

BIOINDICADORES:

GUARDIANES DE NUESTRO FUTURO AMBIENTAL

César Alberto González Zuarth
Adriana Vallarino
Juan Carlos Pérez Jiménez
Antonio M. Low Pfeng
(editores)

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental

Primera edición: 2014

Diseño de portada e imagen: Hugo Arquímedes Carrillo

D.R. © El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n
Barrio de María Auxiliadora CP 29290
San Cristóbal de Las Casas, Chiapas
www.ecosur.mx

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)
Periférico sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco,
CP 04530. México, D.F.
www.inecc.gob.mx

ISBN 978-607-8429-05-9 (edición digital)
978-607-8429-04-2 (edición impresa)

Se autoriza la reproducción del contenido de esta obra,
siempre y cuando se cite la fuente

Impreso y hecho en México / *Printed and made in Mexico*

21

Las especies “bandera” como bioindicadores ambientales: las tortugas marinas

Flag species as environmental bioindicators: the sea turtles

Juan Patino-Martínez, Adriana Vallarino y César González Zuarth

Resumen. Todas las especies de tortugas marinas se encuentran en peligro de extinción debido principalmente a la captura accidental, legal y furtiva, la colecta masiva de huevos, la contaminación de sus lugares de forrajeo, la destrucción de sus lugares de anidamiento, la propagación de enfermedades como la fibropapilomatosis, y los efectos del cambio climático global. Las tortugas marinas anidan en playas solitarias y con poca luz pues son muy sensibles a la presencia humana. Pasan la mayor parte de sus vidas realizando grandes migraciones pero poseen respiración pulmonar, por ello son susceptibles a la contaminación tanto acuática como aérea. Son bastante longevas, bioacumulan y biomagnifican contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el alimento, sedimentos y agua, además de ser afectadas por la ingestión de plásticos. Esto las convierte en potenciales bioindicadoras de la contaminación por metales pesados, plaguicidas e hidrocarburos. El sexo de las crías es determinado por la temperatura ambiental, lo que las hace vulnerables, y por lo tanto candidatas a ser centinelas del cambio climático. Esta sensibilidad a distintos estresores ambientales, permite evaluar las condiciones del ambiente de manera más integral y facilita la toma de medidas oportunas para conservar los ecosistemas marinos. Las tortugas, por su carisma, pueden ser consideradas como especies “bandera” y de ese modo, no solamente actuar como bioindicadoras, sino también ayudarnos a llamar la atención de la sociedad sobre la urgencia de proteger el medio ambiente y facilitar la obtención de recursos para lograrlo.

Palabras clave: especies en peligro, contaminación, cambio climático, monitoreo ambiental

Abstract. Every single species of marine turtle are in danger of extinction mainly due to the rate of accidental, legal and furtive capture of adults and eggs collecting,

pollution of their feeding grounds, destruction of their breeding areas, the spread of the fibropapillomatosis disease, and the effects of climate change. Oviposition occurs primarily on poorly lit and undisturbed beaches as they are very sensitive to human presence. They spend most of their lives carrying out long migrations and have pulmonary respiration, so they are susceptible to both air and water pollution. Sea turtles are long lived so they bioaccumulate and biomagnify organic and inorganic contaminants from food, sediment and water, as well as being affected by the ingestion of plastics. This makes them potential bioindicators of heavy metals, pesticides and hydrocarbons pollution. The sex of the offspring is determined by the ambient temperature, which makes them vulnerable, and therefore candidates to be sentinels of climate change. This sensitivity to different environmental stressors, allows the assessment of the environmental conditions in a more integral manner, and facilitates taking appropriate measures to protect the marine ecosystems. Because of their charm, turtles are considered flagship species. Thus, not only perform as bioindicators but draw attention from society about the urgency of protecting the environment and facilitate accessing to funds for this end as well.

Keywords: endangered species, pollution, climate change, environmental monitoring

El uso de bioindicadores ha venido cobrando importancia como método para monitorear la salud ecológica del medio ambiente debido a que reaccionan a dosis muy bajas de cualquier estresor ambiental, son más sencillos de implementar, más económicos y sus resultados son ecológicamente más relevantes que los tradicionales análisis químicos como la determinación de la dosis media letal. A pesar de esto, no siempre es fácil obtener fondos para su implementación. Sin embargo, el uso de especies carismáticas como bioindicadoras, puede contribuir a que la gente tome conciencia de la importancia de los proyectos para evaluar la salud del medio ambiente y con ello obligar a los responsables de tomar las decisiones sobre planes de conservación a que tomen cartas sobre el asunto. A lo largo de este capítulo exploramos las ventajas de las tortugas marinas como centinelas de los océanos.

BIODIVERSIDAD DE TORTUGAS MARINAS

El grupo de las tortugas marinas está conformado por siete especies que se distribuyen a lo largo de prácticamente todos los océanos y mares del mundo, estas son: la tortuga lora (*Lepidochelys kempii*), la tortuga golfina (*Lepi-*

dochelys olivácea), la tortuga de carey (*Eretmochelys imbricata*), la tortuga blanca o verde (*Chelonia mydas*), la tortuga caguama (*Caretta caretta*), la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) y la kikila australiana (*Natator depressus*). A causa de las numerosas amenazas que enfrentan hoy en día, seis de las siete están incluidas en el libro rojo de especies amenazadas de la IUCN, con dos de ellas en peligro crítico: la tortuga lora (*Lepidochelys skempii*) y la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) (IUCN 2014).

