



Posgrado en
Ciencias del Mar
y Limnología



Universidad Nacional Autónoma de México

**NAVEGACIÓN SOLAR COMPENSADA POR
RELOJ CIRCADIANO EN LA TORTUGA
MARINA JUVENIL *Eretmochelys imbricata*
(TESTUDINES, CHELONIIDAE).**

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestría en Ciencias del Mar y Limnología

Presenta

Kristel Lorena Gopar Canales

Director de Tesis: Dr. Manuel Miranda Anaya

Comité Tutorial:

Dra Gabriela Gaxiola Cortés

Dr. Xavier Chiappa Carrara

Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi

Dr. Alberto F Abreu Grobois



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

La presente Tesis de Maestría se la dedico con profundo amor:

A mis padres y mi hermano.

A mi esposo Arturo y a mi hija, Alessia.

Agradecimientos

Primero que nada a mi familia, que todo me ha brindado y en todo me ha respaldado incondicionalmente. Los amo.

Gracias papá por todo el apoyo que me has dado siempre, pero sobre todo por la inspiración que me brindas, porque eres mi ejemplo de seguir adelante día con día, por el amor incondicional que siempre tienes para mí y que me llena de fuerzas y coraje.

Gracias mamá, por ser mi madre, por tu apoyo, por tu confianza, por estar conmigo en cada momento de mi vida, por ser mi mejor amiga, por escucharme siempre y sobre todas las cosas por haberme dado la vida. Por todas tus enseñanzas mamá, hoy soy quien soy.

A mi hermano, gracias Ger por tu incondicional apoyo, por ser mi fuerza paralela, mi alma, mi inspiración, mi sonrisa. Gracias a ti he vivido incontables momentos de felicidad, te adoro!

Gracias amor, gracias Arturo por estar a mi lado y apoyarme, por comprenderme y aceptarme, por escucharme y sobre todas las cosas por tu honestidad, porque gracias a ello he aprendido a tomar decisiones. Eres mi motivación de todos los días y me has brindado las ganas de disfrutar siempre sin importar las circunstancias. Porque gracias a ti aprendí a levantarme después de cualquier caída. Gracias por tus enseñanzas como pareja, como padre y como amigo. Te amo.

A mi pequeña hija Alessia Valentina, gracias hija porque con tu existencia le brindaste luz a mi vida, por ti vivo, por ti aprendo y mejoro cada día. Gracias hija por enseñarme a apreciar la vida tal cual se presenta. Gracias por cada uno de tus gestos, sin importar cual sea me hacen el día. Gracias a ti sé que siempre hay algo que aprender y por lo cual asombrarse. Mi pequeña te amo!

Mayi, gracias por darme la oportunidad de amarte, de conocerte y de permitirme ser parte de tu familia. En ti veo una fuerza e inteligencia que inspira y es digna de admirar, gracias por tus sonrisas, por compartir conmigo. Gracias por tu confianza y tu cariño. Gracias por ser parte de mi vida!

A Abril. Te agradezco todos y cada uno de los momentos que has compartido conmigo y con mi familia, por tu alegría, tus fuerzas y tu ímpetu que son un ejemplo de vida. Gracias por ser parte de nuestra familia y por tu amistad.

A mi tutor de tesis Manuel Miranda. Gracias Manuel por tu paciencia, tu dedicación, tus enseñanzas. Eres para mí un ejemplo a seguir. También gracias por tus acertados consejos académicos. Por tu inmenso apoyo que siempre me has brindado como profesor, tutor y amigo. Sin duda, este proyecto llegó a su conclusión en la mayor parte gracias a ti.

A mi Comité Tutor integrado por la Dra. Gaxiola, Dr. Abreu, Dr. Chiappa y Dr. Urrutia. Sus enseñanzas han sido la guía de este proyecto. Su inmenso conocimiento me permitió tener una visión distinta del mismo. A la Dra. Gaxiola y Dr. Chiappa por recibirme tan calurosamente en la UMDI Sisal y brindarme

todas las facilidades para realizar el protocolo experimental, por sus comentarios y observaciones constantes a este estudio.

Al Dr. Abreu por sus enseñanzas y su atención a mi proyecto de tesis, a pesar de la distancia se mantuvo siempre al tanto de mis avances, por guiarme en el entendimiento de mis resultados y por su paciencia para atender todas mis dudas. Gracias Dr.!

Al MVZ Luis Antonio Méndez González, Jefe del Departamento de Conservación de Ecosistemas de la SEDUMA, Yucatán. Quien desde la planeación de este proyecto mostró dedicación e interés para llevarlo a cabo. Que nos recibió con los brazos abiertos en sus instalaciones y brindó todas las facilidades para el trámite de permisos ante la SEMARNAT para llevar a cabo nuestro estudio. Por sus certeras aportaciones y observaciones a la redacción del mismo.

A Genaro y Don Víctor, quienes me brindaron su inmenso apoyo para el manejo de huevos y crías de tortuga carey y me enseñaron en campo todo acerca de esta maravillosa especie. Por ayudarme a sacar adelante mi protocolo experimental, por brindarme su confianza y por recibirme con amistad. A Genaro y su esposa por abrirme las puertas de su casa y recibirme como de su familia, tengan la seguridad que del mismo modo les recibiré yo cuando tenga la grandiosa oportunidad de su visita al DF.

A Gabriel Taboada por brindarme su amistad, cuidado y alojamiento durante mi estancia en Sisal, por acompañarme hasta tarde de regreso a la casa y por compartirme a su pequeño y travieso Mesh! Gracias por esas interminables pláticas en el "Comanche" en las que aprendí mucho prácticamente de todo!

Al Ing. Raúl Miranda Velazco de la SEDUMA, Yucatán. Quien me apoyo todo el tiempo con el transporte y me acompañó a la exploración de las zonas de eclosión y muestreo. Y por supuesto mostró siempre interés por nuestro estudio.

A Jorge Peniche, quien no sólo amablemente sino de manera muy dedicada y entusiasta me apoyó a llevar a cabo directamente los registros experimentales durante el presente proyecto, y durante la estancia me acompañó en cada muestreo, proceso de alimentación, cuidado de animales, montaje de dispositivos, carga de equipo etc.

A mis profesores de Maestría en el ICMYL, cada uno de ellos merece un agradecimiento muy particular ya que su conocimiento y enseñanzas dieron pie a la planeación de este estudio, y que a la fecha me regalan sus observaciones tan valiosas.

A mis amigas amadas que están siempre para escucharme, abrazarme y apoyarme en todo, cuando tengo logros o me equivoco pero siempre están al tanto de mi vida. Gracias Brenda, siempre gracias por estar conmigo en todo de todo, eres para mí como mi hermana. A Cinthia por darme inspiración y motivación a cerrar capítulos, por acompañarme y contagiarme de tu energía a realizar nuevos proyectos. A Pico! Por mantenerse al tanto de mí todo el tiempo, por ser una excelente amiga y compañera en innumerables cosas.

De igual forma agradezco por a la vida en sí, que sin duda es un milagro. Y lo digo con certeza porque ahora que soy madre me doy cuenta que es así, que a pesar de los estudios, de la ciencia y de las bases científicas hay una fuerza que aún no logramos entender pero que sin duda se abre paso ante absolutamente todo.

Por último gracias a la UNAM, que me ofreció el mejor espacio para mi formación académica y a CONACYT por respaldar este proyecto de maestría a través del programa de becas nacionales.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	1
I. ANTECEDENTES	2-11
i. La migración de tortugas marinas mediante el sistema de sensibilidad magnética	2-5
ii. La migración de tortugas marinas mediante el sistema de orientación solar compensada por un reloj circadiano	5-7
iii. Los sistemas circadianos. ¿a qué nos referimos?	8-9
iv. La glándula pineal como órgano fotorreceptor y como marcapasos	10
v. La glándula pineal como reloj temporal o estacional	11
II. BIOLOGÍA GENERAL DE <i>ERETMOCHELYS IMBRICATA</i>	12-18
i. Clasificación	12
ii. Generalidades de la tortuga carey <i>Eretmochelys imbricata</i>	13-14
iii. Distribución global	14
iv. Hábitat	15
v. Reproducción	15-16
vi. Situación de la tortuga carey en la península de Yucatán	17
vii. Posibles rutas de migración de la tortuga carey en el Caribe	18
III. AREA DE ESTUDIO	19
IV. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	20
V. HIPÓTESIS	20
VI. OBJETIVOS	21
i. Generales	21
ii. Particulares	
VII. MATERIAL Y MÉTODO	22-23
VIII. PROTOCOLO EXPERIMENTAL GENERAL	24-26
i. Registro Fotográfico de Orientación de Nado	24-25
ii. Registro de actividad locomotriz (RALM)	26

XIX. MANIPULACIÓN DE ANIMALES	27-31
i. Acondicionamiento para Registro de Orientación de Nado	
Fotoperiodo LO 12:12 sin retraso (Fotofase 06:00-18:00 h)	27
Fotoperiodo LO 12:12 con retraso (Fotofase 12:00-24:00 h)	28
ii. Acondicionamiento para registro de datos en campo	29-30
iii. Acondicionamiento para el Registro de Actividad Locomotriz	30-31
X. ANÁLISIS DE DATOS	32-33
i. Prueba de Rayleigh	33
ii. Prueba de Mardia –Watson	
XI. RESULTADOS	43-42
i. Diagramas promedio de dirección de nado. Nido 1	36-37
a) <i>Grupo Experimental I. Fotofase 06:00 -18:00. Sin Retraso de Fase</i>	36
b) <i>Grupo Experimental II. Fotofase 12:00 – 24:00. Con Retraso de Fase</i>	36-37
ii. Diagramas promedio de dirección de nado. Nido 2	38-39
c) <i>Grupo Experimental I. Fotofase 06:00 – 18:00. Sin Retraso de Fase</i>	38
d) <i>Grupo Experimental II. Fotofase 12:00 – 24:00. Con Retraso de Fase</i>	39
iii. Registro de actividad locomotriz	40-42
Diagramas de Actividad (Actogramas)	40-41
Curvas Promedio de Actividad	42
XII. DISCUSIÓN	43-56
i. Individuos sin imán sincronizados a Fotoperiodo LO 12:12, Fotofase 06:00-18:00 h (Figuras 15 y 17)	47-48
ii. Individuos con imán sincronizados a Fotoperiodo LO 12:12, Fotofase 06:00-18:00 h (Figuras 15 y 17)	48
iii. Individuos sin imán sincronizados a Fotoperiodo LO 12:12, Fotofase 12:00 – 24:00 h (Figuras 16 y 18)	49
iv. Individuos con imán sincronizados a Fotoperiodo LO 12:12 con Fotofase 12:00– 24:00 h (Figuras 16 y 18)	49-52
v. Individuos sincronizados a Fotoperiodo Natural. Registro de Actividad Locomotriz	52-53

vi.	El caso de la luz polarizada ¿es una señal factible para la orientación de nado en tortugas marinas juveniles?	53-54
vii.	Implicaciones biológicas de la conducta de migración en juveniles de <i>Eretmochelys imbricata</i>	55-56
XIII.	CONCLUSIONES	57
XIX.	LITERATURA CITADA	58-62
XX.	PÁGINAS WEB CONSULTADAS	63
XXI.	ANEXO I	64-65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de Kramer (1966) de Compensación Solar por Reloj Circadiano	7
Figura 2. Rasgos particulares de <i>Eretmochelys imbricata</i> en diferentes etapas de su vida	14
Figura 3. Ciclo general de vida de las tortugas marinas	16
Figura 4. Rutas Migratorias aproximadas de la tortuga Carey en el Mar Caribe	18
Figura 5. Área de estudio e Investigación	19
Figura 6. Mapa de Ubicación de zonas del área de estudio	23
Figura 7. Diagrama de la arena de observación para el registro fotográfico	25
Figura 8. Áreas de acondicionamiento a Fotoperiodo Controlado	27
Figura 9. Acuarios de Fotoperiodo con Retraso de Fase	28
Figura 10. Manipulación de animales en campo	29
Figura 11. Colecta de Datos en Campo	30
Figura 12. Sistema de Registro de Actividad Locomotriz	31
Figura 13. Porcentaje total de individuos con dirección significativa ($p < 0.05$)	34
Figura 14. Porcentaje total de individuos con dirección significativa provenientes de un fotoperiodo con retraso	35
Figura 15. Diagramas de orientación promedio de los organismos sin retraso de fase	36
Figura 16. Diagramas de orientación promedio de los organismos con retraso de fase	37
Figura 17. Diagramas de orientación promedio de los organismos sin retraso de fase Nido 2	38
Figura 18. Diagramas de Orientación promedio de los organismos con retraso de fase Nido 2	39
Figura 19. Actogramas de Registro de Actividad Locomotriz en Fotoperiodo Natural	41
Figura 20. Curvas promedio de actividad locomotriz en Fotoperiodo Natural	42
Figura 21. Transcurso Natural del Sol en el horizonte vs día artificial con retraso	52
Figura 22. Posición de tortugas sin actividad de nado	54
Figura 23. Deformación del campo magnético ($n7$) en laboratorio	64
Figura 24. Deformación del campo magnético en sus distintas componentes	65

RESUMEN

La navegación en animales migratorios puede depender de diversos mecanismos biológicos. Uno de ellos en particular, consiste en un sistema circadiano capaz de compensar la posición del azimut del Sol durante el día, permitiendo corregir la orientación y el desplazamiento de los organismos durante la migración. Este fenómeno ha sido particularmente estudiado en organismos migratorios como aves e insectos; sin embargo existen muchos organismos marinos que migran estacionalmente y que se desconoce si también lo usan, como es el caso de las tortugas marinas. Se sabe que desde temprana edad, la orientación por un compás magnético juega un papel muy importante en la orientación de nado en estos animales. En el presente estudio se pretende comprobar si además un reloj circadiano participa en la dirección de navegación de la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) en individuos que van de 24 a 72 horas de edad.

Durante nuestro estudio realizamos dos salidas de campo y utilizamos organismos desde su eclosión de dos nidos distintos de la misma especie provenientes de las playas de Sisal, Yucatán.

Una vez que emergieron, las tortugas fueron colectadas y mantenidas en condiciones controladas de agua, alimentación y fotoperiodo 12:12 en las facilidades de la Unidad Multidisciplinaria de la Facultad de Ciencias, UNAM. Uno de los grupos (control) fue mantenido durante tres días en un fotoperiodo de luz oscuridad con fotofase 06:00-18:00 y el segundo grupo fue mantenido en un fotoperiodo de luz oscuridad retrasado con fotofase 12:00-24:00.

Los resultados muestran diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre la dirección preferida por los individuos del grupo control (NNE) y aquellos que fueron mantenidos en un horario de 6 h de retraso (NNO); mostrando un avance promedio cercano a los 60° hacia el NNO. No se encontraron diferencias significativas entre los organismos que tuvieron o no un imán en el caparazón durante el registro. La actividad locomotriz monitoreada en 7 organismos estudiados indica una actividad crepuscular en fotoperiodo natural así como actividad anticipada al amanecer y atardecer desde el primer día de eclosión. Los resultados obtenidos de este estudio son consistentes con la hipótesis de que las tortugas recién eclosionadas son capaces de utilizar el Sol como referencia para orientar su nado, sin embargo serán necesarios experimentos adicionales para establecer los mecanismos mediante los cuales se lleva a cabo este proceso biológico.

I. ANTECEDENTES

La caracterización del hábitat espacio-temporal es un elemento fundamental en las estrategias de manejo para la conservación de la biodiversidad. Diversos estudios acerca de la conservación de las especies de tortugas marinas existentes en el mundo, coinciden en la importancia de la conservación de estos organismos y hacen hincapié en el intenso declive de sus poblaciones que han sufrido en las últimas dos décadas, principalmente por tres causas: la baja tasa de supervivencia de los huevos, la alta mortalidad relacionada a la actividad pesquera y la depredación antropomórfica en áreas de anidación. No obstante, a pesar que los investigadores han avanzado en el estudio de estos organismos, todavía no conocemos qué hacen o en dónde están la mayor parte de su ciclo de vida y así poder contar con elementos que permitan preservarles indirectamente. Una primera aproximación, es conocer cuáles son los mecanismos mediante los cuales se da la navegación; en principio conocer si existe capacidad de orientación mediante mecanismos de control circadiano que permitan corregir la dirección respecto al azimut solar, como ocurre en otras especies de animales migratorios.

i. La migración de tortugas marinas mediante el sistema de sensibilidad magnética.

Las tortugas marinas son animales filogenéticamente muy antiguos, que pueden tener rutas migratorias de miles de kilómetros en el mar. Para que esto pueda ocurrir hoy en día se necesitan estrategias de conservación basados en su hábitat y patrones de movimiento (Shillinger; *et al*, 2008).

