

# Grao en Bioloxía

## Memoria do Traballo de Fin de Grao

**Revisión bibliográfica: Estado de coñecemento dos mecanismos de orientación das tartarugas mariñas.**

**Revisión bibliográfica: Estado del conocimiento de los mecanismos de orientación de las tortugas marinas.**

**Literature review: State of the art review of orientation mechanisms of sea turtles.**



**Julia Estévez Carballeira**

Junio, 2019





UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA y  
CIENCIAS DE LA TIERRA

DEPARTAMENTO DE  
BIOLOGÍA

Dña. **Montserrat Domínguez Pérez** y Dña. **Nuria Fernández Rodríguez** autorizan la presentación del trabajo de fin de grado **Revisión bibliográfica: Estado del conocimiento de los mecanismos de orientación de las tortugas marinas**” presentado por **Julia Estévez Carballeira** para su defensa ante el tribunal calificador.

Dra. Montserrat Domínguez Pérez

Dra. Nuria Fernández Rodríguez

En A Coruña a 19 de junio de 2019



# ÍNDICE

RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.    Ciclo biológico de las tortugas marinas .....	2
1.2.    Mecanismos de orientación.....	4
1.2.1.    Campo magnético terrestre .....	4
1.2.1.1.    Principios del campo magnético terrestre.....	4
1.2.1.2.    Empleo del campo magnético en tortugas marinas.....	5
1.2.1.3.    Mecanismo de detección del campo magnético terrestre.....	7
1.2.2.    Señales químicas, hidrodinámicas, visuales y/o celestes.....	8
2. OBJETIVOS .....	9
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	10
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
4.1.    Evidencias del empleo del campo magnético terrestre para la orientación de las tortugas marinas.....	10
4.1.1.    Métodos empleados en el análisis de los campos magnéticos.....	10
4.1.2.    Influencia de los campos magnéticos en las puestas .....	12
4.1.3.    Herencia de la capacidad de orientarse por parte de las crías .....	12
4.1.4.    Influencia de la ecología en las señales magnéticas .....	13
4.1.5.    Influencia de las firmas magnéticas en la densidad de anidación.....	14
4.1.6.    Influencia de las firmas magnéticas en la determinación de la variación genética de las poblaciones .....	14
4.2.    Evidencias del empleo de señales químicas, hidrodinámicas, visuales y/o celestes.....	15
4.2.1.    Evidencias del empleo de señales químicas .....	15
4.2.2.    Evidencias del empleo de la dirección de las olas .....	16
4.2.3.    Evidencias del empleo de las corrientes oceánicas.....	17
4.2.4.    Evidencias del empleo de señales visuales y/o celestes .....	18
5. CONCLUSIONES.....	19
BIBLIOGRAFÍA.....	21
ANEXO 1 .....	25



## **RESUMEN**

Las tortugas marinas son organismos que realizan grandes viajes migratorios durante toda su vida. Para orientarse y navegar se valen de una gran variedad de señales y estrategias. En el presente trabajo, se pretende esclarecer los posibles mecanismos de orientación que utilizan estos reptiles. El campo magnético es, en principio, la señal que prevalece en dichos viajes, pero se revisa si existen otros que lo acompañen o que lo sustituyan cuando este no esté presente o no pueda utilizarse. Tras la revisión, se confirma que el mecanismo por excelencia es el campo magnético terrestre. Esta señal geomagnética es por un lado, innata (mapa magnético) y por otro, aprendida tras las sucesivas migraciones (brújula magnética). Además, las señales no magnéticas parecen jugar también un papel importante en la orientación de las tortugas marinas, pero aún es un campo sin investigar por lo que no se pueden sacar conclusiones definitivas de las mismas.

## **Palabras clave**

Tortugas marinas, campo magnético, mapa magnético, brújula magnética, señales no magnéticas.

## **SUMMARY**

Sea turtles are organisms that make great migratory journeys throughout their lives. To orient yourself and navigate through a wide variety of signals and strategies. In the present work, it is intended to clarify the possible orientation mechanisms that use these reptiles. Magnetic field are, in principle, the signal that prevails in these trips, but it is checked if there are others that accompany or replace when it is not present or can not appear. After the review, it is confirmed that the mechanism by excellence is the terrestrial magnetic field. This geomagnetic signal is on the one hand, innate (magnetic map) and on the other, learned after successive migrations (magnetic compass). In addition, non-magnetic signals also play an important role in the orientation of sea turtles, but it is yet a field of research for which no definitive conclusions can be drawn from them.

## **Key words**

Sea turtles, magnetic field, magnetic map, magnetic compass, non-magnetic signals.