México es el país con el mayor número de especies de tortugas marinas que anidan o utilizan sus litorales con el fin de alimentarse y reproducirse. Seis de las siete especies que existen en el mundo anidan en costas mexicanas (7 de 8 si se acepta como una especie distinta a la tortuga prieta *Chelonia agassizii*) (PROFEPA 2009). En el Golfo de México la tortuga lora anida principalmente en las playas de Tamaulipas y de manera aislada en la costa ubicada entre Veracruz y Campeche; dos de las poblaciones de tortuga carey más grandes del Atlántico anidan en Campeche y Yucatán y de manera dispersa en Veracruz; la tortuga verde anida desde Tamaulipas hasta Yucatán. En las costas del Caribe mexicano anida la tortuga caguama y la verde. En las playas del Pacífico mexicano se presentan algunas de las poblaciones más grandes del mundo de la tortuga golfinia anida desde Baja California hasta Chiapas; la tortuga laúd anida principalmente en la costa ubicada entre Oaxaca y Colima aunque pequeños grupos anidan desde Baja California hasta Chiapas; la tortuga verde anida desde Sinaloa hasta Chiapas; la tortuga carey anida en Nayarit, Jalisco, Oaxaca y Chiapas; la tortuga lora anida en las playas de Oaxaca. y la caguama que anidan en las costas del Golfo de México, Mar Caribe y el Pacífico (Márquez 2000; CONANP 2009). Todas las especies de tortugas marinas que habitan en México se encuentran en peligro de extinción en acuerdo a la normativa nacional (SEMARNAT, 2010). Los rigurosos programas de protección y lucha contra la captura ilegal que México ha implementado, le ha valido que la IUCN Species Survival Commission (SSC), mencione que a nivel mundial, sólo México mantiene tendencias positivas en la recuperación de las poblaciones de tortuga carey (Guzmán-Hernández 2005). Pese a ello, las playas de anidación del Pacífico americano, incluyendo a México (Sarti *et al.* 2007; Spotila *et al.* 1996) y las playas del océano Indico (Chan y Liew 1996) han sufrido graves declives, alrededor del 90%, en el número de hembras anidantes de tortuga laúd, durante las últimas décadas.

PELIGROS QUE AMENAZAN A LAS TORTUGAS MARINAS

Captura

Las tortugas marinas han sido explotadas por los humanos históricamente y con particular intensidad durante el siglo pasado. Se han usado como alimento, como afrodisíacos o se han comercializado masivamente sus caparazones (Spotila 2004). Además, las tortugas han sufrido el incremento en la demanda de pescado para consumo humano, que ha causado la muerte accidental de cientos de miles ejemplares en pesquerías comerciales (Spotila 2004). Este tipo de captura por parte de las embarcaciones pesqueras, ha sido identificada como la principal causa de la disminución de las poblaciones de varias especies de la megafauna marina (elasmobranquios, mamíferos, aves y tortugas marinas) (Ferraroli *et al.* 2004; Wallace *et al.* 2010).

Durante el periodo de 1990 al 2008, más de 85000 tortugas fueron capturadas de manera incidental, aunque se considera que es una cifra mucho menor a la realidad debido a que en general los estudios no reflejan el impacto de la pesca a pequeña escala (Wallace *et al.* 2010). El arte de pesca con el cual se captura de manera incidental a un mayor número de tortugas es el palangre (más del 50%), seguido de las redes agalleras y por último las redes de arrastre (Wallace *et al.* 2010). A pesar del riesgo de extinción al que se enfrentan, en 42 países del mundo se permite aun de manera legal la captura directa de juveniles y adultos. Estos países capturan más de 42000 tortugas al año, siendo Papua Nueva Guinea, Australia y Nicaragua los países que capturan casi el 75% del total y la tortuga blanca, con más del 80%, la especie más capturada (Humber *et al.* 2014). Se estima que desde 1980, más de dos millones de ejemplares han sido pescados legalmente (Humber *et al.* 2014). Esta captura legal es una clara amenaza para algunas poblaciones, sin embargo la captura ilegal muy probablemente tenga un mayor impacto global. A pesar de los esfuerzos de muchos países por controlar tanto la captura como la colecta ilegal de sus huevos, estas actividades continúan siendo unas de las principales causas del declive de las poblaciones de tortugas marinas (Lam *et al.* 2011).

Cambio climático global (CCG)

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC 2013), presenta proyecciones modeladas del aumento de temperaturas del aire y los océanos, del nivel del mar y de la intensidad y frecuencia de las tormentas tropica-

les para los próximos cien años. Todos estos acelerados cambios ambientales, producto de las actividades humanas, afectarán previsiblemente la fenología y el éxito reproductivo de las tortugas marinas (Arendt *et al.* 2013; Both *et al.* 2009). Por ejemplo, los niveles de humedad de la arena donde se incuban los huevos pueden verse aumentados en zonas tropicales debido al incremento de la frecuencia e intensidad de los huracanes y tormentas (van Houtan y Bass 2007; Fuentes y Abbs 2010), con consecuencias negativas para los embriones durante la incubación (Patino-Martinez *et al.* 2014). Los aumentos esperados del nivel medio del mar ocasionarán que desaparezcan una gran parte de los sitios de anidación (Fuentes *et al.* 2011). La erosión severa de playas se detectó durante el siglo XX pero la tendencia puede exacerbarse en el siglo XXI bajo los previsibles escenarios de aumento del nivel del mar (IPCC 2013). En tortugas marinas la temperatura ambiental afecta significativamente a muchos parámetros de su historia de vida. Durante la etapa embrionaria, por ejemplo, la temperatura de incubación influye sobre el éxito de eclosión y la determinación del sexo. Por lo tanto, el CCG puede provocar la producción de crías de un sólo sexo y disminuir el éxito de eclosión, dichas variables pueden considerarse como biomarcadores del aumento global de la temperatura. El sesgo hacia alguno de los sexos es común en organismos con determinación sexual dependiente de la temperatura (Mrosovsky *et al.* 1984). Sin embargo, el calentamiento global puede convertirse en una seria amenaza al ocasionar un fuerte sesgo de la proporción de sexos hacia las hembras (Patino-Martinez *et al.* 2012), que podría, en último término, causar extinciones poblacionales si las especies no pueden adaptarse a esta alteración (Wright *et al.* 2012). Las alteraciones climáticas globales pueden además de modificar las condiciones óptimas de incubación de los nidos, alterar factores bióticos como el crecimiento desproporcionado de hongos u otros microorganismos en el entorno de los huevos (Phillott y Parmenter 2001).