Mientras que la investigación acerca de la biología y la conservación de estos organismos en sitios de anidación continúa avanzando, el hábitat oceánico y las rutas de migración son poco conocidas, pero más escaso es el estudio de las señales que utilizan para seguir y corregir su ruta. Los estudios al respecto utilizan un rastreo satelital (telemetría) de tortugas adultas, que indica si hay o no corrientes marinas implicadas, y si estas aceleran la velocidad de transporte de las tortugas o si influyen directamente como parte de la dirección de su traslado.

Gracias a estos sistemas se ha podido conocer una buena parte del camino que siguen algunos individuos de diferentes especies de tortugas y de distintas edades durante su ruta migratoria.

Resulta claro entonces pensar que el estilo de vida de estos organismos está íntimamente relacionado a la habilidad de navegar a través del mar abierto. Aún sin haber experimentado el contacto con el mar, las tortugas juveniles recién eclosionadas eligen rutas de nado. Después, como adultas, migran de zonas de alimentación a zonas específicas de apareamiento y de anidamiento; éstas últimas coinciden casi siempre con las zonas en donde eclosionaron.

Los estudios conductuales con tortugas juveniles de 42.3 a 67.4 cm de longitud de caparazón de *Caretta caretta* (Arens y Lohman, 2003) sugieren que una parte importante de la navegación es la habilidad de utilizar numerosas señales externas, como la dirección de oleaje (Salmon y Lohmann, 1989; Lohmann et al., 1990; Lohmann y Lohmann, 1992) el campo magnético terrestre (Lohmann, 1991) y las interacciones entre ambas (Goff et al., 1998). Otras señales que pudieran dar información relevante ante ciertas condiciones pudieran ser químicas (Koch et al., 1969), solares y de luz polarizada (DeRosa y Taylor, 1980; Hawryshyn et al., 1990) además de señales visuales (Luschi et al., 1996). Si cualquiera de estos son realmente utilizados por tortugas de recién

eclosión, juveniles y adultas aún no sabemos en qué medida ni bajo qué condiciones (Avens y Lohmann; 2003).

Experimentos desarrollados con tortugas juveniles, sugieren que una parte significativa de la navegación depende de la magnetorrecepción natural, es decir, la capacidad de detectar el campo magnético terrestre; una señal importante que sirve de guía para tortugas recién eclosionadas a migrar por primera vez fuera de la costa. Lohmann (2001) plantea que dentro del océano, los campos magnéticos funcionan como marcadores navegacionales, que suscitan el cambio direccional en puntos clave de la ruta migratoria y que de no ser así, las tortugas perderían su curso. Por esta razón se cree que las tortugas de mayor edad han aprendido la topografía magnética del área en donde habitan y desarrollan “mapas magnéticos” que permiten su traslado a áreas específicas (Lohmann, *et al*; 2004). No obstante los mecanismos fisiológicos que se encuentran detrás de esta habilidad sensorial se desconocen (Lohmann y Johnsen; 2002). Actualmente se sabe que las tortugas adultas, juveniles y recién eclosionadas, pueden utilizar el campo magnético de la tierra para direccionar sus movimientos migratorios. Esto debido a que la intensidad (fuerza) del campo y la inclinación de las líneas del campo varían de manera predecible a través del globo terrestre, provocando que cada región oceánica posea un único campo magnético asociado (Lohmann y Lohmann, 1994; 1996; 2006).

La existencia de tales sistemas de localización magnética han sido comprobados experimentalmente en tortugas juveniles (Lohmann, *et al*; 2004) y adultas (Luschi et al., 2007) de *Chelonia mydas*, recién eclosionadas (Irwin y Lohmann, 2002) y juveniles (Avens y Lohmann, 2003) de *Caretta caretta*. Ahora se sabe que cuando las señales magnéticas terrestres son bloqueadas con imanes, las tortugas pueden utilizar otras fuentes de información tales como señales

celestiales (p. Ej. posición del Sol), corrientes marinas, dirección del oleaje, señales visuales y químicas (olfatorias) como fuentes importantes de información para su orientación de nado.

Recientemente la orientación de nado compensada por reloj ha sido más estudiada en tortugas marinas debido a que cada vez es más urgente conocer los movimientos estacionales de estos organismos para poder conservarlos. En el estudio realizado por Mott y Salmon (2011) se retoma la idea de que el Sol es utilizado como un compás para la orientación de nado en individuos juveniles de *Chelonia mydas* de la costa sudeste de Florida. En dicho estudio los resultados indican que los organismos son capaces de orientarse significativamente hacia una dirección distinta después de haber sido sincronizados a un fotoperiodo con 7 horas de avance respecto a la hora local, de manera que al observar su orientación a la luz del día natural fue distinta a la de los organismos sin avance.

ii. La migración de tortugas marinas mediante el sistema de orientación solar compensada por un reloj circadiano.

Actualmente son muy estudiados los efectos del magnetismo en la conducta de migración de diferentes especies de tortugas marinas. No obstante los movimientos de traslación, rotación y la inclinación terrestre producen variaciones cadenciosas en la conducta de los animales.

Gran parte de dichas variaciones son gobernados internamente por un reloj biológico circadiano que dicta su paso en el tiempo. Dicho sistema parece estar involucrado en la navegación animal en distintas especies. Hoy en día sabemos que los animales utilizan información procedente del Sol para tener un control temporal de la ruta de su migración, mediante un reloj biológico endógeno

que al parecer, no solo mide la longitud relativa del transcurso del día a la noche y que es capaz de discriminar entre las estaciones del año, sino que también permite corregir una dirección durante la migración respecto al azimut solar.

La migración de especies a través de distancias largas en el océano, necesariamente implica una corrección continua de la ruta, ya que no siempre hay puntos de referencia visibles. Cuando esto ocurre, un organismo pelágico pudiera estar siendo compensado por una orientación magnética o bien por la transición de la posición solar durante el día.

Algunos insectos, por ejemplo las hormigas, utilizan la posición del Sol para mantener una dirección correcta en un terreno pobre en referencias. Santshi (1911; 1913) demostró que si las hormigas son bloqueadas de la incidencia directa del Sol, pero expuestas a su reflejo en un espejo, éstas alteraban su curso de manera predecible. Un trabajo similar en aves, realizado por Gustav Kramer en 1966 demostró que dichos organismos también orientaban su vuelo hacia donde se reflejaba la posición del Sol, comprobando que existe una guía de orientación importante y que incide directamente en un reloj biológico capaz de compensarla para mantener una dirección adecuada (Revisado en Hill *et al*, 2008) (**Figura 1**).

Hoffmann (1953, 1954 y 1960) demostró que el reloj biológico usado en la orientación por el Sol y compensada a lo largo del día, tiene las mismas propiedades que aquel que controla la actividad locomotriz, y que oscila de manera circadiana (con periodo similar a 24 h), concluyendo que dicho mecanismo depende de un reloj circadiano.

Un ejemplo reciente del mecanismo de navegación compensado por reloj es el de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*). Sus poblaciones cruzan toda Norteamérica, del este de Canadá en diagonal sobre Estados Unidos y México hasta las montañas de Michoacán, al oeste. Se ha

demostrado que las antenas de la mariposa son necesarias para controlar gran parte de la migración a través del mecanismo de orientación solar compensado por reloj. Este descubrimiento, además de proponer una estructura primordial para estos organismos retoma la hipótesis sobre el compás biológico, que funciona a partir de señales tanto internas (reloj circadiano) como externas (luz) para promover la dirección de su desplazamiento (Reppert 2009).

El mecanismo de orientación por la posición de Sol compensado por reloj, predice que un animal mantiene un movimiento de desplazamiento con un ángulo específico, que es constantemente corregido respecto a la fuente de luz. En la naturaleza esta fuente es el Sol. El reloj biológico que mide su transición durante el día (azimut) compensa dichos cambios para que un organismo pueda mantener una dirección relativamente constante.

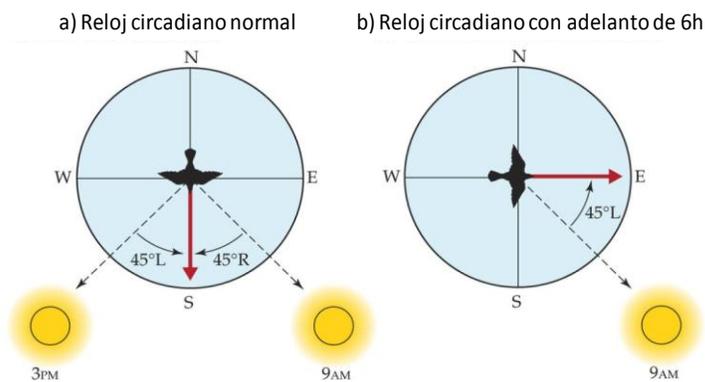


Figura 1. En este modelo descrito por Kramer (1966) se observa en (a) que un ave migra en dirección Sur y compensa la transición del Sol durante el día. Para comprobarlo es sometida a un fotoperiodo artificial (b) con un adelanto de 6 horas y se observa una dirección de migración distinta (Este). Imagen tomada de Hill *et al*, 2008.

Respecto a tortugas, recientemente se ha publicado que en *Chelonia Midas* existe la misma conducta de orientación respecto a la posición del sol (Mott *et al*, 2011), y también se ha reportado con anterioridad para la tortuga *Chrysemis picta* (Derosa y Taylor, 1978).

iii. Los sistemas circadianos ¿a qué nos referimos?

A pesar de que en la actualidad el estudio de los ritmos circadianos se hace mayoritariamente en dos modelos animales (mosca *Drosophila* y roedores) el estudio en modelos alternativos representa un importante acercamiento para entender cómo se encuentra organizado el sistema circadiano en vertebrados, y cómo ha cambiado éste en el curso de su evolución (Tosini *et al.*, 2000).

Diversos parámetros que expresan los organismos (químicos, fisiológicos, conductuales etc.) conservan fluctuaciones diarias en condiciones constantes de oscuridad y/o temperatura, demostrando que son controlados por un oscilador endógeno. A todos aquellos parámetros cíclicos fisiológicos o conductuales se les conoce como *ritmos biológicos*. Aquellos ritmos que persisten en condiciones constantes con un periodo cercano a 24 horas se les llaman *circadianos* término del latín *circa*= cercano a y *diano*= día (Tosini *et al.*, 2000).

Al sistema fisiológico responsable de medir el tiempo y sincronizar los procesos internos de un organismo con los eventos diarios en el ambiente, se le conoce como *marcapasos* o *reloj circadiano* (Pittendrigh, 1981). El o los marcapasos circadianos involucrados en la regulación de los ritmos en el organismo, reciben información fótica del ambiente, a través de los fotorreceptores circadianos (Moore-Ede *et al.*, 1982).

Es importante saber reconocer la diferencia que hay entre un *reloj* y un *ritmo biológico*. Un *reloj biológico* hace referencia a la estructura u oscilador que indica el momento en el cual debe iniciar uno o más procesos. Un *ritmo* biológico lo definimos como la actividad biológica observada en condiciones ambientales constantes, con un periodo similar al ciclo ambiental que lo sincroniza en condiciones naturales.

El estudio de los ritmos biológicos ha permitido identificar sus características, y de acuerdo a ellas hemos podido clasificarlos. Existen tres propiedades principales que definen un ritmo: el periodo, la frecuencia y la amplitud. El periodo lo entendemos como el lapso de tiempo en el que transcurre un ciclo completo de una oscilación (fenómeno o proceso) de carácter rítmico. La frecuencia es el número de veces que ocurre dicha oscilación en un intervalo de tiempo arbitrario y la amplitud es la magnitud de la variación que posee dicho fenómeno medido en valores máximos y mínimos.

De acuerdo a la frecuencia con la que ocurren en un día podemos clasificar los ritmos en *ultradianos* (su periodo es menor a 20 h, como el ritmo respiratorio y cardiaco), *circadianos* (periodo alrededor de 24 h como el ciclo sueño - vigilia) e *infradianos* (periodo mayor a 28 h como el ciclo menstrual y los ritmos circ anuales de migración e hibernación; Moore-Ede *et al*, 1982).

En particular los ritmos circadianos están controlados por un sistema de relojes endógenos que, hoy en día, han sido identificados a nivel de genes, pero principalmente como conjuntos de estructuras discretas dentro del sistema nervioso. En los vertebrados existen estructuras que, al ser removidas, tienen un efecto importante en la conducta de ritmicidad circadiana, y por tanto pueden ser consideradas como parte del sistema circadiano. Tal es el caso del núcleo supraquiasmático del hipotálamo (NSQ) en los mamíferos y la glándula pineal y las retinas en los no mamíferos. El NSQ, los ojos laterales, y el complejo pineal constituyen lo que se conoce como el "Eje Circadiano de los Vertebrados". A pesar que estas estructuras están presentes en todos los vertebrados, su contribución al sistema circadiano puede variar considerablemente entre clases y entre individuos de la misma clase (Menaker y Tosini, 1996).

iv. La glándula pineal como órgano fotorreceptor y como marcapasos.

La glándula pineal es el componente central en la regulación de la ritmicidad circadiana de diversos reptiles y otros vertebrados no mamíferos. Debido a su posición filogenética y ecología, los reptiles han provisto al campo de investigación circadiana con algunos de los más interesantes modelos para entender la organización circadiana, su evolución y su variabilidad.

La glándula pineal no es sólo un fotorreceptor en vertebrados no-mamíferos, sino que también puede actuar como un marcapasos circadiano, por su síntesis y secreción circadiana de la melatonina (N-acetil-5-metoxytryptamina) una hormona de la familia de las indolaminas que ha sido extensamente estudiada (Tosini *et al*, 2003). Virtualmente todos los vertebrados poseen un órgano pineal y en la mayoría se localiza en la superficie dorsal del cerebro. En peces, anfibios y reptiles podemos encontrar un segundo componente llamado órgano parapineal (Hamasaki y Eder, 1977). Este segundo componente no se encuentra en muchas especies de reptiles como víboras y tortugas y aún no se ha estudiado su papel dentro del sistema circadiano (Underwood, 1990).

En reptiles la glándula pineal contiene células fotosensibles con actividad secretora de melatonina. Debido a su capacidad de responder a cambios en la iluminación y temperatura, la glándula pineal es considerada un transductor foto-termo-endocrino de los cambios en el fotoperiodo y la temperatura ambiental (Underwood, 1990).

v. La glándula pineal como reloj temporal o estacional

Investigaciones en lagartijas han demostrado que la glándula pineal puede integrar la longitud de la fase luminosa que cambia respecto al paso de las estaciones del año (Firth *et al.*, 1999; Underwood, 1985, 1987). Por lo tanto, los cambios de luz y temperatura (como ocurre en las estaciones del año) son fácilmente traducidas en una señal endógena en la forma del ritmo de la melatonina y dicha señal puede estar desencadenando la regulación fisiológica diaria y anual de las lagartijas (Underwood, 1993) por lo que puede ser considerado un componente importante en la organización del sistema circadiano en reptiles.

Existen estudios que correlacionan la importancia de la glándula pineal con la regulación de los ritmos circadianos en las tortugas (Belekhova y Kenigfest 2001; LarsonPrior *et al.*, 1996; Casson *et al.*, 1995; Mahapatra *et al.*, 1988; Owen *et al.*, 1980). Por lo que es posible que la integración de la medición del tiempo durante el día, así como la longitud del fotoperiodo se lleve a cabo en esta estructura.

II. BIOLOGÍA GENERAL DE *ERETMOCHELYS IMBRICATA* (TORTUGA CAREY)

Las tortugas (Orden Testudines) aparecieron hace unos 200 millones de años de acuerdo al registro fósil (Pritchard, 1979). Sin embargo su evolución ha sido cuestión de especulación y debate, lo que se refleja en cierta incertidumbre sobre las relaciones evolutivas a niveles taxonómicos, desde subespecies hasta subórdenes (Bowen *et al*, 1993). Las clasificaciones actuales se basan principalmente en las relaciones evolutivas entre los géneros existentes como el que se presenta a continuación.

i. Clasificación.

Orden Testudines.- Todas las tortugas existentes, de agua dulce, terrestres y marinas.

Familia Dermochelyidae.- *Dermochelys coriácea* (laúd)

Familia Cheloniidae

Tribu Chelonini

Género *Chelonia*.- *C. mydas* (verde)

C. agassizi (negra)

Género *Natator*.- *N. depressus* (aplanada)

Tribu Carettini

Género *Caretta*.- *C. caretta* (caguama)

Género *Lepidochelys*.- *L. olivácea* (lora oliva)

L. kemp (lora de Kemp)

Género *Eretmochelys*.- *E. imbricata* (carey)

Clasificación tomada de Bowen *et al*, 1993.

ii. Generalidades de la tortuga carey *Eretmochelys imbricata*.

