentajes de humedad de los tejidos y fracciones de huevos analizadas en tortugas marinas.

Tejido	% humedad
Yema	60 %
Albúmina	95 %
Yema – albúmina	96 %
Hígado	70 %
Músculo	69.8 %
Carapacho	60.3 %