Contaminación

El aumento exponencial de la población humana en las últimas décadas, ha traído consigo un aumento en la producción de desechos, que en muchos casos terminan en los ecosistemas marinos. Debido a las grandes distancias que recorren y a su longevidad, las tortugas marinas están expuestas a una gran cantidad de contaminantes (Jakimska *et al.* 2011b), tales como: 1) *Hidrocarburos*. Los vertidos procedentes de la explotación de los hidrocarburos en el mar contaminan sus sitios de forrajeo y destruyen sus lugares de

anidación. El petróleo al impregnarse en la piel y caparazón de las tortugas les afecta la respiración, daña la función de la glándula de sal y en general es muy difícil la recuperación de tortugas afectadas por contacto directo con hidrocarburos (Mignucci-Giannoni 1999). Cuando los derrames alcanzan las playas donde anidan, causan gran mortalidad de embriones y crías.

2) *Plaguicidas*. Se ha registrado la presencia de plaguicidas en varias especies de tortugas marinas (McKenzie *et al.* 1999; Orós *et al.* 2009), siendo las especies omnívoras las más vulnerables. Existe evidencia que sugiere que plaguicidas como los organoclorados producen anemia, daños hepáticos e impactan sobre el sistema inmune (Keller *et al.* 2004). Los plaguicidas son transferidos vía materna a los huevos, disminuyendo el vigor de las crías y por consecuencia, su capacidad de dispersión en alta mar y escape de los depredadores (van de Merwe *et al.* 2010).

3) *Metales pesados*. Se ha detectado la presencia de estos metales (producto de las aguas negras y desechos industriales) en tejido adiposo, hígado, músculo, páncreas y riñón de las tortugas (Orós *et al.* 2009; Jakimska *et al.* 2011b). Sin embargo, las concentraciones varían tanto entre especies como entre poblaciones de acuerdo con la dieta y el nivel trófico (Godley *et al.* 1998). La presencia de estos contaminantes pueden contribuir a serios problemas de salud, inmunosupresión y disrupción endocrina. Las concentraciones de metales pesados en los huevos no cambian en sucesivas anidaciones de la misma hembra. En la tortuga laúd, el mercurio y el selenio afectan el éxito de eclosión y emergencia de las crías (Perrault *et al.* 2011) y el sistema inmunológico de los adultos (Day *et al.* 2007).

4) *Basura sólida*. Entre la basura hallada en el medio marino, destacan los plásticos por su alta persistencia (Mueller *et al.* 2012) y porque las tortugas los ingieren al confundirlos con uno de sus principales alimentos, las medusas (Schuyler *et al.* 2012). Su ingestión aumenta la mortalidad de las tortugas a consecuencia del bloqueo o perforación del tracto intestinal o por sofocación (Derraik 2002; Lazar y Gračan 2011).

5) *Aguas negras*. Las aguas residuales de origen doméstico contienen una gran variedad de compuestos como anticonceptivos hormonales y antibióticos, que pueden causar un daño severo a la fauna acuática, incluidas las tortugas marinas.

6) *Contaminación lumínica*. Las tortugas marinas están influidas por los ciclos de luz-oscuridad en todas sus fases de vida, desde la emergencia de las crías en playas hasta las migraciones y la anidación. La iluminación artificial del litoral y especialmente de las playas de anidación desorienta a los neonatos aumentando enormemente las tasas de mortalidad (Tuxbury y Salmon 2005; Berry *et al.* 2013). Además pueden causar alteraciones en el comportamiento

de anidación de las hembras adultas, con la consecuente disminución del éxito reproductivo (Mazor *et al.* 2013; Pérez-García *et al.* 2013).

Depredación. Si bien la depredación de los huevos no es insignificante (Welicky *et al.* 2012), y en algunos casos es relevante el daño causado por hormigas, cangrejos y animales domésticos (Diffie *et al.* 2010), el periodo de mayor vulnerabilidad de las tortugas va desde que eclosionan hasta que alcanzan el mar abierto (Tomillo *et al.* 2010). Son atacadas por algunos insectos que se alimentan de las partes blandas de su cuerpo, como ojos, restos del vitelo y aletas, tras la eclosión de los nidos. Durante el recorrido del nido al mar son depredadas por cangrejos, aves marinas, zorros, etc. Las crías están amenazadas seriamente por la depredación causada por animales domésticos. La mortalidad de las crías debida a los asentamientos humanos, muy probablemente se vea aumentada en el futuro (Tomillo *et al.* 2010). Cuando por fin alcanzan el mar, muchas son devoradas por una gran variedad de especies de peces. En ejemplares adultos disminuye enormemente la tasa de depredación natural, que se estima es solo ocasional en interacciones con orcas o tiburones en el mar y con caimanes en playas (Elwen y Leeney 2011; Nifong *et al.* 2011).

LAS TORTUGAS MARINAS COMO BIOINDICADORES Y CENTINELAS DE LA CONTAMINACIÓN

Las tortugas marinas han existido en el planeta desde hace millones de años (Hirayama 1998; Reisz y Head 2008), demostrando su potencial adaptativo frente a cambios ambientales importantes que han causado extinciones de otros muchos grupos (Hawkes *et al.* 2010). Sin embargo, en la actualidad las alteraciones ambientales, producto de las actividades humanas están ocurriendo de una forma muy acelerada y es evidente que como consecuencia, está ocurriendo una fuerte disminución de sus tamaños poblacionales. Esta disminución de las poblaciones de tortugas marinas está por tanto indicando niveles de perturbación muy elevados en los ecosistemas donde habitan. El estado de las poblaciones de tortugas marinas puede ser, de modo general, un bioindicador importante de la “salud” de los ecosistemas marinos y costeros. Varias razones les avalan como candidatas a ser especies centinela. Son vertebrados marinos de larga vida que bioacumulan contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el alimento, sedimentos y en el agua (Jakimska *et al.* 2011a, 2011b), con respiración pulmonar que les obliga a vivir en la interfase entre agua y aire, por lo que son afectadas por las perturbaciones ambientales no solo del mundo marino (alimento, agua) sino también de las sustancias tó-

xicas volátiles. La gran fidelidad a sus hábitats costeros y pelágicos de alimentación y a sus playas de anidación, les convierte en excelentes representantes del estado de contaminación y alteración de sus ecosistemas locales.