La tortuga *Eretmochelys imbricata* (Linneo, 1766) se distribuye de modo amplio en todos los océanos. Anida en al menos 60 países, aunque de ello la mayoría ocurre a baja densidad (Groombridge y Luxmoore, 1989).

Esta fue la primera especie de tortuga en aparecer en la lista de especies en peligro por la IUCN (*International Union for the Conservation of Nature*) en 1968 y se ha mantenido en ella en todas las publicaciones subsecuentes de la *Lista Roja* hasta 1996, cuando su estatus se cambió a estado de peligro crítico (Baillie y Groombridge, 1996 – IUCN Lista Roja de Animales Amenazados). En la actualidad se encuentra en peligro de extinción.

Eretmochelys imbricata es una especie de tortuga marina cuyo nombre comúnmente utilizado es el de tortuga carey. Tiene hábitos solitarios y es carnívora, se alimenta especialmente de esponjas marinas, medusas, caracoles, crustáceos, erizos, estrellas de mar, moluscos y peces. Su tamaño en adultos es considerado mediano, llegando a medir 114 cm de largo. Su cabeza es estrecha y alargada, posee un hocico alargado y con una punta hacia abajo (parecido al de un halcón) de ahí su nombre en inglés “hawksbill turtle” (**Fig. 2 A**). Posee también dos garras visibles en las aletas delanteras. Su coloración como adultos puede combinar colores amarillo, ámbar, rojo, marrón y negro. Los escudos de su caparazón se encuentran imbricados (sobrepuestos). Presenta cuatro pares de escudos costales (el primero no tiene contacto con el cervical), dos pares de prefrontales, y comúnmente tres postoculares (**Fig. 2 B**). Los juveniles recién eclosionados poseen un caparazón en forma de corazón, su coloración va de café claro a oscuro (**Fig. 2 C**) pero en los adultos es más alargado y en la parte final es aserrado.

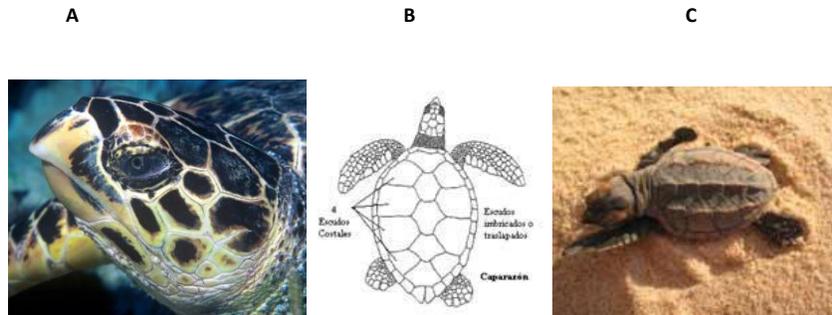


Figura 2. Se muestran rasgos particulares de *Eretmochelys imbricata* en diferentes etapas de su vida, adulta (A, B) y juvenil (C). En A podemos distinguir su hocico alargado al cual debe su nombre en inglés. Imágenes obtenidas de: <http://www.iacseaturtle.org/imbricata.html>, http://www.animalesextincion.es/articulo.php?id_noticia=160

iii. Distribución global.

La tortuga carey es tropical, pero existen registros en el Atlántico, Pacífico y en los océanos Índico desde California, Japón, el Mar Rojo, las Islas Británicas, Francia, el sur de Massachusetts hasta Perú, Nueva Zelanda, Australia, Madagascar, la parte noroccidental de África, al sur de Brasil y Santa Helena. Ocurre con poca frecuencia en las aguas de Hawaii y ocasionalmente entra en el Mar Mediterráneo.

La temporada de anidación puede variar entre las localidades, pero en general en el Golfo de México y el mar Caribe, abarca de abril a septiembre, mientras que en el litoral del Pacífico es de julio a octubre. Las principales áreas de reproducción se encuentran entre los 25 °N y los 35 °S, con pocos registros fuera de estas latitudes, centrándose en el Atlántico norte en el Caribe, en la Península de Yucatán (México), sur de Cuba, y otras islas como Jamaica, República Dominicana y Granada (Márquez, 1990).

iv. Hábitat.

La tortuga carey pasa sus primeros años de vida en un hábitat pelágico. Los individuos jóvenes y adultos se asocian más a arrecifes de coral, pero pueden buscar alimento más a fondo en hábitats tropicales y en menor proporción en subtropicales. Suelen anidar en playas de arena insulares y continentales (Meylan y Donnelly, 1999).

La tortuga carey suele también habitar regiones tropicales poco profundas, un tanto rocosas y de arrecife coralino; se puede encontrar en zonas costeras como en manglar, estuarios y lagunas con fondos lodosos de poca o ausente vegetación. Ocasionalmente es encontrada en aguas profundas y los juveniles se asocian con parches de algas de *Sargassum*.

v. Reproducción.

Semejante a las demás especies de tortugas marinas, *E. imbricata* puede ser considerada una especie de crecimiento lento, maduración tardía y vida longeva. A pesar de no existir un método plenamente confiable para determinar la edad que no sea por marcaje en el caparazón y recaptura (Bjorndal y Zug, 1995), probablemente esta especie requiere alrededor de 20 años para alcanzar la fase adulta y reproducirse por lo menos cada década (Chacon, 2004).

La época de apareamiento ocurre normalmente entre abril y noviembre dependiendo de la población. Suelen aparearse en aguas poco profundas cerca de las playas en donde nidificarán. Después del apareamiento, las hembras arriban de noche para depositar sus huevos en hoyos cavados en la arena usando las aletas traseras. Sus intervalos de anidación pueden ir de dos a cuatro años, aunque puede ser variable dependiendo de la localidad. En comparación con otras especies, la tortuga carey coloca huevos pequeños de aproximadamente 4 cm de diámetro (Miller

et al, 2003). A lo largo de una época reproductiva cada hembra puede desovar de una a ocho veces (Chan y Liew, 1999; Dobbs *et al*, 1999); otros estudios más detallados indican entre 4 y 5 veces (Richardson *et al*, 2006), con intervalos que van de 10 a 20 días entre una anidación y otra. En cada nido, las hembras pueden llegar a colocar en promedio de 100 a 200 huevos (Dobbs *et al*, 1999) y su periodo de incubación va de 50-60 días (Witzell, 1983; Chacon, 2004). Su ciclo de vida es muy parecido al esquema general de las todas las especies de tortugas marinas, con periodos largos para alcanzar la edad adulta y de apareamiento hasta la primera nidificación (**Figura 3**).

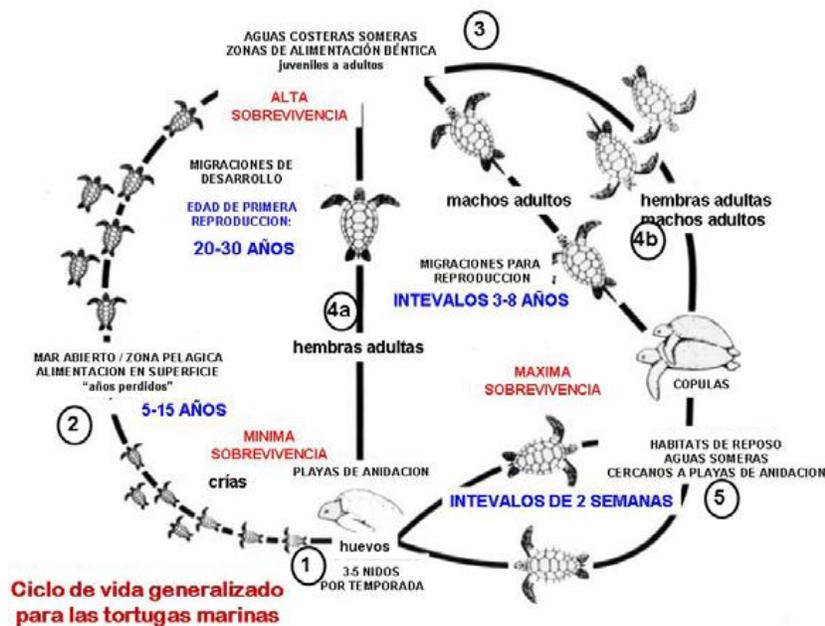


Figura 3. Ciclo de vida de la tortuga marina. Las tortugas marinas pasan la mayor parte de su vida en el mar. Luego de aparearse las hembras migran hacia las playas de anidación generalmente en la que nacieron, suelen llegar de noche. Después de la incubación (alrededor de 60 días) ocurre la eclosión. Los individuos ingresan al mar donde pasarán cerca de 20 años para que regresen las hembras a anidar (tomado de Abreu *et al*, 2005).

vi. Situación de la tortuga carey en la península de Yucatán.

México es el único país del Gran Caribe con una cantidad relativamente grande y creciente de nidos (Guzmán *et al*, 1995; Garduño y *et al*, 1999). En 1996 se registraron en total 4.522 nidos en los estados de Campeche, Yucatán, y Quintana Roo, lo que representa 56 veces más de nidos en comparación con el número de nidos protegidos en 1977 (Garduño *et al*, 1999). Se considera que los mayores niveles de anidación en el período 1977-1992 se explican sobre todo por los mayores esfuerzos de vigilancia, pero atribuyeron los aumentos entre 1993 y 1996, en que se maximizó la cobertura de la playa, a un verdadero cambio de población. En otro estudio en 1995 se llegó a la conclusión de que el mayor número de nidos registrado en el estado de Campeche en los últimos años, era indicio de una recuperación gradual y efectiva, y señalaron que el aumento en Campeche se había producido después de 17 años de protección de las playas (Guzmán *et al*, 1995).

La tortuga carey en particular presenta una grave reducción en anidaciones en la Península de Yucatán a pesar de los esfuerzos de investigación acerca de la abundancia de sus poblaciones, ya que la disminución ha sido de hasta un 63% en sólo 5 años (Abreu *et al*, 2005). Actualmente es claro que la tortuga carey presenta un ciclo de vida complejo en el espacio y el tiempo, lo que complica el monitoreo de sus poblaciones. Como consecuencia, los vacíos de información son importantes y es necesario extender los métodos de protección e investigación de la especie, tanto en su hábitat marino como terrestre. Especialmente en Yucatán existe muy poca o nula información que permita evaluar la magnitud del impacto sobre la tortuga carey (Abreu *et al*, 2005). Hasta el momento no se sabe con exactitud las causas de la disminución en el número de nidos presentes en esta región ya que en los últimos 10 años no se han documentado

mortalidades masivas, ni tráfico generalizado de productos de carey, por lo que debemos seguir planteándonos hipótesis que justifiquen su declive que vayan de la mano de investigaciones sobre su conducta en el mar.

vii. Posibles rutas de migración de la tortuga carey en el Caribe.

Eretmochelys imbricata en el Caribe ha sido estudiada a través de telemetría, marcaje y recaptura y observaciones directas, gracias a ello se han podido vislumbrar algunas de las posibles rutas que recorre (**Figura 4**). La ruta marcada en color amarillo que incorpora la península de Yucatán y las Antillas es la que nos permite apreciar el desplazamiento que tiene la especie en la región de nuestro estudio (Sisal, Yucatán).

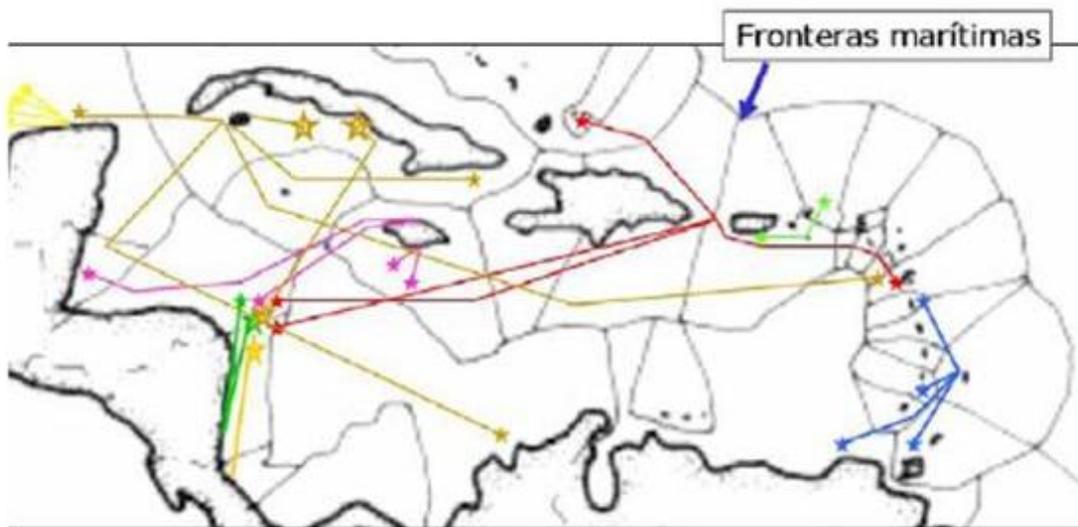


Figura 4. Las rutas migratorias aproximadas de la tortuga carey en el mar caribe (indicada por rastreos satelitales), de acuerdo al diagnóstico del estado de la tortuga carey realizado en marzo del 2005 en Telchac Puerto, Yucatán. (Imagen tomada Abreu *et al*, 2005)

III. AREA DE ESTUDIO

La localidad de Sisal se encuentra en el Golfo de México en la Península de Yucatán dentro del municipio de Hunucmá. Sus coordenadas geográficas son 21°01'59.99"N 89°45'00"O y se encuentra a una altitud de 1 msnm.

Sus playas albergan diversas especies animales residentes y migratorias como aves, reptiles y mamíferos. Los ecosistemas que dominan esta región lo constituyen manglares, dunas y ciénagas. Las especies marinas están representadas principalmente por el pulpo, el mero, carilla, lenteja, cherna, huachinango, bonito, camarón, jaiba y langosta. Dentro de las tortugas marinas que llegan a anidar en la playa están la carey (*Eretmochelys imbricata*) y la blanca (*Chelonia mydas*).

Para el interés del presente estudio, utilizamos *E. imbricata* ya que de acuerdo al diagnóstico de sus poblaciones del 2009 por la SEDUMA, esta especie presenta mayor número de huevos en nido y mayor índice de supervivencia al eclosionar. Además de contar con las facilidades de la Unidad Multidisciplinaria de Investigación y Docencia, de la Facultad de Ciencias de la UNAM, para el cuidado y protección de los juveniles de la tortuga carey, así como del campo tortuguero de anidación de esta especie (Figura 5).



Figura 5. Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Sisal Facultad de Ciencias, UNAM. (Izquierda). Tortugas de recién eclosión de *Eretmochelys imbricata* (derecha).

IV. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

- Existen diversos estudios acerca de la navegación en diversas especies de animales terrestres, sin embargo pocos estudios se han realizado en especies marinas. En particular aquellas que tienen rutas de migración como las tortugas marinas (Lohmann *et al* 2007). Entender los mecanismos biológicos en los que se basa la navegación en la tortuga marina permite entender mejor su conducta de migración y fortalecer los respectivos programas de conservación.
- El presente estudio representa una contribución original en el estudio de la especie *Eretmochelys imbricata* (tortuga carey) en relación a sus mecanismos de navegación en juveniles de corta edad que van de 1 a 4 días de vida.

V. HIPÓTESIS

- La **dirección de nado (navegación)** en tortugas de corta edad de la especie *Eretmochelys imbricata*, pudiera estar influenciada por **la posición del Sol (azimut)** y **corregida** por un **reloj circadiano**, de tal manera que la sincronización temporal a un día artificial con retraso de 6 h con respecto a la hora del amanecer natural, producirá un rumbo distinto con una corrección angular equivalente a 6 horas.
- La perturbación artificial del campo magnético terrestre a la cual pudieran ser sensible los individuos de la especie no interfiere con la orientación compensada por reloj circadiano.

VI. OBJETIVOS

i. Generales

- ✚ Determinar si existe preferencia en la orientación de nado en tortugas de 1 a 4 días de edad de *Eretmochelys imbricata* en cautiverio.
- ✚ Comprobar mediante la actividad locomotriz y la dirección de nado, si existe una regulación circadiana, que participe en la orientación respecto a la transición del Sol.
- ✚ Determinar si la confusión magnética artificial influye en la orientación compensada por reloj.

ii. Particulares

- ✚ Cuantificar y evaluar la dirección de nado de tortugas marinas juveniles de 1 a 4 días de edad provenientes de dos nidos distintos, en dos turnos del día natural, un matutino entre las 7:00 h y las 11:00 am y un vespertino entre las 16:00 h y las 19:00 h en:
 - a) Individuos previamente mantenidos en un fotoperiodo artificial luz-oscuridad (LO) 12:12, ajustado al fotoperiodo natural (fotofase 06:00 a 18:00).
 - b) Individuos mantenidos en fotoperiodo LO 12:12 retrasado 6 h (fotofase 12:00 a 24:00) durante al menos tres días.

En ambos casos (a y b) evaluar la dirección de nado en tortugas sin imán (controles) y con imán adherido al caparazón.

- ✚ Describir el perfil de actividad promedio en juveniles de la especie desde 1 a 4 días de edad, ante fotoperiodo natural.

VII. MATERIAL Y MÉTODO

Las tortugas se obtuvieron de dos nidos distintos vigilados por el personal del Campo Tortuguero en Sisal bajo supervisión de la SEDUMA Mérida, Yucatán. Con permiso de SEMARNAT SGPA/DGVS/02507/10 y se mantuvieron en la UMDI Sisal hasta su liberación.

En total se observaron 160 individuos que tenían desde 1 a 4 días de edad, los cuales fueron registrados en la localidad de Sisal, Yucatán (21°01'59.99"N 89°45'00"O). Se realizaron dos colectas de datos en dos fechas distintas. Las tortugas del primer nido se registraron del 7 al 10 de julio de 2010 (N=91) y se obtuvieron del campo Tortuguero a unos 0.70 km de la UMDI Sisal alrededor de las 5:30 am. Las tortugas del segundo nido se registraron del 17 al 19 de agosto de 2010 (N=70) y fueron colectadas en la playa virgen de Sisal aproximadamente a 0.90 km al este de la UMDI alrededor de las 6:00 am, de estas se desconoce el número de horas que permanecieron fuera del nido previa colecta. Ver mapa de ubicación de zonas (**Figura 6**).

Inmediatamente después de su captura los individuos fueron trasladados al área de nutrición de la UMDI y colocados en contenedores rectangulares (40X60X30 cm) con circulación constante de agua marina oxigenada por burbujeo (25.86 mg/L), temperatura (27.9 °C) y salinidad (35 ppm) constantes. La profundidad del agua se mantuvo aproximadamente en 12 cm y cada contenedor contuvo entre 10 y 12 individuos.

Todas las tortugas fueron previamente aclimatadas a dichas condiciones de 24 a 72 horas antes de ser registradas en la tina de observación al aire libre. Debido a que se utilizó un solo nido por salida todo individuo observado fue regresado a su tarja de aclimatación y liberado al atardecer una vez concretado el turno vespertino de registro por día.

Del total de individuos registrados al aire libre (N=153) 94 se mantuvieron previamente en fotoperiodo artificial LO 06:00-18:00, 59 tuvieron un previo retraso de fotoperiodo de 6hrs LO 12:00-24:00 durante al menos tres días completos, y 7 más estuvieron en registro de actividad locomotriz individual por cuatro días ante el fotoperiodo natural.



-  Campo Tortuguero de SEDUMA latitud: 21°09'54.05" N; longitud: 90°02'16.51" O
-  UMDI Sisal latitud: 21°09'48.71" N; longitud: 90°02'50.27" O
-  Ubicación de zona de registros latitud: 21°09'55.33" N; longitud: 90°02'48.54" O
-  Nido 1 latitud: 21°09'54.05" N; longitud: 90°02'16.51" O
-  Nido 2 latitud: 21°09'38.84" N; longitud: 90°03'23.76" O

Figura 6. Mapa de ubicación de zonas del área de estudio. Desde zona de obtención de individuos hasta área de registros fotográficos.

VIII. PROTOCOLO EXPERIMENTAL GENERAL

i. Registro Fotográfico de Orientación de Nado

Todas las observaciones fueron hechas entre Julio y Agosto, meses en los cuales inicia la temporada de eclosiones de los nidos de *Eretmochelys imbricata* en la localidad de Sisal, Yucatán.

Todas las tortugas registradas de manera fotográfica fueron colocadas una a una en una tina circular de hule de 2 m de diámetro por 40 cm de altura. Este fue llenado de agua marina a una altura de 15 cm y fue colocado en la playa al aire libre a 200 metros del área de acondicionamiento de animales. La tina estuvo descubierta en todo momento de manera que los individuos pudieran ver únicamente el cielo. La pared de la tina bloqueó la vista a la playa, al mar e inclusive el horizonte natural y los alrededores como vegetación y rocas.

Durante las pruebas de orientación de nado cada tortuga fue atada a un hilo de nylon transparente con una liga que rodeaba su caparazón. De este modo la tortuga fue atada a un brazo giratorio montado al centro de la tina (**Figura 7**).

El registro fotográfico se realizó con una cámara digital Panasonic Lumix DMC-F3 de 12 megapíxeles montada en un trípode por fuera de la tina de observación. Este se llevó a cabo al aire libre por día en dos turnos, matutino entre las 7:00 h y 11:00 h y el vespertino entre las 16:00 h y las 19:00 h. A los animales se les permitió nadar libremente durante 10 minutos antes de tomar las muestras, con el fin de minimizar la posibilidad de que la orientación en la que se colocó cada tortuga influyera en la dirección en la que posteriormente nadara. La toma de muestras después de los 10 minutos iniciales, consistió en la toma una foto cada 20 segundos durante dos minutos.

Los registros se fueron realizando, mediante la observación alternada de una tortuga con y sin imán. El imán usado fue de material de neodimio (NbFeB), obtenido de juguetes “magnetix” y con forma circular de 4 mm de diámetro y 2.5 mm de alto, el cual fue adherido con plastilina en su caparazón. Los organismos que fueron observados y registrados en el turno de la mañana, fueron usados también para el turno de la tarde del mismo día antes de ser liberados. No hubo distinción en la tarde, de los animales que fueron observados con imán en la mañana.

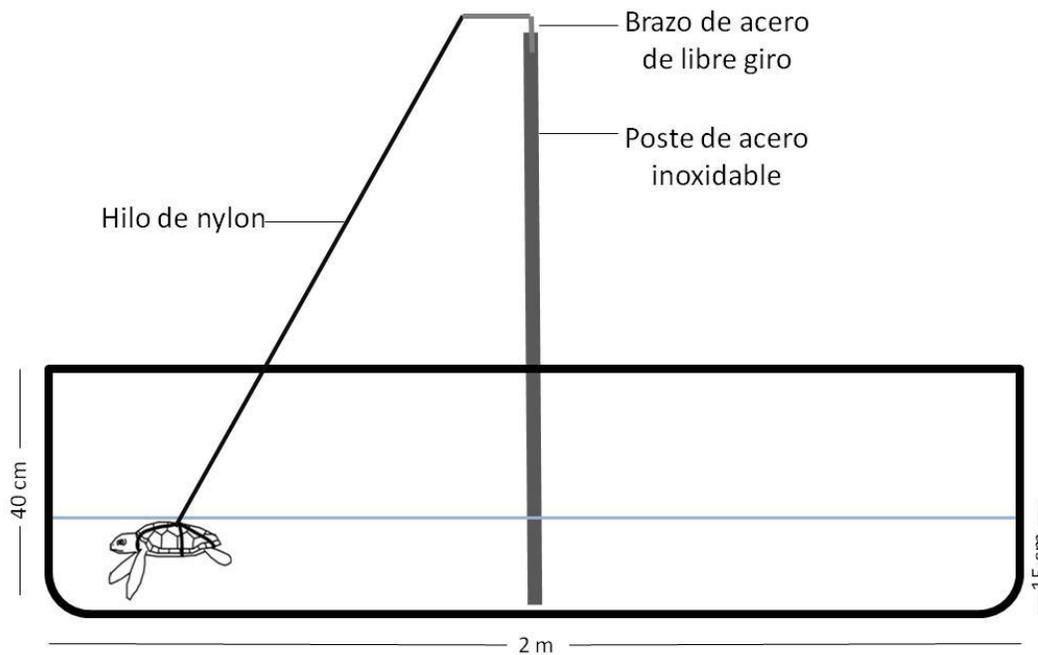


Figura 7. Diagrama de la arena de observación para el registro fotográfico. Cada tortuga fue con una liga y amarrada a un brazo de acero de libre giro con un hilo de nylon. Los registros de la orientación de nado se realizaron cada 20 segundos en un lapso de 6 minutos.

ii. Registro de Actividad Locomotriz (RALM)

El protocolo de RALM se llevó a cabo únicamente con individuos provenientes del primer nido en la salida al campo del 7 al 10 de julio del 2010, dicha prueba no fue posible repetirla con individuos del segundo nido ya que el sistema portátil de registro presentó fallas técnicas. Debido a la cantidad de acuarios disponibles y a la cantidad de canales disponibles del sistema de registro, únicamente se llevó a cabo el registro de 7 individuos.

Cada una de las tortugas que ingresaron a RALM se colocó por separado en acuarios de acrílico rectangulares (40 cm de largo, 12 cm de ancho y 12 cm de alto). Una vez montado el dispositivo de registro de actividad se mantuvo en un cuarto aislado dentro de las instalaciones de la UMDI (Ver **Figura 13**).

Los acuarios fueron llenados con agua marina con 35 ppm de salinidad, a temperatura y condiciones de luz natural y en tenue pero constante circulación. Esto último para eliminar el posible ruido debido al movimiento del agua no generado por los organismos.

En particular estos individuos no fueron alimentados constantemente sino que se les colocó pasta de jaiba en los acuarios desde el inicio de su registro en caso de que tuvieran la necesidad de ingerirla. De este modo también evitamos interferir el registro con un proceso de limpieza y de alimentación constante.

Estos individuos fueron monitoreados a partir de 24 horas de haber eclosionado y se liberaron tres días después al atardecer, una vez concluido el registro fotográfico de los individuos observados en campo.

IX. MANIPULACIÓN DE ANIMALES

i. Acondicionamiento para Registro de Orientación de Nado

Fotoperiodo LO 12: 12 sin retraso. (Fotofase 06:00-18:00 h)

- Todos los organismos recuperados de la eclosión fueron colocados en acuarios en el área de Nutrición de la UMDI con circulación constante de agua marina oxigenada por burbujeo (25.86 mg/L, 27.9 °C) y salinidad (35 ppm). El Nido 1 fue ingresado a las 8 am del 6 de julio del 2010. El Nido 2 fue ingresado a las 6 am del 16 de agosto del 2010.
- Se les dejó a disponibilidad alevines vivos, pulpa de jaiba y pescado para su alimentación. (Figura 8).



Figura 8. Acuarios de acondicionamiento a Fotoperiodo Controlado. Los organismos fueron expuestos a distintos fotoperiodos antes de su registro al menos durante 3 días. Se observa el tubo de drenaje protegido por una malla y el chorro de agua filtrada. Cada acuario se usó para mantener máximo 12 animales.

Fotoperiodo LO 12:12 Con retraso. Fotofase 12:00-24:00 h

- Para los organismos en condiciones de fotoperiodo retrasado por 6 h, se aisló y adaptó un área de iluminación especial con las mismas condiciones de O₂, T y salinidad que las anteriores (**Figura 9**).
- El fotoperiodo fue programado con 2 focos de luz blanca conectados a un interruptor programable y este a su vez a la corriente de luz.



Figura 9. Acuarios de Fotoperiodo con Retraso. Se montaron dos áreas con fotoperiodos distintos. Los organismos con fotoperiodo retrasado se aislaron en un área cubierta por paño y plástico negro.

ii. **Acondicionamiento para registro de datos en campo**

- Cada tortuga fue atada con un hilo de nylon sujetado a una liga y por otro lado al poste con libre giro como se ve en la **Figura 10**.
- Al término de 10 minutos de nado exploratorio, cada individuo se registró en intervalos de 20 segundos, de modo que al finalizar se obtuvieron 6 por cada uno. Se intercalaron observaciones de tortuga control y con imán. Esto se llevó a cabo en dos turnos por día de 7 – 11 am y de 16–19 pm (**Figura 10 derecha**).
- El registro de animales para cada condición fue aleatoria, no hubo elección en particular
- Al final de cada día, los organismos observados fueron liberados en la playa



Figura 10. Manipulación de animales en campo. Cada individuo fue suavemente sujeto a una liga (izquierda) y ésta a su vez, a un brazo de libre giro con hilo nylon (derecha) dentro de la tina de observación. La tina no mostraba símbolos o imágenes en su interior y el fondo fue recubierto con arena.

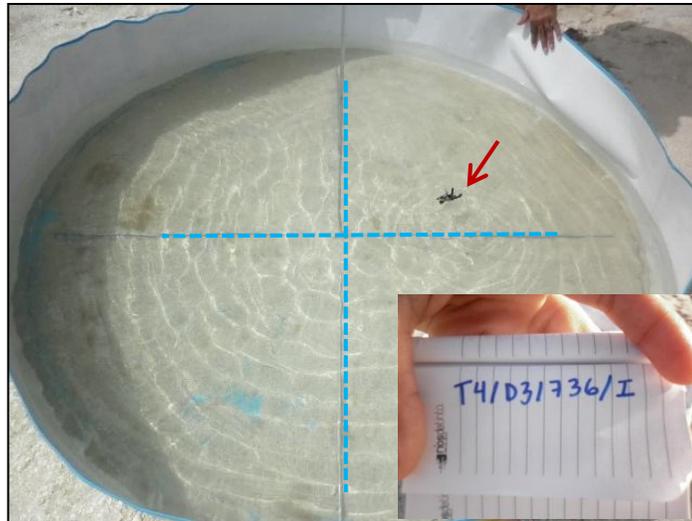


Figura 11. Colecta de Datos en campo. Cada registro fue etiquetado asignando de modo arbitrario el número de individuo, el día de registro y hora. Aquellas tortugas a las que se les colocó imán se anotaron con la letra "I". La etiqueta que se presenta indica el No. de organismo (T4), el día de observación (D3) la hora de observación (7:36) y si se registró o no con imán adherido al caparazón (I)

iii. Acondicionamiento para el Registro de Actividad Locomotriz.

- 7 individuos fueron colocados de modo aleatorio en acuarios separados bajo condiciones de iluminación natural indirecta, que existía a través de una ventana de la habitación donde se desarrollaba el registro (**Figura 12**).
- Cada acuario se conectó a un sistema automatizado de registro de actividad locomotriz, *ACTIBIO* diseñado por convenio entre el Laboratorio de Biología Animal Experimental de la Facultad de Ciencias y el Centro de Redes e informática (URIDES) de la Facultad de Psicología.
- Estos organismos permanecieron 4 días bajo dichas condiciones y se liberaron al final del cuarto día al atardecer.



Figura 12. Sistema de Registro de Actividad Locomotriz (RALM). Cada acuario tenía un flujo tenue y continuo de agua previamente aireada (se muestra la conectividad de la tubería) cada acuario contenía un par de sensores de luz infrarroja (que indicaban el cruce de la tortuga por la superficie del agua). El sistema de adquisición de datos fue acoplado en un cuarto continuo al de registro.

X. ANÁLISIS DE DATOS

Los registros fotográficos fueron utilizados para determinar la posición angular de cada tortuga proveniente de los fotoperiodos LO 12:12 con y sin retraso, con respecto al norte durante cada observación. Un promedio y un valor de r fueron calculados para cada ensayo mediante la prueba de Rayleigh de estadística circular (Batschelet, 1981). Para cada animal, se obtuvo el vector resultante de las seis observaciones (valor de r) y el nivel de significancia de la dirección dominante. El dato resultante fue considerado el dato para de un solo individuo. De esta manera fueron separados los animales que mostraban una dirección constante (cualquiera que fuera) y aquellos que tenían posiciones al azar durante la toma de las 6 fotografías.

Las comparaciones de vectores resultantes entre grupos se hicieron mediante la prueba de Mardia-Watson para estadística circular, la cual nos permitió determinar si existieron diferencias entre los resultados obtenidos de animales provenientes de un fotoperiodo LO 12:12 ajustado al natural o con retraso. Los análisis y gráficas correspondientes se hicieron mediante el paquete de cómputo estadístico Oriana.

Los datos de la actividad locomotriz fueron obtenidos cada 10 minutos de manera automática mediante el programa *ACTIBIO* y luego analizados y graficados mediante el programa *ACTIVIEW* (Minimitter) a manera de actogramas y curvas promedio de actividad.

i. Prueba de Rayleigh.

La prueba de Rayleigh es una prueba estadística para determinar si una distribución circular está dada al azar o no. Esto es, si los azimut de una distribución están aglomerados hacia una dirección en particular. Para rechazar la probabilidad de que dichos puntos están distribuidos azarosamente se considera una $p < 0.05$ (Batschelet, 1981).

ii. Prueba de Mardia –Watson.