La rápida expansión de las zonas costeras con población humana implica que hábitats importantes de alimentación, crecimiento o reproducción de animales marinos se están contaminando con los desechos de las zonas urbanizadas. Aunque la contaminación en el mar se dispersa en amplias zonas, se sugiere a los vertebrados marinos de gran tamaño y longevidad como los potenciales centinelas de la cantidad de contaminación (Komoroske *et al.* 2011).

Las tortugas marinas son muy sensibles a la contaminación por lo cual pueden advertirnos de disturbios ambientales causados por varios contaminantes: hidrocarburos (Campagna *et al.* 2011), plaguicidas, PCBs y PAHs (Camacho *et al.* 2013), plásticos (Schuyler *et al.* 2014). Por medio de muestras de sangre es posible obtener información sobre una posible exposición a los metales pesados. Mediante la comparación de concentraciones de metales pesados entre órganos y tejidos de animales varados, se pueden determinar exposiciones crónicas u ocasionales a los elementos estudiados (Jerez *et al.* 2010).

Diversos estudios han encontrado que las tortugas sufren de un estrés crónico, un deterioro del sistema inmune, una mayor susceptibilidad a las enfermedades, etc. como consecuencia de una exposición a los contaminantes (López-Castro *et al.* 2010; Ley-Quiñónez *et al.* 2013). Por ejemplo, una enfermedad que ha causado estragos en las poblaciones de tortugas marinas son los tumores de fibropapiloma que se han convertido en la mayor amenaza para la tortuga blanca (Gamache y Horrocks 1991) y amenaza a otras especies. Dado que se ha encontrado correlación entre esta enfermedad y áreas altamente contaminadas, ésta puede indicar la presencia de contaminantes en zonas determinadas, por ejemplo, a través del estudio de tortugas juveniles que muestran un alto grado de fidelidad a los hábitats costeros (Aguirre y Lutz 2004).

Las aguas negras provenientes de los centros urbanos contienen cantidades elevadas de bacterias que son resistentes a los antibióticos. De acuerdo con ello, se ha detectado en los huevos de la tortuga blanca, la presencia de bacterias resistentes a los antibióticos (Al-Bahry *et al.* 2009) mientras que ese mismo tipo de bacterias ha sido detectado en adultos de la tortuga caguama (Foti *et al.* 2009). Además, al ser especies ovíparas, tienden a eliminar parte de su carga de contaminantes transfiriéndolos a los huevos, por lo que su presencia en éstos, puede aportar evidencia de la exposición a ciertos contaminantes (Sakai *et al.* 1995).

MONITOREO DEL MEDIO AMBIENTE USANDO DATOS DE LAS TORTUGAS MARINAS

La directiva marco para la estrategia marina (MSFD sigla en inglés) establece un marco de acción para las políticas del medioambiente marino que están siendo implementadas con el objetivo de conocer el estado medioambiental para el año 2020. Se proponen once indicadores cualitativos (contaminantes y sus efectos) que permitan identificar los vacíos de datos de grandes vertebrados marinos como las tortugas, cetáceos o grandes peces pelágicos. Se ha propuesto que los grandes vertebrados marinos son especialmente útiles para conocer los cambios de los ecosistemas pelágicos en el mediano y largo plazo. Se reconocen como biomarcadores con un potencial real de determinar el estatus ecológico y la detección de efectos biológicos indeseables (Fossi *et al.* 2012).

Se ha debatido mucho respecto a si las ventajas de la sensibilidad ante los disturbios ambientales mostrada por las especies bioindicadoras, sobrepasan el costo de sacrificar algunos individuos durante los monitoreos ambientales, sobre todo cuando se trata de especies en peligro de extinción como las tortugas marinas (Fossi 1994). Sin embargo, dichos costos pueden evitarse mediante el uso de técnicas no invasivas, muchas de las cuales han sido exitosas en el estudio de las tortugas marinas (Tabla 1) sobre todo porque la toma de muestras de hembras adultas, huevos y recién eclosionados son fáciles de obtener durante la anidación en las playas de reproducción. Por otra parte, el estudio de la genética de poblaciones, la ecología espacial, el análisis de isótopos estables a nivel trófico y la demografía (Bowen y Karl 2007; Godley *et al.* 1998; Godley *et al.* 2010; Hays *et al.*, 2004; Hays 2005; Hays *et al.* 2010a, 2010b), no solamente permiten conocer la viabilidad de las poblaciones de tortugas marinas sino que además sus alteraciones pueden advertir de peligros ambientales. Existen también otras técnicas con potencial para ser usadas como biomarcadores. Entre ellas se encuentra el ensayo cometa, el cual es una prueba ampliamente utilizada para detectar el daño *in vitro* o *in vivo* causado al ADN por agentes genotóxicos en células individuales debido a que es un método bastante sensible, sencillo de realizar y de bajo costo (Dhawan *et al.* 2009). Sin embargo, hasta la fecha, solo se ha hecho un estudio en tortugas marinas (Caliani *et al.* 2014).