Es una prueba no paramétrica que determina si dos o más muestras difieren significativamente una de otra entre los tratamientos. La diferencia podría ocurrir en el ángulo promedio, en la varianza angular o en ambas mediciones (Batschelet, 1981). Esta prueba fue utilizada para determinar si existieron diferencias entre los resultados obtenidos de grupos con diversos tratamientos en cada experimento o prueba. Es decir, si existieron diferencias entre grupos con y sin imán, así como grupos provenientes de un fotoperiodo con o sin retraso.

VIII. RESULTADOS

De las 140 tortugas totales observadas de ambos nidos, 117 (83%) presentaron una dirección significativa (cualquiera que esta fuera).

Del total de animales registrados en la primera salida al campo (n= 87), provenientes de un fotoperiodo LO 12:12 sin retraso y sin imán (n= 44), solamente el 30% no mostraron una dirección significativa, mientras que de aquellos con un imán adherido al caparazón (n= 43) el 40% no lograron mantener una dirección constante y significativa (**Figura 13**). De los 30 animales registrados bajo previo acondicionamiento a un fotoperiodo con retraso de 6 horas en el encendido de la luz (**Figura 14**) el 93% de ellos mostró una dirección significativa y solamente el 7% fueron erráticos.

TOTAL GRUPO SIN IMÁN



TOTAL GRUPO CON IMÁN

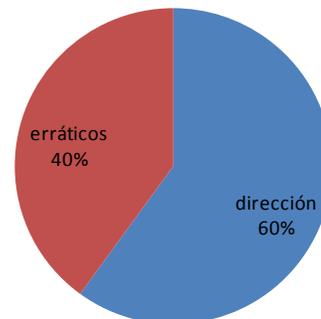


Figura 13. Porcentaje total de individuos con dirección significativa. En ambos diagramas se aprecia el porcentaje de individuos que mostraron una dirección significativa ($p < 0.05$ indicado en azul). De 44 individuos (izquierda) el 70% mostró una dirección constante significativa. De 43 individuos el 60% mostró una dirección significativa (derecha). Los diagramas que se muestran representan la suma total de organismos con dirección significativa que tenían desde 24 hasta 96 horas de edad.

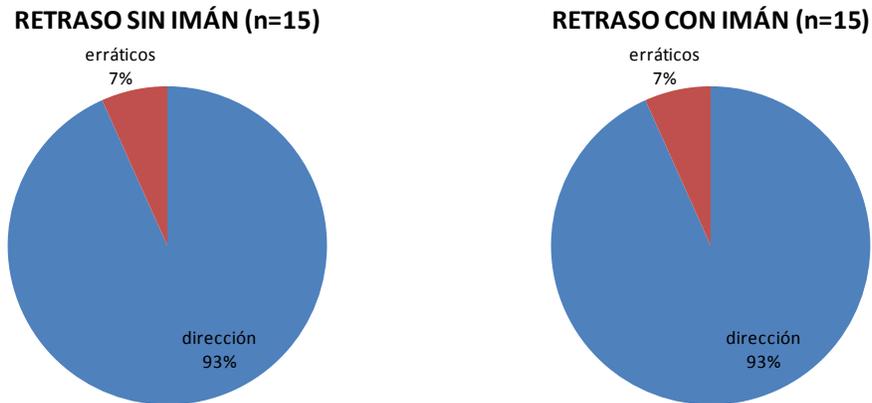


Figura 14. Se muestra el promedio de los organismos que tuvieron una dirección significativa ($p < 0.05$, en azul) y que se sincronizaron a un retraso de fase de 6h, dichos organismos fueron registrados a las 96 h de su eclosión. A pesar de la presencia del imán el porcentaje es mucho mayor para los organismos que tienen dicha dirección.

Las **Figuras 15, 16, 17, y 18** representan la orientación promedio de los organismos cuya dirección se mantuvo significativamente constante, no se consideró la edad de los mismos, únicamente si tuvieron o no orientación con $p < 0.05$. Cada posición de nado durante el registro fotográfico se le asignó un valor angular determinado con un transportador sobre la fotografía, los datos obtenidos fueron analizados con la prueba de Rayleigh y la comparación de la distribución entre grupos con la prueba de Mardia-Watson. Aquellos organismos que no mostraron dirección estadísticamente significativa no aparecen en el gráfico. Cada punto representa la dirección promedio de un individuo. La flecha que surge del centro de cada círculo, representa el vector promedio calculado para cada grupo. El círculo interior representa el nivel de significancia estadística ($p < 0.05$), por lo que si el vector resultante (r) rebasa este nivel de confiabilidad, se considera una dirección (Θ) con un 95% de probabilidad estadística.

i. Diagramas promedio de dirección de nado. Nido 1 (Salida del 7 al 10 de julio 2010)

a) Grupo Experimental I. Fotofase 06:00.18:00 Sin Retraso de Fase

La **Figura 15** muestra los diagramas promedio de la dirección de nado de 31 individuos registrados previo acondicionamiento a un fotoperiodo LO 12:12 de encendido de luz a las 06:00 y apagado a las 18:00 horas. Entre los animales con y sin imán no hay diferencias significativas de acuerdo a la prueba Mardia-Watson.

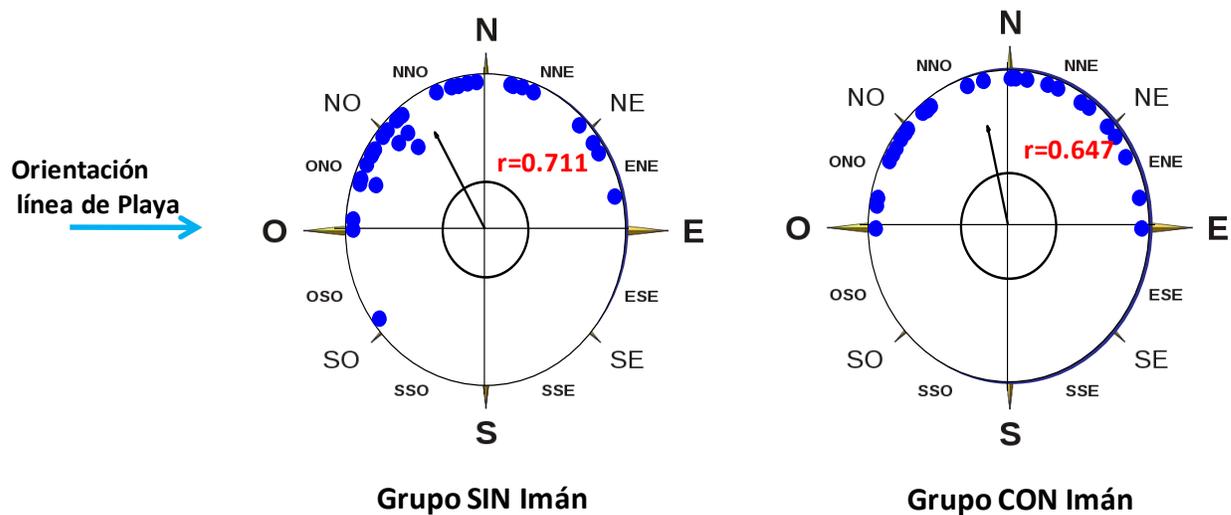


Figura 15. Ambos diagramas corresponden al promedio del grupo sin imán (izquierda) y con imán (derecha), cada punto azul representa la dirección promedio significativa de un individuo, aquellos que no mostraron dirección con $p < 0.05$ no se incluyeron en análisis. La playa se encuentra al sur y el mar hacia el norte de acuerdo a la orientación de la línea de playa (indicada por la flecha azul) En ambas figuras se muestra en rojo el valor de la r de cada grupo, siendo estas significativas, de modo que el vector de orientación de nado indica la preferencia de los grupos hacia el Nornoroeste.

b) Grupo Experimental II. Fotofase 12:00 – 24:00. Con Retraso de Fase

Los diagramas promedio que se muestran en la **Figura 16** son el resultado de aquellos individuos sometidos a un previo acondicionamiento por cuatro días a un fotoperiodo LO 12:12 con encendido de luz a las 12:00 y apagado a las 24:00 horas, es decir, CON un RETRASO en el encendido de luces equivalente a 6 horas. Aunque hay una clara orientación significativa no se presentaron diferencias significativas entre estos dos grupos.

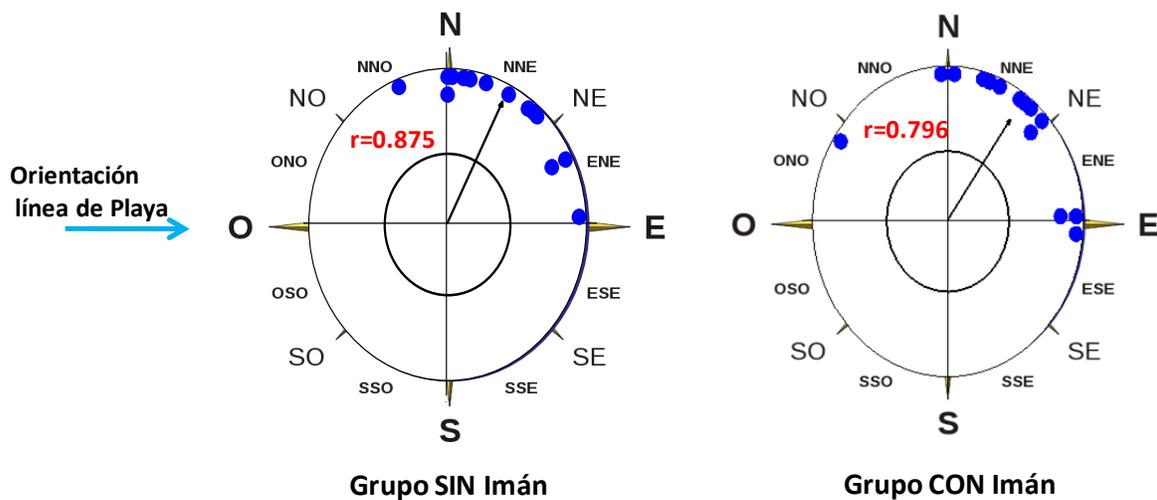


Figura 16. Se muestra el vector promedio de orientación de nado, en ambos casos con r significativa. A diferencia de los anteriores se observa una dirección distinta con preferencia de nado hacia el Nornordeste.

Para saber si existen diferencias significativas mediante la prueba de Mardia-Watson entre los grupos con y sin retraso observamos que la dirección es significativamente distinta entre ellos ($p=0.002$) lo que indica que la preferencia de dirección de nado es influenciada por el retraso en el

fotoperiodo y por lo tanto por un reloj circadiano, el cual al re sincronizarse a un fotoperiodo retrasado, genera una referencia con una desviación angular de cerca de 60°. En general en los resultados obtenidos, el uso del imán en el caparazón, no parece influir en la preferencia de orientación regulada por la orientación solar, ya que no existen diferencias significativas entre los grupos con y sin imán.

ii. Diagramas promedio de dirección de nado. Nido 2 (Salida del 17 al 19 de agosto 2010)

c) Grupo Experimental I. Fotofase 06:00 – 12:00. Sin retraso de Fase

Como en el caso anterior, las siguientes figuras representan el promedio de la dirección de nado de los organismos que tuvieron un previo acondicionamiento a un fotoperiodo LO 12:12 SIN RETRASO (Figura 17). No se existieron diferencias significativas al comparar ambos grupos.

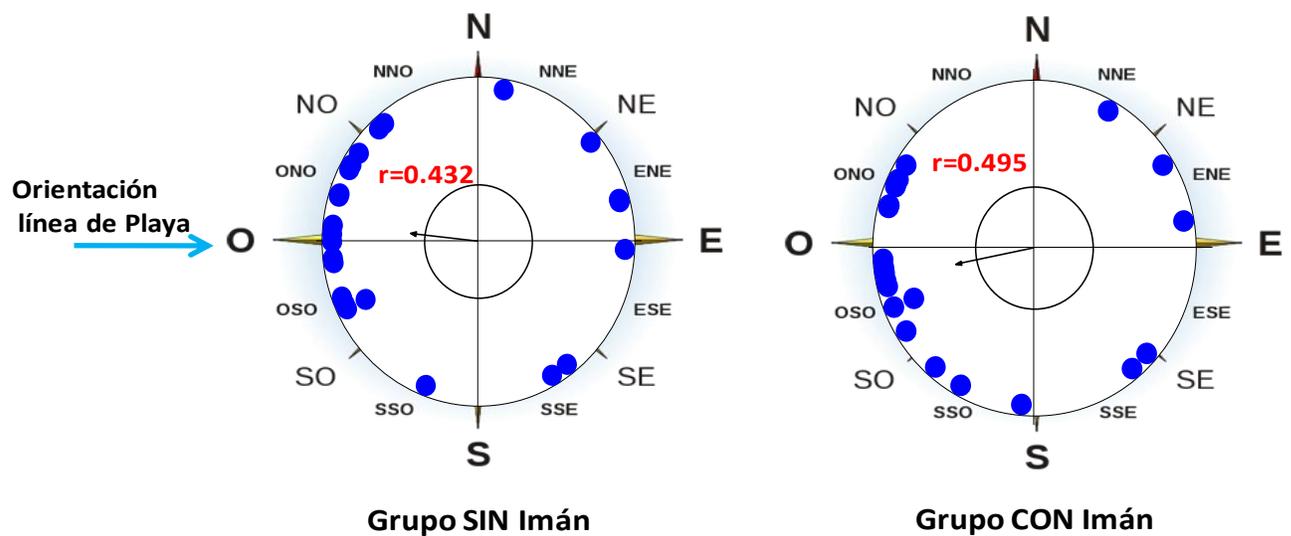


Figura 17. En este caso podemos observar que el grupo de organismos sin imán (izquierda) tienen una orientación promedio hacia el oeste y el grupo con imán tiende hacia el oeste suroeste (derecha). Ambos vectores de orientación promedio son significativos ($p < 0.05$).

d) Grupo Experimental II. Fotofase 12:00 – 24:00. Con Retraso de Fase

La siguiente figura representa el promedio de la dirección de nado de los organismos que tuvieron un previo acondicionamiento a un fotoperiodo LO 12:12 CON RETRASO (Figura 18). Se puede observar que no existe una orientación significativa para ninguno de los dos grupos por lo que no se puede decir que exista un resultado semejante al del Nido 1. Sin embargo existe una tendencia del vector promedio hacia el Sur. No se encontraron diferencias entre los grupos.

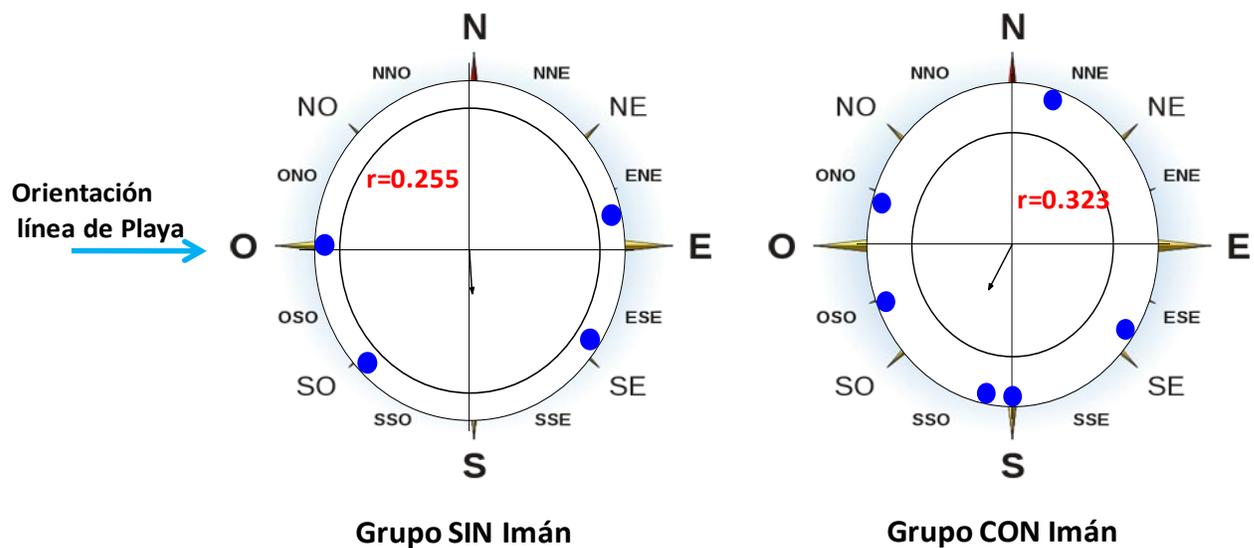


Figura 18. En el caso de los organismos con retraso de fotoperiodo, pocos tuvieron una dirección significativa, al incluirlos en el análisis para la orientación de nado promedio no fueron significativos.

iii. Registro de Actividad Locomotriz.