Tabla 1. Métodos no invasivos utilizados en el estudio de las tortugas marinas

Método	Referencia
Es posible obtener muestras de hembras adultas, huevos y crías mediante el monitoreo nocturno de playas e identificación de nidos durante la época de anidación	
Los desplazamientos, las zonas de alimentación y las migraciones reproductivas pueden identificarse mediante seguimiento satelital o mediante técnicas de marca recaptura bien en playas o mediante embarcaciones en las zonas de paso o alimentación.	Schofield <i>et al.</i> 2013
Las estimas de tamaño poblacional pueden calcularse basándose en los estudios de las hembras reproductoras que indican fluctuaciones poblacionales, reclutamiento y mortalidad.	Patino-Martinez <i>et al.</i> 2008
Se pueden tomar muestras de carapachos en lugar de tejidos internos.	Komoroske <i>et al.</i> 2011
Mediante muestras de sangre es posible, por ejemplo detectar la presencia de metales pesados y compuestos perfluorados .	Ley Quiñonez <i>et al.</i> 2011; Guerranti <i>et al.</i> 2013
Los huevos y embriones muertos pueden ser de utilidad en diferentes estudios y en algunos casos igual de fiables que las muestras de juveniles y adultos.	Páez Osuna <i>et al.</i> 2010
El análisis de los tejidos de tortugas recién muertas es útil para diagnosticar la exposición crónica a contaminantes.	da Silva <i>et al.</i> 2014
Las muestras del fluido del oviducto en búsqueda de bacterias resistentes a los antibióticos es un método valioso de evaluar la exposición de las tortugas a efluentes contaminados.	Al-Bahry <i>et al.</i> 2011
El cultivo de células in vitro, como las de hígado y pulmón para exponerlas a contaminantes, tiene potencial en el monitoreo y evaluación de la contaminación.	Wang <i>et al.</i> 2013
Mediante biomarcadores de estrés oxidativo como la superóxido dismutasa (SOD) y la glutatión-S-transferasa (Gst) y de estrés oxidativo o de disrupción endócrina como la vitelogenina, en sangre, podemos detectar la exposición de las tortugas a contaminantes.	Smelker <i>et al.</i> 2014; Labrada Martagón <i>et al.</i> 2011

CONCLUSIONES

Las ventajas de la utilización de las tortugas de mar como especies centinela son claras: las tortugas marinas son especialmente vulnerables a la degradación antropogénica de salud ambiental (contaminantes, biotoxinas, agentes infecciosos, etc.), los juveniles muestran gran fidelidad a los hábitats de las zonas costeras y son bastante longevas (Aguirre y Lutz 2004).

Las tortugas marinas son un grupo con mucho potencial de ser indicador de la salud. En particular, la evolución de la enfermedad fibropapilomatosis (FP), es considerada un indicador de la salud de las tortugas marinas. Actualmente en lugares como el río Indo, la bahía Kaneohe y Hawaii, se llevan a cabo exitosos programas de monitoreo mediante la evaluación de la propagación, patogénesis, y efectos de la FP. Sin embargo, aunque hay pruebas de la implicación viral en FP, la identidad del factor causal es aún por determinar, lo que es realmente necesario para realizar diagnósticos correctos durante las evaluaciones (Aguirre y Lutz 2004).

La aparición en el mercado de nuevas tecnologías de seguimiento como son los dispositivos de almacenamiento de información con baterías de larga duración y bajo consumo de energía entre los que se encuentran los geolocalizadores, han mejorado considerablemente nuestro conocimiento de las actividades no reproductivas de las tortugas marinas. Ha sido posible, por ejemplo, utilizar la telemetría por satélite para cuantificar mortalidad de las tortugas marinas a consecuencia de la captura incidental, identificar las áreas de reproducción con la ayuda de se determinaron utilizando dispositivos GPS y transmisores ARGOS, mediante los geolocalizadores es posible también conocer los sitios de anidación de las tortugas, sus trayectorias de migración y el grado de filopatría que presentan. Sin embargo, resta mucho por hacer. Por ejemplo, desarrollar dispositivos que detecten con mayor eficacia la mortalidad de las tortugas y las variables asociadas al éxito reproductivo (p. ej. número de huevos que ponen las hembras por evento) permitiría conocer con mayor precisión el daño causado por contaminantes sobre la adecuación de las tortugas (Crossin *et al.* 2014).

Es probable que el mayor obstáculo que ha impedido el uso generalizados de las tortugas marinas como bioindicadores ha sido la falta de un cuerpo teórico que haga más sólidos los resultados encontrados. Ello es debido a la diferencia de intereses entre los expertos en la conservación de las especies, interesados en las especies raras y amenazadas, y los ecólogos que enfocan más su atención en las especies abundantes, debido a que una especie amenazada

o en peligro de extinción probablemente tiene una influencia ecológica menos significativa (Duelli y Obrist 2003). Así que es necesario que los investigadores de ciencia básica interactúen de manera más estrecha con los encargados de conservar a las tortugas marinas y conozcan con mayor detalle la problemática que ello implica. De esta manera se podrá contar con modelos más robustos y con mayor poder predictivo.

Es innegable que las tortugas poseen un carisma que atrae la atención de la gente, no por nada han sido consideradas, desde tiempos antiguos, como símbolos de longevidad y sabiduría, ocasionando con ello que la obtención de fondos para programas encaminados a protegerlas favorecerá, de manera irremediable, la protección de otras especies. Ello, junto a su amplia distribución a nivel global, con toda la información que se cuenta de ellas como resultado de décadas de investigación acerca de su ecología y biología, la existencia de grupos consolidados de monitoreo, estudio y conservación en las principales poblaciones a nivel mundial, todo dentro del marco de la cooperación internacional, hace a las tortugas marinas buenos bioindicadores de los niveles de contaminación y alteración de los ecosistemas costeros y pelágicos.

LITERATURA CITADA

- Aguirre, A. A. y P. L. Lutz. 2004. Marine turtles as sentinels of ecosystem health: is fibropapillomatosis an indicator? *EcoHealth* **1**: 275-283.
- Arendt, M.D., J. A. Schwenter, B. E. Witherington, A. B. Meylan y V. S. Saba. 2013. Historical versus contemporary climate forcing on the annual nesting variability of loggerhead sea turtles in the Northwest Atlantic Ocean. *PLoS One* **8**: e81097.
- Al-Bahry, Saif, I. Mahmoud, A. Elshafie, A. Al-Harthy, S. Al-Ghafri, I. Al-Amri y A. Alkindi. 2009. Bacterial flora and antibiotic resistance from eggs of green turtles *Chelonia mydas*: An indication of polluted effluents. *Marine pollution bulletin* **58**: 720-725.
- Al-Bahry, S. N., I. Y. Mahmoud, M. Al-Zadjali, A. Elshafie, A. Al-Harthy y W. Al-Alawi. 2011. Antibiotic resistant bacteria as bio-indicator of polluted effluent in the green turtles, *Chelonia mydas* in Oman. *Marine Environmental Research* **71**: 139-144.
- Berry, M., D. T. Booth y C. J. Limpus. 2013. Artificial lighting and disrupted sea-finding behaviour in hatchling loggerhead turtles (*Caretta caretta*) on the Woongarra coast, south-east Queensland, Australia. *Australian Journal of Zoology* **61**: 137-145.

- Both, C., M. van Asch, R. G. Bijlsma, A. B. van den Burg y M. E. Visser. 2009. Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels: constraints or adaptations? *Journal of Animal Ecology* **78**: 73-83.
- Bowen, B.W. y S. A. Karl. 2007. Population genetics and phylogeography of sea turtles. *Molecular Ecology* **16**: 4886-4907.
- Caliani, I., T. Campani, M. Giannetti, L. Marsili, S. Casini y M. C. Fossi. 2014. First application of comet assay in blood cells of Mediterranean loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*). *Marine Environmental Research* **96**: 68-72.
- Camacho, M., O.P. Luzardo, L.D. Boada, L.F. López Jurado, M. Medina, M. Zumbado y J. Orós. 2011. Potential adverse health effects of persistent organic pollutants on sea turtles: evidences from a cross-sectional study on Cape Verde loggerhead sea turtles. *Science of the Total Environment* **458**: 283-289.
- Campagna, C., F. T. Short, B. A. Polidoro, R. McManus, B. B. Collette, N. J. Pilcher, Y. Sadovy de Mitcheson, S. N. Stuart y K. E. Carpenter. 2011. Gulf of Mexico oil blowout increases risks to globally threatened species. *BioScience* **61**: 393-397.
- Chan, E.-H. y H.-C. Liew. 1996. Decline of the leatherback population in Terengganu, Malaysia, 1956-1995. *Chelonian Conservation and Biology* **2**: 196-203.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). 2009. Centros para la conservación de las tortugas marinas operados por la CONANP. <http://procer.conanp.gob.mx/tortugas/sitio/Centros.php>
- Crossin, G. T., S. J. Cooke, J. A. Goldbogen y R. A. Phillips. 2014. Tracking fitness in marine vertebrates: current knowledge and opportunities for future research. *Marine Ecology Progress Series* **496**: 1-17.
- da Silva, C. C., A. S. Varela Jr, I. F. Barcarolli y A. Bianchini. 2014. Concentrations and distributions of metals in tissues of stranded green sea turtles (*Chelonia mydas*) from the southern Atlantic coast of Brazil. *Science of the Total Environment* **466**: 109-118.
- Day R. D., A. L. Segars, M. D. Arendt, A. M. Lee y M. M. Peden-Adams. 2007. Relationship of blood mercury levels to health parameters in the loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*). *Environmental Health Perspectives* **115**: 1421-1428.
- Derraik, J. G. B. 2002. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* **44**: 842-852.
- Dhawan, A., M. Bajpayee y D. Parmar. 2009. Comet assay: a reliable tool for the assessment of DNA damage in different models. *Cell Biology and Toxicology* **25**: 5-32.
- Diffie, S., J. Miller y K. Murray. 2010. Laboratory observations of red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) predation on reptilian and avian eggs. *Journal of Herpetology* **44**: 294-296.

- D.O.F. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación, 30 Diciembre.
- Duelli, P. y M. K. Obrist. 2003. Biodiversity indicators: the choice of values and measures. *Agriculture, ecosystems & environment* **98**: 87-98.
- Elwen, S. H. y R. H. Leeney. 2011. Interactions between leatherback turtles and killer whales in Namibian waters, including possible predation. *South African Journal of Wildlife Research* **41**: 205-209.
- Ferraroli, S., J. Y. Georges, P. Gaspar y Y. Le Maho. 2004. Endangered species - Where leatherback turtles meet fisheries. *Nature* **429**: 521-522.
- Fossi, M. C. 1994. Nondestructive biomarkers in ecotoxicology. *Environmental Health Perspectives* **102** (Suppl 12): 49-54.
- Fossi, M. C., S. Casini, I. Caliani, C. Panti, L. Marsili, A. Viarengo, R. Giangreco, G. N. di Sciara, F. Serena, A. Ouerghi, M. H. Depledge. 2012. The role of large marine vertebrates in the assessment of the quality of pelagic marine ecosystems. *Marine Environmental Research* **77**: 156-158.
- Foti, M., C. Giacopello, T. Bottari, V. Fisichella, D. Rinaldo y C. Mammì. 2009. Antibiotic resistance of gram negatives isolates from loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in the central Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin* **58**: 1363-1366.
- Fuentes, M. M. P. B. y D. Abbs. 2010. Effects of projected changes in tropical cyclone frequency on sea turtles. *Marine Ecology-Progress Series* **412**: 283-292.
- Fuentes, M. M. P. B., C. J. Limpus y M. Hamann. 2011. Vulnerability of sea turtle nesting grounds to climate change. *Global Change Biology* **17**: 140-153.
- Gamache, N. y J. Horrocks. 1991. Fibropapilloma disease in green turtles, *Chelonia mydas*, around Barbados, West Indies. Páginas 158-160 en M. Salmon y J. Wyneken, editores. *Proceedings of the Eleventh Annual Workshop on Sea Turtle Biology and Conservation*.
- Godley, B. J., D. R. Thompson, S. Waldron y R. W. Furness. 1998. The trophic status of marine turtles as determined by stable isotope analysis. *Marine Ecology Progress Series* **166**: 277-284.
- Guerranti, C., S. Ancora, N. Bianchi, G. Perra, E. Leonida Fanello, S. Corsolini, M. C. Fossi y S. Ettore Focardi. 2013. Perfluorinated compounds in blood of *Caretta caretta* from the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin* **73**: 98-101.
- Guzmán-Hernández, V. 2005. Informe final del programa de investigación y protección de tortugas marinas en Isla del Carmen, Campeche, México. Tempora-