Las **Figuras 19 y 20** muestran los actogramas y curvas de actividad promedio de organismos registrados en *Actiview* en condiciones de iluminación natural. Estos individuos se ingresaron durante la primera salida al campo el 7 de julio del 2010 a las 8:30 am y se sacaron del sistema de registro el 10 de julio alrededor de las 12:00 horas, para que fuesen liberadas por el atardecer por personal capacitado del campo tortuguero de la SEDUMA.

i. Diagramas de Actividad (Actogramas)

La **Figura 19** muestra tres ejemplos representativos del registro de actividad locomotriz de tres organismos, durante tres días continuos a partir de su colecta. La actividad está representada en forma de actogramas de doble gráfica, donde el día siguiente aparece a la derecha y se repite debajo. Se indica del lado izquierdo una representación gradual de fotoperiodo, debido a que fueron expuestos a iluminación natural indirecta, por lo que las transiciones de día a noche no fueron súbitas como se indica en las barras de luz y oscuridad.

En todos los organismos se observó un comportamiento semejante, la actividad locomotriz se presenta diurna-crepuscular, es decir, con más intensidad en las transiciones de amanecer y de atardecer. Los niveles de actividad fueron variables entre organismos, pero el mismo patrón básico de actividad se observó en los 7 animales en registro.

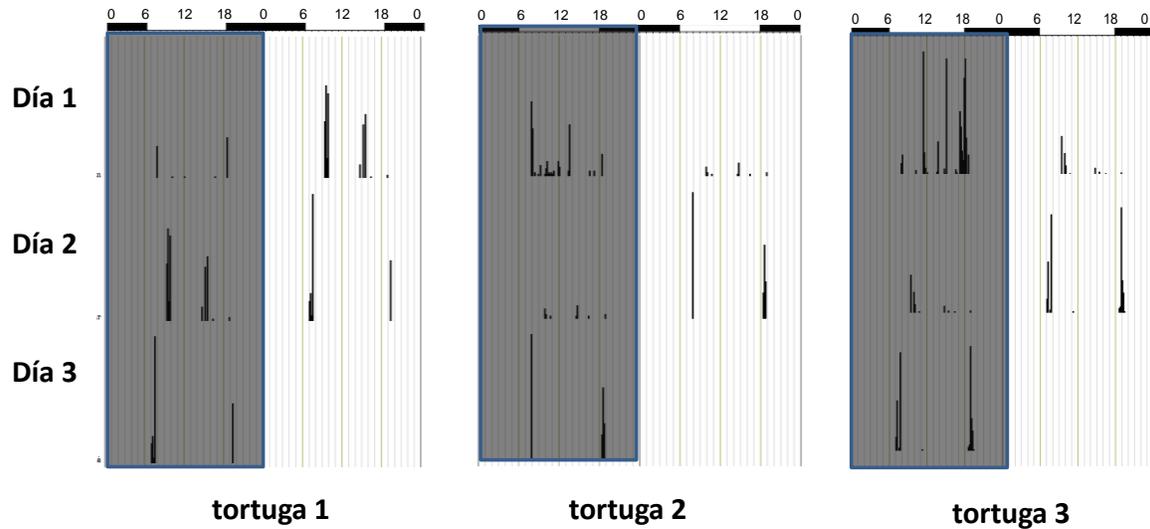


Figura 19. Se muestran tres actogramas de registros de actividad locomotriz, en ellos se aprecia que la actividad se distribuye de manera diurna-crepuscular. De lado izquierdo en cada actograma se representa la transición gradual del fotoperiodo.

ii. **Curvas Promedio de Actividad (Figura 20).**

e) *Grupo Experimental III. Fotoperiodo Natural*

Se muestran únicamente 6 curvas promedio de actividad de tres días consecutivos ya que el canal 7 presentó fallas técnicas para el registro. La actividad promedio muestra que la mayor parte de los movimientos se presentó en las horas alrededor de la transición del amanecer y del atardecer. Cabe señalar que en las gráficas aparece una barra que representa la fotofase y la escotofase, sin embargo debe considerarse que la transición en la iluminación es gradual y que solo corresponde en la gráfica a la hora de amanecer y del ocaso. La magnitud de la actividad para cada curva corresponde a una escala de máximo 50 interrupciones por cada 10 minutos (unidad de muestreo del sistema automatizado de registro).

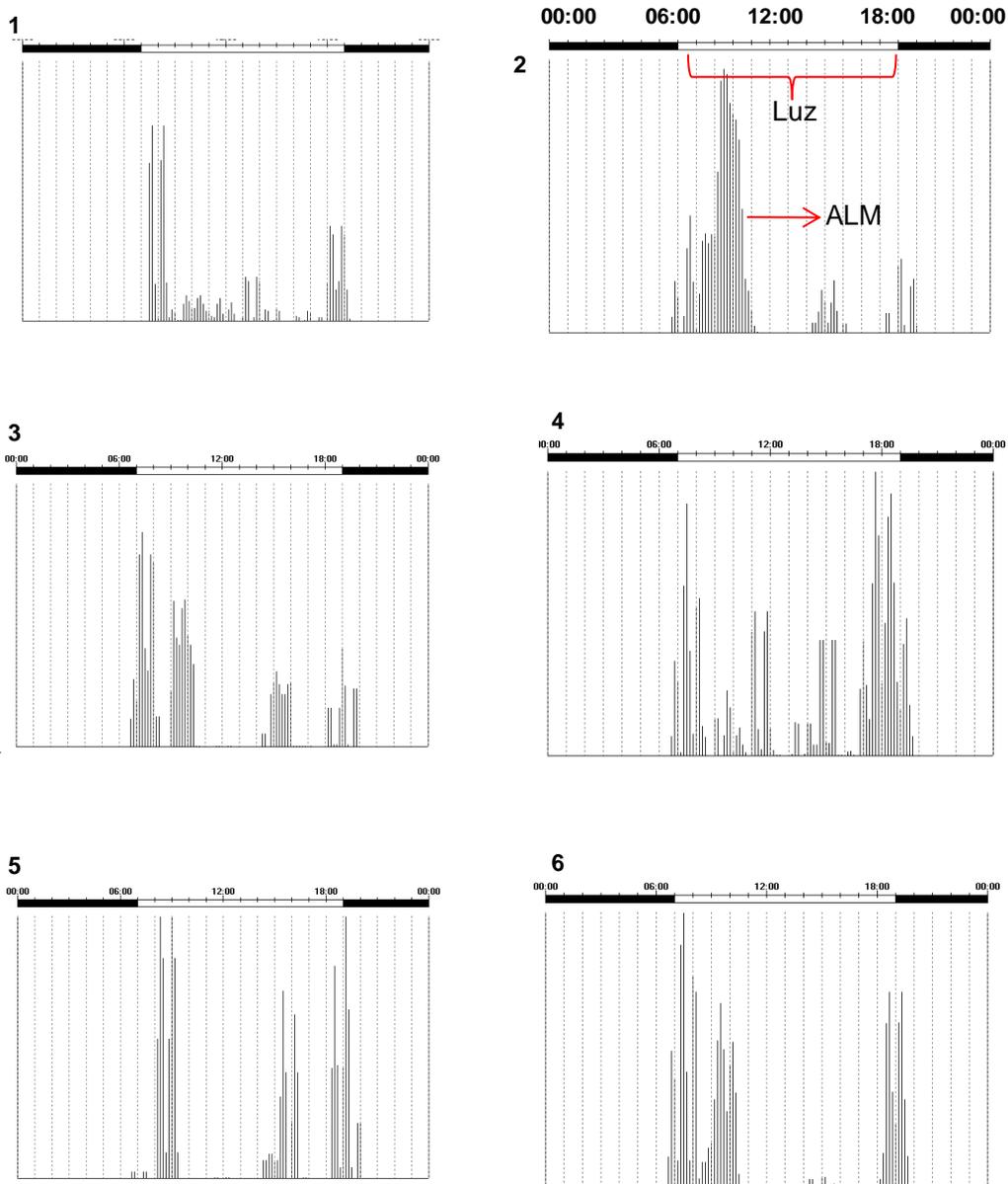


Figura 20. Curvas promedio de actividad de 6 individuos. En el esquema del individuo 2 se indica en la barra superior la trayectoria de la luz durante un periodo de 24h, la barra negra indica oscuridad y la blanca luz. **ALM**: Actividad Locomotriz. En todos podemos observar el RALM anticipado a la llegada de la luz y de mayor amplitud (crepuscular). Durante el transcurso del día todos presentan actividad bimodal, la cual se amplifica al atardecer (18:00 horas).

XII. DISCUSIÓN

Si bien el fenómeno de migración pudiera parecer muy costoso en términos energéticos para cualquier especie, el desplazamiento de comunidades animales a distintos ambientes propicia su supervivencia. Es gracias a ello que pueden alimentarse, desarrollarse y reproducirse de manera cíclica en la naturaleza. En el reino animal esta conducta se presenta en un gran número de taxa y conlleva alteraciones fisiológicas y conductuales importantes caracterizadas por los cambios ambientales diarios y estacionales de nuestro Planeta. Por décadas diversos investigadores se han preguntado acerca de cuáles son y en qué medida se relacionan los distintos mecanismos que subyacen la conducta migratoria de las especies para guiarlos en su trayectoria.

Las tortugas marinas han llamado la atención de manera importante para el estudio de las migraciones, sobre todo por el interés que se ha tenido en conservarlas en cualquiera de sus etapas del ciclo de vida y en los diferentes hábitats que ocupa.

Diversos tipos de estímulos han sido investigados en estos organismos, sin embargo por su tipo y naturaleza, han llegado a considerarse como claves o referencias poco confiables, tal es el caso de los estímulos visuales, olfativos y auditivos. No así el caso de los mecanismos de compás propuestos por otros investigadores, ya sea magnético como lo indica Lohmann en sus diversos estudios (1994, 1996, 2001, 2003 y 2008) y en nuestro estudio el solar, ya propuesto en invertebrados y vertebrados (Revisado en Avens y Lohmann, 2003) así como en especies de tortugas marinas como *Chelonia mydas* (Mott y Salomon, 2011).

Cualquiera que sea el mecanismo que creemos pudieran utilizar las tortugas en migrar, para llevarla a cabo se requiere de una mínima información que las guíe por sí mismas a su objetivo, y es gracias a esta, que son capaces de regresar a una localidad en particular. Se dice entonces que

poseen la capacidad de desarrollar (aprender) uno o varios mapas y se valen de un compás que las guíe a través del mar hasta su objetivo. El mapa les permite determinar la posición de su blanco, mientras que el compás le ayuda a mantener una dirección apropiada. A pesar de que existe una variedad de recursos que pueden brindar información en cuanto a su posición, las investigaciones más recientes revelan la existencia de un compás magnético capaz de percibir y discernir entre componentes geomagnéticos; aunque de este todavía no sabemos si se trata de una sola estructura o de un sistema integral de componentes a nivel de cerebro, que desencadenan una serie de reacciones químicas, a través de las cuales el organismo puede percibir el campo magnético Terrestre. En el mismo tenor, sabemos que existe otro mecanismo y quizá menos estudiado que propone la utilización de un compás solar para aquellos organismos marinos que nadan cerca o en la interfaz aire-agua. El ya descrito por Hoffman en aves migratorias, y del cual Lohmann no asegura su ausencia en sus trabajos con Aves en 2003, y vuelto a ser sugerido nuevamente para tortugas marinas por Mott y Salmon, en 2011.

Por ello, y como propósito fundamental de este proyecto, se investigó el papel de la posición del Sol en la conducta de dirección de nado de las crías de *Eretmochelys imbricata* que emergen en las playas de Sisal, Yucatán.

Nuestros resultados, indican que existe un mecanismo alternativo que permite la orientación de nado de los juveniles de la especie y que pudiera ser utilizado de forma adicional a la de un compás magnético. La posibilidad de que este mecanismo dependa de una organización circadiana madura al momento de nacer, se manifiesta en el perfil diario de actividad, obtenido de manera continua durante tres días, y que indica que las tortugas de la especie posiblemente nacen con un sistema circadiano maduro que puede integrar la información del azimut solar (**Figuras 19 y 20**).

La rotación de la Tierra imprime información relevante para la supervivencia de una especie y sus comunidades. El transcurso del día a la noche es el principal *Zeitgeber* o sincronizador de los procesos biológicos rítmicos de la mayoría de los organismos. La transición de la luz es cíclica, y afecta el periodo y la amplitud de los ritmos biológicos (Moore-Ede *et al*, 1981).

Hasta el momento no se han encontrado argumentos suficientes que nos permitan descartar que la información proveniente de la posición del Sol en el horizonte, también provee elementos de orientación y que necesariamente los organismos, en este caso las tortugas marinas, deben compensar con un reloj circadiano conforme este astro transcurre en el horizonte (aproximadamente 15° por hora) durante el día (Shmidt-Koenig *et al*, 1991; Mott y Salmon 2011).

Avens y Lohmann (2003) reportaron en crías de tortuga verde, que cuando las señales tanto lumínicas (visuales) como magnéticas eran bloqueadas, no pueden orientar su nado en ninguna dirección; sus experimentos no sólo sugirieron que estos organismos eran capaces de orientarse en la ausencia de una u otra señal, sino que pudiese existir la utilización de señales provenientes del Sol que permiten su orientación. Recientemente se ha descrito que para *Chelonia mydas*, la orientación solar compensada por reloj circadiano, persiste aún ante la confusión magnética de los individuos estudiados (Mott y Salmon, 2011). Para dilucidar si efectivamente existe un compás solar en la especie *Eretmochelys imbricata* nos dedicamos a estudiar su conducta de orientación de nado en tortugas de 24 a 72 horas de eclosión. De este modo pudimos comprobar en primera instancia que una vez transcurrida la actividad de “impronta”, los individuos son capaces de orientarse significativamente en dirección al nornoroeste (ver Resultados, **Figuras 15**) y que aún después de dicha actividad los organismos expresan su principal fase de actividad al amanecer y al atardecer (**Figura 19**).

Con el fin de probar nuestra hipótesis y poder pensar en la existencia de un compás solar en la especie, registramos la orientación de nado en individuos expuestos a dos fotoperiodos artificiales distintos, de modo que aquellos ajustados a la transición natural del Sol (ciclos diarios con 12 h de luz) y sin distorsionar su capacidad de percibir el campo magnético terrestre, conformaron nuestro grupo control principal (**Figura 15**) y aquellos ajustados a una transición solar retrasada por 6 horas (respecto al control) con una distorsión respecto al campo geomagnético, conformaron nuestro grupo experimental más relevante (**Figura 16, derecha**), ya que estos fueron desplazados de su horario natural a nivel de reloj y a su vez fueron “intencionalmente” confundidos para percibir cualquier señal magnética terrestre que pudiera orientarlas.

Estudios preliminares de Avens y Lohmann (2003) demuestran que la presencia de observadores alrededor de la tina o arena de observación no influyen de manera significativa en la orientación de nado. Esto también es consistente con tortugas de recién eclosión en los estudios de Salmon y Lohmann (1989) y Witherington (1991). Inclusive es de esperarse que esto sea así ya que fuera del agua las tortugas marinas tienen miopía (Ehrenfeld y Koch, 1967).

Una o más tortugas fueron reemplazadas únicamente si máximo en un periodo de 3 minutos durante el periodo de nado exploratorio no presentaban la conducta de nadar y permanecían con los miembros anteriores y posteriores pegados al cuerpo y sin movimiento flotando en la superficie, una conducta que observamos también cuando se presentaron días con abundante lluvia en la salida del mes de Julio o ante un descenso de temperatura (figura 22).

En estudios realizados por Avens y Lohmann (2003) también se ha indicado que al inicio las tortugas nadan en diferentes direcciones pero usualmente se orientan de modo consistente

conforme pasa el tiempo, esto puede ser durante el proceso de aclimatación o bien durante los días de prueba de nado. Esto es muy relevante en nuestro estudio ya que es fundamental que se presente dicha conducta para los procedimientos experimentales que utilizamos durante el registro.

i. Individuos sin imán sincronizados a Fotoperiodo LO 12:12 con Fotofase 06:00- 18:00 h (Figuras 15 y 17).