- da 2000. Documento. Técnico del Centro Regional de Investigación Pesquera de Ciudad del Carmen. N° 10. SEMARNAP/INP/CRIP/PEP UPMP Desarrollo Ecológico Ciudad del Carmen AC. 19.
- Hays, G. C., 2005. Sea turtles: A complete guide to their biology, behavior, and conservation. *Nature* **433**: 109-109.
- Hays, G. C., J. D. R., Houghton y A. E. Myers. 2004. Endangered species - Pan-Atlantic leatherback turtle movements. *Nature* **429**: 522-522.
- Hays, G. C., S. Fossette, K. A. Katselidis, G. Schofield y M. B. Gravenor. 2010a. Breeding Periodicity for Male Sea Turtles, Operational Sex Ratios, and Implications in the Face of Climate Change. *Conservation Biology* **24**: 1636-1643.
- Hays, G.C., S. Fossette, K. A. Katselidis, P. Mariani, G. Schofield. 2010b. Ontogenetic development of migration: Lagrangian drift trajectories suggest a new paradigm for sea turtles. *Journal of the Royal Society Interface* **7**: 1319-1327.
- Hawkes, L. A., A. C. Broderick, M. H. Godfrey y B. J. Godley. 2010. Climate change and marine turtles. *Endangered Species Research* **7**: 137-154.
- Hirayama, R. 1998. Oldest known sea turtle. *Nature* **392**: 705-708.
- Humber, F., B. J. Godley y A. C. Broderick. 2014. So excellent a fishe: a global overview of legal marine turtle fisheries. *Diversity and Distributions* **20**: 579-590.
- PCC. 2013. Summary for Policymakers. En Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley, editores. *Climate Change : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, EE.UU.
- IUCN. 2013. IUCN Red List of Threatened Species. www.iucnredlist.org. Fecha de acceso julio 2014.
- Jakimska, A., P. Konieczka, K. Skora y J. Namiesnik. 2011a. Bioaccumulation of metals in tissues of marine animals, part I: the role and impact of heavy metals on organisms. *Polish Journal of Environmental Studies* **20**: 1117-1125.
- Jakimska, A., P. Konieczka, K. Skora y J. Namiesnik. 2011b. Bioaccumulation of metals in tissues of marine animals, part II: the role and impact of heavy metals on organisms. *Polish Journal of Environmental Studies* **20**: 1127-1146.
- Keller, J. M., J. R. Kucklick, M. A. Stamper, C. A. Harms y P. D. McClellan-Green. 2004. Associations between organochlorine contaminant concentrations and clinical health parameters in loggerhead sea turtles from North Carolina, USA. *Environmental Health Perspectives* **112**: 1074-1079.

- Komoroske, L. M., R. L. Lewison, J. A. Seminoff, D. D. Deheyn y P. H. Dutton. 2011. Pollutants and the health of green sea turtles resident to an urbanized estuary in San Diego, CA. *Chemosphere* **84**: 544-552.
- Labrada-Martagón, V., P. A. Tenorio Rodríguez, L. C. Méndez-Rodríguez y T. Zenteno-Savín. 2011. Oxidative stress indicators and chemical contaminants in East Pacific green turtles (*Chelonia mydas*) inhabiting two foraging coastal lagoons in the Baja California peninsula. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* **154**: 65-75.
- Lam, T., X. Ling, S. Takahashi y E. A. Burgess. 2011. Market forces: an examination of marine turtle trade in China and Japan. *TRAFFIC East Asia*, Hong Kong.
- Lazar, B. y R. Gračan. 2011. Ingestion of marine debris by loggerhead sea turtles, *Caretta caretta*, in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin* **62**: 43-47.
- Ley-Quinóñez, C., A. A. Zavala-Norzagaray, T. L. Espinosa-Carreón, H. Pekkham, C. Marquez-Herrera, L. Campos-Villegas y A. A. Aguirre. 2011. Baseline heavy metals and metalloid values in blood of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from Baja California Sur, Mexico. *Marine Pollution Bulletin* **62**: 1979-1983.
- Ley-Quinóñez, C. P., A. A. Zavala-Norzagaray, J. G. Réndon-Maldonado, T. L. Espinosa-Carreón, A. Canizales-Román, D. C. Escobedo-Urías y A. A. Aguirre. 2013. Selected heavy metals and selenium in the blood of Black Sea turtle (*Chelonia mydas agassizii*) from Sonora, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **91**: 645-651.
- López-Castro, M. C., V. Koch, A. Mariscal-Loza y W. J. Nichols. 2010. Long-term monitoring of black turtles *Chelonia mydas* at coastal foraging areas off the Baja California Peninsula. *Endangered Species Research* **11**: 35-45.
- Márquez, R. y M. C. Farías. 2000. Las tortugas marinas y nuestro tiempo. Fondo de Cultura Económica, México.
- McKenzie, C., B. J. Godley, R. W. Furness y D. E. Wells. 1999. Concentrations and patterns of organochlorine contaminants in marine turtles from Mediterranean and Atlantic waters. *Marine Environmental Research* **47**: 117-135.
- Mignucci-Giannoni, A.A. 1999. Assessment and rehabilitation of wildlife affected by an oil spill in Puerto Rico. *Environmental Pollution* **104**: 323-333.
- Mrosovsky, N., S. R. Hopkinsmurphy y J. L. Richardson. 1984. Sex ratio of sea turtles seasonal changes. *Science* **225**: 739-741.
- Mueller, C., K. Townsend y J. Matschullat. 2012. Experimental degradation of polymer shopping bags (standard and degradable plastic, and biodegradable) in the gastrointestinal fluids of sea turtles. *Science of the Total Environment* **416**: 464-467.

- Nifong, J. C., M. G. Frick y S. F. Eastman. 2011. Putative predation and scavenging of two sea turtle species by the American alligator, *Alligator mississippiensis*, in coastal Southeastern United States. *Herpetological Review* **42**: 511-513.
- Orós, J., O. M. Gonzalez-Díaz y P. Monagas. 2009. High levels of polychlorinated biphenyls in tissues of Atlantic turtles stranded in the Canary Islands, Spain. *Chemosphere* **74**: 473-478.
- Páez-Osuna, F., M. F. Calderón-Campuzano, M. F. Soto-Jiménez y J. R. Ruelas-Inzunza. 2010. Lead in blood and eggs of the sea turtle, *Lepidochelys olivacea*, from the Eastern Pacific: Concentration, isotopic composition and maternal transfer. *Marine pollution bulletin* **60**: 433-439.
- Patino-Martínez, J., A. Marco, L. Quinones y B. Godley. 2008. Globally significant nesting of the leatherback turtle (*Dermochelys coriacea*) on the Caribbean coast of Colombia and Panama. *Biological Conservation* **141**: 1982-1988.
- Patino-Martínez, J., A. Marco, L. Quiñones y L. Hawkes. 2012. A potential tool to mitigate the impacts of climate change to the Caribbean leatherback sea turtle. *Global Change Biology* **18**: 401-411.
- Patino-Martínez, J., A. Marco, L. Quiñones y L. A. Hawkes. 2014. The potential future influence of sea level rise on leatherback turtle nests. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **461**: 116-123.
- Perrault, J. J. Wyneken, L. J. Thompson, C. Johnson y D. L. Miller. 2011. Why are hatching and emergence success low? Mercury and selenium concentrations in nesting leatherback sea turtles (*Dermochelys coriacea*) and their young in Florida. *Marine Pollution Bulletin* **62**: 1671-1682.
- Pérez-García, H., E. Silva, J. da Graça, J. Patino-Martínez, A. Marco, M. Donners, B. Martín y M. Ferrer. 2013. Artificial light and disorientation in nesting sea turtles. 1st International Conference on Artificial Light at Night (ALAN 2013). Berlin, Germany, October 28 to 30.
- Phillott, A.D. y C. J. Parmenter. 2001. The distribution of failed eggs and the appearance of fungi in artificial nests of green (*Chelonia mydas*) and loggerhead (*Caretta caretta*) sea turtles. *Australian Journal of Zoology* **49**: 713-718.
- PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente). 2009. La vida silvestre y su protección legal, pp. 3-11. México.
- Reisz, R. R. y J. J. Head. 2008. Paleontology. Turtle origins out to sea. *Nature* **456**: 450-451.
- Sakai, H., H. Ichihashi, H. Suganuma y R. Tatsukawa. 1995. Heavy metal monitoring in sea turtles using eggs. *Marine Pollution Bulletin* **30**: 347-353.
- Schofield, G., A. Dimadi, S. Fossette, K. A. Katselidis, D. Koutsoubas, M. K. S. Lilley, A. Luckman, J. D. Pantis, A. D. Karagouni y G. C. Hays. 2013. Satellite

- tracking large numbers of individuals to infer population level dispersal and core areas for the protection of an endangered species. *Diversity and Distributions* **19**: 834-844.
- Schuyler, Q., B. D. Hardesty, C. Wilcox y K. Townsend. 2012. To eat or not to eat? Debris selectivity by marine turtles. *PloS One* **7**: e40884.
- Schuyler, Q., B. D. Hardesty, C. Wilcox y K. Townsend. 2014. Global analysis of anthropogenic debris ingestion by sea turtles. *Conservation Biology* **28**: 129-139.
- Smelker, K., L. Smith, M. Arendt, J. Schwenter, D. Rostal, K. Selcer y R. Valverde. 2014. Plasma vitellogenin in free-ranging loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) of the northwest Atlantic Ocean. *Journal of Marine Biology*. doi.org/10.1155/2014/748267.
- Tomillo, P. S., F. V. Paladino, J. S. Suss y J. R. Spotila. 2010. Predation of leather-back turtle hatchlings during the crawl to the water. *Chelonian Conservation and Biology* **9**: 18-25.
- Tuxbury, S. M. y M. Salmon. 2005. Competitive interactions between artificial lighting and natural cues during sea finding by hatchling marine turtles. *Biological Conservation* **121**: 311-316.
- van Houtan, K. S. y O. L. Bass. 2007. Stormy oceans are associated with declines in sea turtle hatching. *Current Biology* **17**: R590-R591.
- van de Merwe, J. P., M. Hodge, J. M. Whittier, K. Ibrahim y S. Y. Lee. 2010. Persistent organic pollutants in the green sea turtle *Chelonia mydas*: Nesting population variation, maternal transfer, and effects on development. *Marine Ecology Progress Series* **403**: 269-278.
- Wallace, B. P., R. L. Lewison, S. L. McDonald, R. K. McDonald, C. Y. Kot, S. Kelez, R. K. Bjorkland, E. M. Finkbeiner y L. B. Crowder. 2010. Global patterns of marine turtle bycatch. *Conservation Letters* **3**: 131-142.
- Wallace, B. P., C. Y. Kot, A. D. DiMatteo, T. Lee, L. B. Crowder y R. L. Lewison. 2013. Impacts of fisheries bycatch on marine turtle populations worldwide: toward conservation and research priorities. *Ecosphere* **4**: 40.
- Wang, H., J. Tong, Y. Bi, C. Wang, L. Guo y Y. Lu. 2013. Evaluation of mercury mediated *in vitro* cytotoxicity among cell lines established from green sea turtles. *Toxicology in Vitro* **27**: 1025-1030.
- Welicky, R. L., J. Wyneken y E. G. Noonburg. 2012. A retrospective analysis of sea turtle nest depredation patterns. *Journal of Wildlife Management* **76**: 278-284.
- Wright, L. I., K. L. Stokes, W. J. Fuller, B. J. Godley, A. McGowan, R. Snape, T. Tregenza, y A. C. Broderick. 2012. Turtle mating patterns buffer against disruptive effects of climate change. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* **279**: 2122-2127.