En ambos nidos la persistencia de la orientación de nado fue significativa, sin embargo el nido 1 tiene una r mucho mayor (0.731) y una dirección promedio al NNE, es decir, la dispersión fue más grande en el nido 2 ($r = 0.432$) con una dirección promedio al SE la diferencia en este parámetro pudiera deberse a diferentes factores que no tomamos en cuenta al realizar las pruebas. En primer lugar, los individuos fueron obtenidos de nidos distintos y que emergieron en zonas distintas. El nido 1 emergió en el campo tortuguero ubicado en la playa donde se realizó todo el registro fotográfico, el nido 2 emergió en la playa ubicada al oeste de la UMDI, dicho nido por lo tanto no fue removido para incubarse en el campo tortuguero. En segundo lugar observamos que la alimentación, aunque no se cuantificó, fue mejor en los individuos del nido 2 ya que no encontramos restos de alimento en las tinas de mantenimiento a partir del segundo día, en su lugar encontramos heces fecales notables. Los nidos fueron estudiados en fechas distintas con diferencia de un mes y aunque las condiciones climáticas fueron similares, las condiciones dentro del iglú de mantenimiento, cambiaron en cuanto a ruido y actividad humana, principalmente porque durante el periodo de mantenimiento del nido 2 se desarrolló a la par un experimento de camarón en las tarjas contiguas. Todas estas observaciones pudieron intervenir en nuestros resultados, sin embargo sus efectos no fueron comprobados.

Por otro lado, esta diferencia pudiera deberse a las condiciones locales en donde emergieron los nidos, al parecer, el suelo puede imprimir cierta información en particular que pudiera ser utilizada como señal para guiar a las tortugas hacia el mar. Sin embargo el oleaje, los factores químicos y señales visuales en el suelo no han sido reportados como señales importantes en la conducta de orientación (Avens y Lohmann, 2003).

ii. Individuos con imán sincronizados a Fotoperiodo LO 12:12 con Fotofase 06:00-18:00 h (Figuras 15 y 17)

Los resultados de esta prueba son consistentes con los resultados obtenidos en otros estudios con tortugas juveniles, en los que ya se ha reportado una desorientación importante en organismos que son perturbados con un imán que genera un campo magnético distinto y mayor al terrestre (Avens y Lohmann, 2003 y 2004). No obstante, nuestro protocolo tuvo el fin de investigar acerca del papel de la luz solar en dicha orientación, por lo que permitimos la visibilidad de la luz proveniente del Sol en todos los registros con imán. En la **Figura 13** podemos observar que el porcentaje de organismos que no mostraron una dirección significativa fue mayor en el grupo con imán (40%). Definitivamente el colocar un elemento que distorsiona la sensibilidad al campo terrestre genera una cierta desorientación, pero debido a que existe un porcentaje considerable de organismos que lograron expresar una dirección significativa podemos considerar que existen otras fuentes de orientación para dicho grupo, las cuales fueron investigadas durante las pruebas en organismos con retraso de fotoperiodo.

**iii. Individuos sin imán sincronizados a Fotoperiodo LO 12:12 con Fotofase 12:00 – 24:00 h
(Figuras 16 y 18)**

Este grupo nos permitió comprobar que los organismos son capaces de sincronizarse al fotoperiodo artificial con una diferencia angular distinta a la de los grupos control sin retraso en el fotoperiodo; sin embargo esto sólo ocurrió en los animales del nido 1 (**Figura 16**) ya que durante la prueba con los individuos del nido 2 nuestro tamaño de muestra fue muy pequeña debido a que se presentó lluvia intensa y relámpagos durante el registro, lo cual detuvo dicho muestreo. De la cantidad de individuos que pudimos registrar pocos tuvieron una dirección significativa, lo que al final se reflejó en un vector promedio por debajo del nivel de significancia y un valor de r muy bajo, es decir, un grupo con alto grado de dispersión.

**iv. Individuos con imán sincronizados a Fotoperiodo LO 12:12 con Fotofase 12:00 – 24:00 h
(Figuras 16 y 18)**

Como en el caso anterior, este grupo, además de mostrar una dirección significativa distinta nos revela que a pesar de ser perturbados con un imán, los organismos son capaces de compensar el retraso en el fotoperiodo.

Hasta el momento, no conocemos el papel que juegan otras señales que provean de información direccional en tortugas recién eclosionadas. Koch *et al* (1969) describió que bajo ciertas condiciones pudieran ser relevantes los gradientes químicos, en 1980 (DeRosa y Taylor) y posteriormente Hawryshyn *et al* en 1990, mencionaron la importancia de factores celestiales como el Sol y la luz polarizada; sin embargo de ellas no se había comprobado si efectivamente cualquiera de ellas son utilizadas por tortugas juveniles o adultas. En este proyecto, nuestros

resultados indican que las tortugas juveniles de carey son sensibles a las señales de luz provenientes del Sol para orientar y dirigir su conducta de nado.

En este grupo, el 83% de los individuos mostraron una dirección significativa a pesar de colocarles un imán. Sin mermar la importancia que tenga la presencia de las señales magnéticas, es claro que al estar disponibles las señales lumínicas los organismos juveniles de esta especie son capaces de mantener una dirección constante.

Para comprobar lo anterior, la prueba de Mardia-Watson nos indicó diferencias significativas entre los grupos con y sin retraso ($p = 0.001$) esto corrobora nuestra hipótesis en que la dirección de nado está influenciada por un reloj circadiano capaz de compensar la transición de la luz en el horizonte (**Figura 15 y 16**).

Incluso en previas investigaciones de Lohmann (2003) se menciona que al privar a tortugas de señales visuales y magnéticas la desorientación en nado es evidente en *Caretta caretta*, pero aquellos que tuvieron acceso a las visuales no difieren de aquellas que tuvieron acceso únicamente a las magnéticas. Nuestros resultados concuerdan en que tortugas marinas juveniles pueden aprovechar las señales visuales para mantener una dirección de nado apropiada.

Aunque los resultados no nos permiten determinar qué tipo de luz es la que aprovechan (directa o polarizada), aparentemente cualquiera de ellas son posibles, ya que en días en que el cielo permaneció nublado los individuos fueron capaces de mantener su dirección, esto ocurrió en ambos registros de los dos nidos. Si la luz polarizada es utilizada de manera alternativa o adicional no lo conocemos todavía. Hormigas (Wehner *et al.*, 1996), aves (Able y Able, 1993, 1996) y peces (Hawryshyn *et al.*, 1990) utilizan este tipo de luz para integrar información diferencial en su traslado.

Como en otros animales, la posibilidad de que individuos recién eclosionados de *Eretmochelys imbricata* posean un compás solar es muy alta, ya que los grupos con retraso respondieron de acuerdo al modelo de Kramer y Hoffman probado en aves migratorias y es funcional los organismos juveniles de carey.

Por lo anterior podemos concluir que los grupos que fueron sometidos a un fotoperiodo retrasado tuvieron un desplazamiento con respecto al fotoperiodo normal y al registrarlos ante las condiciones naturales expresaron una dirección de nado acorde a la que fueron sincronizados **(Figura 16 y 18)**.

Lo anterior se puede explicar de la siguiente manera. Un organismo que es expuesto a un transcurso del Sol distinto al local, en este caso, a un día artificial retrasado por 6 h, observa un Sol con una altitud mayor en la primera mitad de la mañana, y muy pequeña en la segunda mitad. Existe una zona, después de 3 h del punto más alto, en que la posición del astro corresponde a lo que el organismo esperaría, no obstante, durante este periodo no realizamos registros, pero los resultados indican tal efecto en su conducta de orientación. Definitivamente, la posibilidad de que el organismo “conozca” si es de mañana o tarde proviene de la información que interpreta su reloj interno, e integra detalles más precisos para su orientación conforme transcurre el Sol en el cielo **(Figura 18)**.

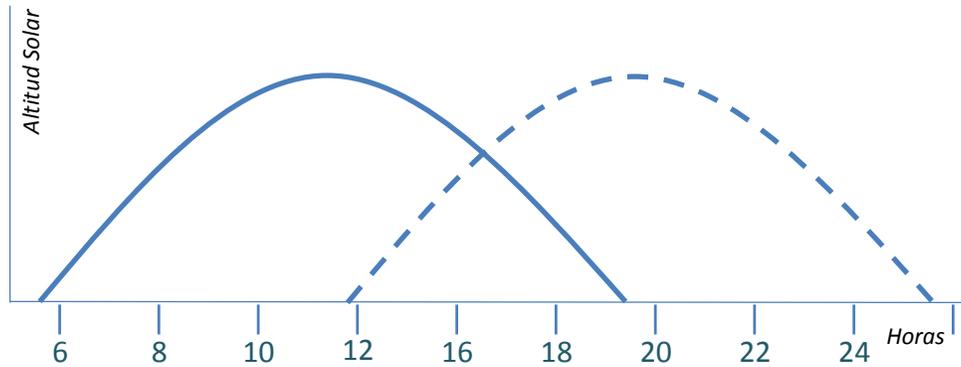


Figura 21. Transcurso natural del Sol en el horizonte (línea sólida), y transcurso del Sol correspondiente a un día artificial con 6 h de retraso con respecto al tiempo local (Tomado de Hoffman, 1954 en Hoffman, 1960).

Por lo anterior, un individuo cuyo reloj está fuera de fase respecto al tiempo local no sólo experimenta una altitud distinta, sino que experimenta también un transcurso de la luz solar (azimut) diferente al esperado de acuerdo a su reloj biológico (Hoffman, 1960).

v. Individuos sincronizados a Fotoperiodo Natural. Registro de Actividad Locomotriz.

Es evidente que los individuos recién eclosionados de *Eretmochelys imbricata* son organismos capaces de discernir entre el amanecer y atardecer, lo que revela que poseen un reloj circadiano que les permite expresar actividad locomotriz (natatoria) al menos por más de 24h (**Figura 19**), todos los organismos estudiados expresaron actividad notable y anticipada a las horas arbitrariamente asignadas como amanecer y atardecer (6am y 18pm), esto es característico de ciertos ritmos biológicos como la actividad circadiana. En este caso la actividad es de tipo bimodal.

Esta aseveración, nos da pie a sostener nuestra hipótesis, ya que además de responder a un retraso de fotoperiodo, tenemos evidencia de un reloj circadiano funcional que pudiera ser capaz de medir los cambios de la luz solar en el horizonte promoviendo la capacidad de direccionalidad

de nado en estos organismos. Sin embargo se requiere la prueba contundente de observar si este ritmo se mantiene en los organismos desde su eclosión en condiciones constantes de oscuridad, pero esto requiere de un diseño experimental distinto.

La prueba de actividad locomotriz también nos revela que la amplitud de actividad es mayor en esos turnos, probablemente esto tenga implicaciones ecológicas de alimentación. De hecho durante los registros en la arena de orientación pudimos notar, menor actividad en los animales conforme oscurecía y en algunos de ellos también al medio día.

Aunque no lo comprobamos en esta especie, sabemos que las tortugas juveniles de agua dulce poseen un ritmo endógeno que puede ser comprobable en condiciones constantes (Gopar-Canales *et al*, 2010) y no descartamos esta posibilidad en tortugas marinas. Normalmente un reloj se mantiene en fase con el día natural por el cambio entre día y noche, pero este puede desplazarse mediante un desplazamiento artificial en el número de horas de luz y oscuridad a los que se mantenga. En este estudio hubiésemos requerido de más tiempo de manipulación de los animales para poder estudiar más a fondo las características rítmicas del reloj de esta especie, sin embargo los presentes resultados y la experiencia de trabajo nos permiten poder plantear nuevas hipótesis y diseños experimentales más afines a las posibilidades de experimentación y observación.

vi. El caso de la luz polarizada ¿es una señal factible para la orientación de nado en tortugas marinas juveniles?

Existe una controversia sobre si las tortugas marinas pudieran ser capaces de orientarse conforme a la luz polarizada (Yeomans, 1995), es decir, si la luz proveniente del Sol que se polariza conforme se refleja en el agua, pudiera aprovecharse como una señal indirecta en este hábitat.

Durante esta investigación no medimos la cantidad de luz proveniente de la atmósfera, pero en cambio notamos que en días nublados, la mayoría de los individuos observados pudo mantener su dirección de nado, no obstante en presencia de lluvia intensa los organismos suspendían su actividad y se colocaban en una posición muy particular, con las patas delanteras retraídas hacia el caparazón y las traseras pegadas entre ellas (**Figura 22**). Esta posición permanecía si la temperatura no ascendía, por lo que en algunos casos suspendimos el registro si esto se extendía en los siguientes individuos.



Figura 22. Posición observada en tortugas juveniles de *E. imbricata* en días lluviosos, o en su caso al inicio del registro fotográfico.

Con los resultados que obtuvimos en este estudio revelamos evidencia sobre la existencia de un compás solar, pero pudiera ser que, como en otros organismos, al no ser clara la posición del sol, los individuos juveniles pudieran utilizar la luz polarizada como señal del azimut solar y en consecuencia, mantener la funcionalidad del compás.

Además, sabemos que los hábitos de estos organismos no se realizan a grandes profundidades, y aunque existe la posibilidad de que la polarización aumente notablemente con este factor, en la superficie del agua pudiera ser importante ya que en días nublados es el principal punto de referencia para ubicar la posición del Sol.

vii. Implicaciones biológicas de la conducta de migración en juveniles de *Eretmochelys imbricata*.

Los traslados que realizan las tortugas marinas pueden tener lugar en cualquiera de sus etapas de vida, desde que emergen del nido, los individuos se desplazan lo más rápido posible hacia el mar con una reserva alimenticia (vitelo) que les proporciona la energía suficiente durante su etapa de “frenes”. Con nuestro estudio pudimos observar que después de 24 h, la actividad no sólo persiste, sino que la alimentación se vuelve primordial, ya que conforme los organismos iban absorbiendo sus reservas la alimentación aumentó y encontramos mayor cantidad de desechos en las tinas por lo que tuvimos que aumentar la limpieza de las tinas de mantenimiento.

En organismos juveniles de carey el desplazamiento hacia corrientes del Golfo de México pudiera ser elemental para su alimentación, ya que durante el verano cuando la corriente de Lazo está en su máxima penetración provocando turbulencia, ésta determina la distribución del zooplancton del cual pueden alimentarse. A su vez, la corriente de Lazo provoca la fricción con el talud de la península, en primavera – verano cuando esto ocurre se presenta una surgencia topográfica importante que permite el afloramiento de plancton (Pickard, 1995). De acuerdo a esto es probable que los organismos juveniles mantengan su curso dentro del Golfo para poder aprovechar estos recursos.

Una vez en el océano, sabemos que lo más importante es la búsqueda de corrientes marinas y prevalecer en ellas hasta que puedan llegar a un sitio donde puedan alimentarse mejor y se reduzca el peligro con depredadores. ¿Pero cuál es el motor de información que les permite encontrar estas corrientes?

Conforme a nuestros resultados, nos inclinamos a pensar que el reloj circadiano provee de las herramientas suficientes para ubicarlas y mantenerlas en corrientes marinas al menos durante el día. Durante la noche, en que los puntos de referencia visuales en el cielo son débiles pudiera estar sosteniéndolas en curso el compás el magnético.

Estos mismos probablemente sean los principales motores que durante los siguientes años de vida gobiernen su conducta de migración hacia zonas de apareamiento, alimentación y desove.

La investigación en la conducta y fisiología de migración de esta especie tiene importantes implicaciones en la conservación de la misma. Ya que a pesar de que parece navegar distancias cortas en comparación con otras especies son vulnerables a la depredación directa y humana mientras llevan a cabo sus traslados.

En la medida en que podamos conocer sus patrones de movimiento de esta y otras especies de tortugas marinas podremos tomar medidas más rigurosas para conservarlas. Hoy en día sabemos que las alteraciones climáticas pueden afectar los patrones de movimiento de las corrientes oceánicas y probablemente esto tenga implicaciones importantes en la distribución y patrones de movimiento de estos organismos.

XIII. CONCLUSIONES

- Un compás solar regulado por reloj circadiano influye de manera directa en la dirección de nado de tortugas recién eclosionadas de *Eretmochelys imbricata*.
- Los imanes utilizados durante esta investigación incrementan la desorientación en el nado de los individuos, sin embargo no afectan significativamente los mecanismos de orientación por compás solar.
- Los individuos recién eclosionados de esta especie expresan un patrón de actividad bimodal.
- La navegación de los individuos juveniles de esta especie pudieran valerse de los mecanismos de compás solar para encontrar las corrientes marinas del Golfo de México y aprovechar sus recursos
- Los resultados de este estudio nos abren un panorama nuevo y distinto en el estudio de la conducta de orientación de nado de la especie *Eretmochelys imbricata*, no obstante es necesario replantear nuevos protocolos de investigación para conocer más a fondo los mecanismos fisiológicos que subyacen la migración de estos organismos para su supervivencia.

XIX. LITERATURA CITADA

- Abreu- Grobois, A., Guzmán, V; Cuevas, E., y A. G. Margarita (Compiladores). 2005. Rumbo a la COP:3 Diagnóstico del estado de la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) en la Península de Yucatán y determinación de acciones estratégicas (14-15 de marzo 2005 Telchac Puerto, Yucatán). Memoria del Taller. 91p.
- Avens, L. and K. J. Lohmann, 2003. Use of multiple orientation cues by juvenile loggerhead sea turtles *Caretta caretta*. *J. Exp. Biol.* 206, 4317-4325.
- Baillie, J., and Groombridge, B. 1996. IUCN Red List Of Threatened Animals. Gland, Switzerland: Iucn, 368 Pp.
- Batschelet, E. 1981. Circular Statistics in Biology. New York Academic Press.
- Belekhova, M. G. and N. B. Kenigfest 2001. Pretectal and tectal connections revealed by tracing technique in the turtle intergeniculate leaflet. *J Evol. Biochem. Physiol*, (37): 2, 182-191.
- Bjorndal, K. y Zug, G.K. 1995. Growth and age of sea turtles” In: Bjorndal, K. A. (ed). The Biology and Conservation of Sea Turtle, pp. 599-600. Washington, D.C., Smithsonian Institution Press.
- Bowen, B., Nelson, W. and J.C. Avise. 1993. A molecular phylogeny for marine turtles: Trait mapping, rate assessment, and conservation relevance. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 90: 5574-5577.
- Carr, A. 1995. Notes on the behavioral ecology of sea turtles. In Biology and Conservation of Sea Turtles Revised edition, K. A. Bjorndal, ed. (Washington and London: Smithsonian Institute Press), pp. 19-26.
- Cassone Vm; Brooks Ds; Kelm 1995. Comparative Distribution Of 2[¹²⁵I]iodomelatonin Binding In The Brains Of Diurnal Birds - Outgroup Analysis With Turtles . *Brain Behavior and Evolution* 45 (5) 241-256

- Chacon, D. La Tortuga Carey del Caribe-Introducción a su biología y estado de conservación. WWF-Programa Regional para América Latina y El Caribe, San José, Costa Rica.
- Chan, E. H., Liew; H. C. 1999. Hawksbill turtles, *Eretmochelys imbricate* nesting on Redang Island, Malasya, from 1993-1997. *Chelonian Conservation and Biology* 3(2): 326-329.
- DeRosa, C. T and D. H Taylor. 1978. Sun-compass orientation in painted turtle, *Chrysemys-picta* (Reptilia, Testudines, Testudinidae). *Chelonian Conservation and Biology*. 12(1): 25-28.
- Dobbs, K. A., Miller, J. D; Limpus, C. J. and Landy JR, A. M. 1999. *Chelonian Conservation and Biology*. 3(2): 344-361.
- Freake, M., R. Muheim and J. B. Phillips., 2006. Magnetic maps in animals: a theory comes of age? *The Quart. Rev. of Biol.*, 81, 4: 327-347.
- Fuentes-Farías, A. L., 2008. Magnetorecepción en la Tortuga negra *Chelonia agassizi* del área de reserva Colola-Maruata, Michoacán, México. Tesis Doctoral, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Garduño-Andrade, M., Guzmán, V., Miranda, E., Briseno-Duenas, R., and Abreu, A. 1999. Increases in hawksbill turtle (*Eretmochelys imbricata*) nestings in the Yucatan Peninsula, Mexico (1977-1996):data in support of successful conservation?. *Chelonian Conservation and Biology* 3(2):286-295.
- Guzmán, V., Rejón, J.C. Gómez, R., y Silva, S.J. 1995. Informe Final del Programa de Investigación y Protección de las Tortugas Marinas del Estado de Campeche, México. Temporada 1994. Situación actual. Cd. del Carmen, Campeche, México. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 32 pp.
- Hamasaki, D. I. and J. Eder. 1977. Adaptative radiation of the pineal system. *In* F. Crescitelli (Ed), *Handbook of sensory physiology*. New York. Springer-Verlag. Pp 497-548.

- Kalmijn, A.J. 1974. The detection of electric fields from inanimate and animate sources other than electric organs. In Handbook of Sensory Physiology Electoreceptors and Other Specialized Receptors in Lower Vertebrates, Fessard, A., ed. Springer-Verlag. 3, 147–200.
- Kirschvink, J.L. and Gould, J.L. 1981. Biogenic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals. *BioSystems* 13, 181–201.
- Kirschvink, J.L. *et al.* 1985. Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms. Plenum Press.
- LarsonPrior LJ; Siuciak JA; Dubocovich 1996 Localization of 2-[I-125]iodomelatonin binding sites in visual areas of the turtle brain: European Journal Of Pharmacology Volume: 297 Issue: 1-2 Pages: 181-185
- Lohmann, K. J. and C. F. Lohmann. 1994. Detection of Magnetic Inclination Angle by Sea Turtles: A possible mechanism for determining latitude. *J. Exp. Biol.* 194, 23-32.
- Lohmann, K. J. and C. M. F. Lohmann, 1996. Orientation and open-sea navigation in sea turtles. *J. Exp. Biol.* 199, 73-81.
- Lohmann, K. J. Lohmann, C. M. F., Ehrhart, L. M., Bagley, D. A., and Swing, T. 2004. Geomagnetic map used in sea-turtle navigation. *Nature* 428, 909-910.
- Lohmann, K. J., and Lohmann, C. M. F. 2003. Orientation mechanisms of hatchling loggerheads. In Loggerhead Sea Turtles A. Bolten and B. Witherington, ed. (Washington, D. C.: Smithsonian Institution Press), pp. 44-62.
- Lohmann, K. J., Cain, S. D., Dodge, S. A., and Lohmann, C. M. F. 2001. Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles. *Science* 294, 364-366.
- Lohmann, K. J., J. T. Hester and C. M. F. Lohmann, 1999. Long-distance navigation in sea turtles. *Ethol. Ecol. and Evol.* 11, 1-23.

- Luschi, P., Benhamou, S., Girard, C., Ciccione, S., Roos, D., Sudre, J., and Benvenuti, S. 2007. Marine turtles use geomagnetic cues during open sea homing. *Curr. Bio.* 17, 126-133.
- Mahapatra Ms; Mahata Sk; Maiti Br. 1988. Circadian-Rhythms And Influence Of Light On Serotonin, Norepinephrine, And Epinephrine Contents In The Pineal Paraphyseal Complex Of Soft-Shell Turtles (*Lissemys-Punctata-Punctata*) *General And Comparative Endocrinology*. 71 (1) 183-188
- Miller, J. D., Limpus, C. J., and Godfrey, M. H. 2003. Nest site selection, ovoposition, eggs, development, hatchling, and emergence of loggerhead turtles. In: *Loggerhead sea Turtles*. Edited by A. B. Bolton and B. E. Withering Smithsonian Institution, Washington, D. C., pp. 125-143.
- Moore-Ede, M. F., M. Sulzman and C. A. Fuller. 1982. *The clocks that time us*. Harvard University Press, Cambridge, MA. 447p.
- Mott, C. R and M. Salmon. 2011. Sun Compass Orientation by Juvenile Green Sea Turtles (*Chelonia mydas*). *Chelonian Conservation and Biology*. 10 Issue: 1 Pages: 73-81 Published: JUL 2011.
- Mylan, A.B. 1997. Status. In: Meylan, A., et al. *Biology and Status of the Hawksbill in the Caribbean*. Washington, DC: IUCN/SSC Marine Turtle Specialist Group, pp. 7-18.
- Owens D; Gern W; Ralph C Title 1980.: Melatonin In The Blood And Cerebrospinal-Fluid Of The Green Sea Turtle (*Chelonia-Mydas*) *General And Comparative Endocrinology*. 40 (2) Pages: 180-187 .
- Paulin, M.G. 1995. Electoreception and the compass sense of sharks. *J. Theor. Biol.* 174, 325–339.
- Pickard, G. L., 1995. *Descriptive Physical Oceanography. An Introduction*. Butterworth-Heinemann Ed.

- Pittendrigh, C. S. Circadian System: Entrainment. *In* Aschoff, J (Ed) Handbook of Behavioral Neurobiology. Biological Rhythms. New York, Plenum Press. Pp 95-121.
- Richardson, J. I., Hall, D. B., Mason, P. A; Andrews, K. M; Bjorkland, R; Cais, Y; Bell, R. 2006. Eighteen years of saturation tagging data reveal a significant increase in nesting hawksbill sea turtles (*Eretmochelys imbricata*) on Long Island, *Antigua Animal Conservation* 9(3): 302-307.
- Rosenblum, B. *et al.* 1985. Limits to induction-based magnetoreception. *In* Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms, Kirschvink, J.L. *et al.*, eds. (Plenum Press) pp. 365–384.
- Shcherbakov, V.P. and Winklhofer, M. 1999. The osmotic magnetometer: a new model for magnetite-based magnetoreceptors in animals. *Eur. Biophys. J.* 28, 380–392.
- Tosini, G. and C. Fukuhara. 2003. Photic and circadian regulation of retinal melatonin in mammals. *J. Neuroendocrinol.* Apr; 15(4): 364-9.
- Underwood, H. 1990. The pineal and melatonin regulators of circadian function in lower vertebrates. *Experientia.* Jan 15; 46(1): 120-128. Review.
- Underwood, H. and M. Menaker. 1976. Extraretinal photoreception in lizards. *Photophysiology.* Apr 23(4): 227-243.
- Wallraff, H. G. 2005. Avian Navigation: Pigeon Homing as a Paradigm. Springer, Berlin.
- William, P. I. and K. J. Lohmann. 2002. Magnet induced disorientation in hatchling loggerhead sea turtles. *J. Exp. Biol.* 206, 497-501.
- Witzell, W. N. 1983. Synopsis of Biological data on the hawksbill turtle, *Eretmochelys imbricate* (Linnaeus, 1766) FAO. *Fish. Synop.*, (137): 78p

XX. PÁGINAS WEB CONSULTADAS

<http://www.e-zakynthos.com/ecology/images/caretta.caretta.turtle.zante.jpg>

<http://www.iacseaturtle.org/caretta.html>

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8e/Lieux_pontes_tortue_caouanne.png/550px-Lieux_pontes_tortue_caouanne.png

XIX. Anexo I

Mediciones de la deformación del campo magnético, producidas por los imanes de neodimio. Se seleccionó como referencia un área del piso del laboratorio y se midió la deformación del campo magnético en tres componentes, X, Y y Z. La deformación de referencia para estos tres componentes se muestra en el lado izquierdo de la figura 23, mientras que del lado derecho, se muestra la combinación de los mismos en un componente total. La deformación que se muestra del lado izquierdo inferior, es producida por la cercanía a un equipo de refrigeración. Las unidades presentes en cada línea de la gráfica, corresponde a nanoteslas (nT). La cruz en el campo total indica la posición que ocupará el imán posteriormente.

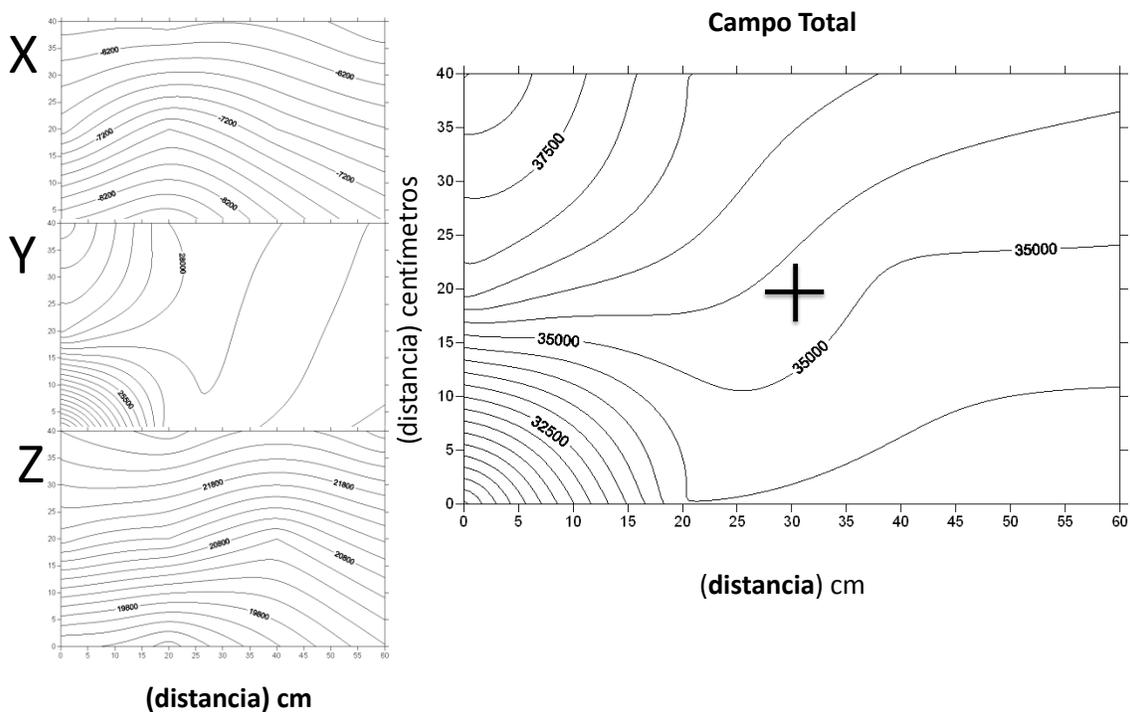


Figura 23. Deformación del campo magnético (nT) en laboratorio. El campo total muestra una deformación original por un equipo eléctrico hacia el lado izquierdo inferior del campo total.

La Figura 24 muestra cómo deforma el imán de neodimio el campo magnético, el cual fue el mismo usado en este trabajo con las tortugas marinas. Se puede observar en los tres componentes X, Y y Z, una clara deformación respecto a la situación sin imán. La posición del imán en vista superior es mostrada en la deformación del campo total, representado alrededor de la cruz. La distorsión del campo magnético es más fuerte a uno de los lados del imán.

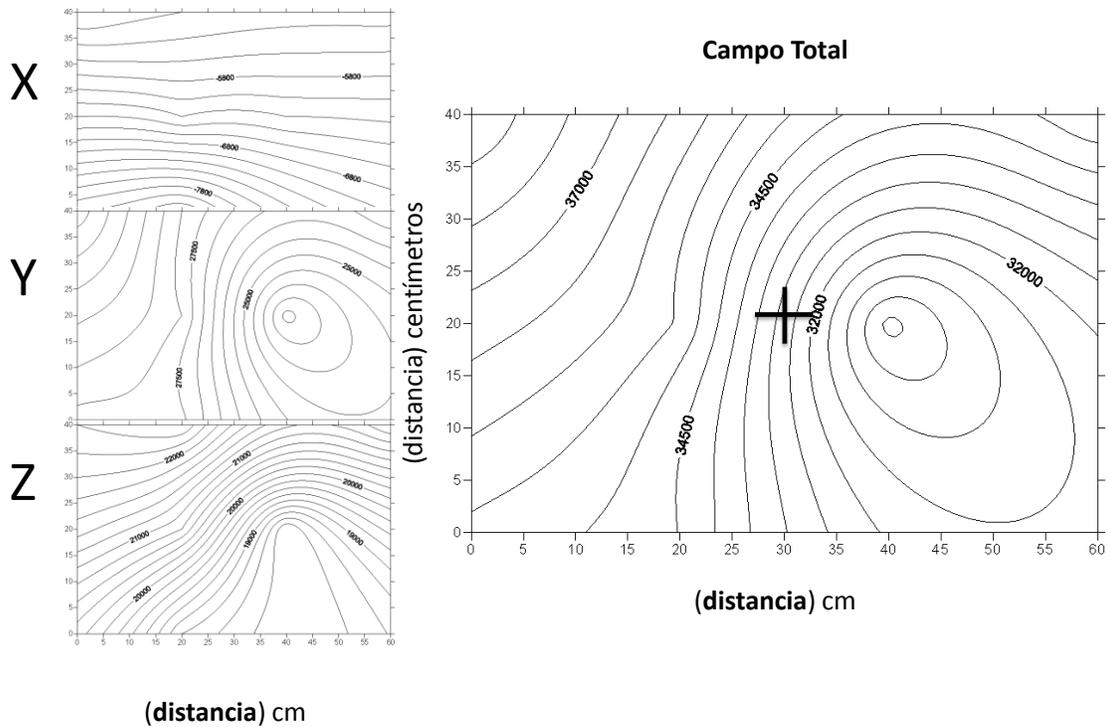


Figura 24. Deformación del campo magnético en sus distintas componentes, producidas por el imán de neodimio usado en el presente estudio. Las unidades externas en las gráficas son de posición respecto a un área y en la cruz se representa la posición del imán. Las líneas curvas dentro de las gráficas, representan el campo magnético y las unidades correspondientes en nT

Estos datos fueron investigados y amablemente proporcionados por el Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi, en el Instituto de Geofísica de la UNAM.