## 1. INTRODUCCIÓN

Las tortugas marinas son reptiles (Chelonoidea) adaptados a la vida en el océano. Presentan una concha que sirve de protección para sus órganos internos. Esta concha está formada por dos partes: el caparazón (parte dorsal) y el plastrón (parte ventral). Las tortugas son originarias de ambientes pantanosos y de lagunas, pero con el paso del tiempo, fueron conquistando ambientes terrestres y, finalmente, los océanos (Secretaría CIT, 2004). Estos quelonios se diferencian de las tortugas terrestres en que, en lugar de patas, presentan unas potentes aletas que unen sus dedos. Estas aletas les permiten nadar con rapidez y realizar largas migraciones (Witherington, 2006). Además, carecen de la posibilidad de retraer las extremidades y la cabeza en el interior de la concha (Secretaría CIT, 2004) por ser esta mucho más aplanada para darles hidrodinamismo.

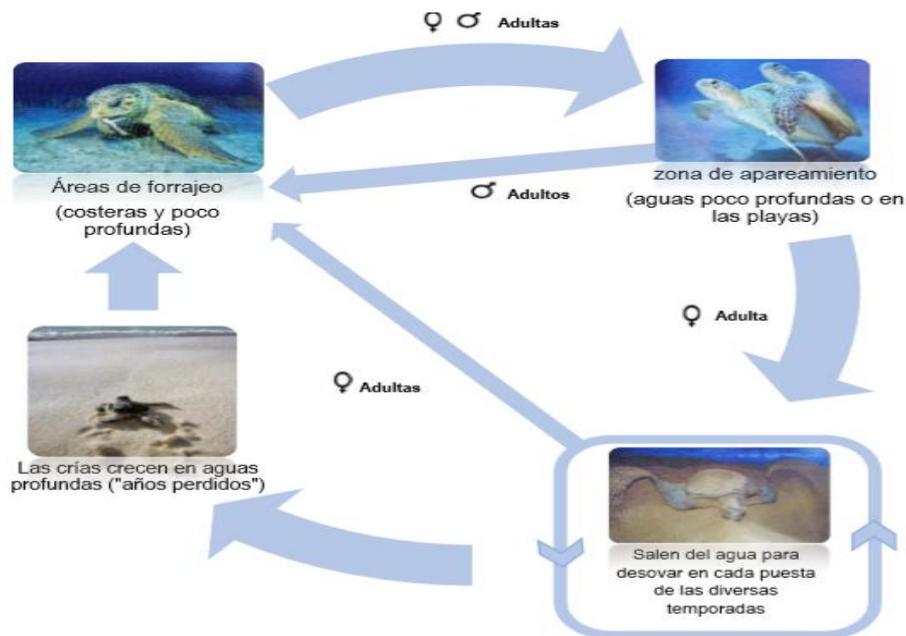
**Tabla 1.** Principales características de cada especie de tortuga marina. Información tomada de (Secretaría CIT, 2004), (Witherington, 2006).

ESPECIE	NOMBRE COMÚN	DISTRIBUCIÓN	DIETA	PARTICULARIDAD
<i>Caretta caretta</i>	Tortuga boba	Mar Caribe, océano Atlántico, Pacífico e Índico	Esponjas, tunicados moluscos y/o crustáceos	Forrajea al Este de EE.UU
<i>Chelonia mydas</i>	Tortuga verde	Océano Atlántico, Pacífico, Índico, Costa de Gran Bretaña y Nordafricana occidental	Fanerógamas acuáticas ( <i>Zootera</i> y <i>Thalassia</i> ), algas marinas y/o moluscos	Migraciones transoceánicas (más de 2.000 km)
<i>Natator depressus</i>	Natator franca	Costas de Australia y Nueva Guinea	Moluscos, crustáceos, medusas y/o erizos de mar	Anidan en Australia septentrional y oriental
<i>Lepidochelys kempii</i>	Tortuga lora	Océano Atlántico Noroccidental, Nueva Escocia y Golfo de México (pueden alcanzar Europa y el mar Mediterráneo)	Pequeños crustáceos, moluscos y/o peces	Anidan en el oeste del Golfo de México
<i>Lepidochelys olivacea</i>	Tortuga olivácea	Océano Pacífico e Índico así como el océano Atlántico	Peces y/o crustáceos	Grandes poblaciones reproductoras en playas de la India
<i>Eretmochelys imbricata</i>	Tortuga carey	Costas de Escocia, Marruecos y, excepcionalmente, en el mar Mediterráneo	Esponjas, erizos de mar y/o anémonas	Se reproducen principalmente en México, Seychelles, Indonesia y/o Australia
<i>Dermochelys coriacea</i>	Tortuga laúd	En la mayoría de los mares y océanos	Celentéreos y/o cefalópodos	Considerada la especie con la distribución más amplia

Se conocen dos familias: *Cheloniidae*, formada por seis especies y *Dermostochelyidae*, con un único representante. La familia *Cheloniidae* se caracteriza por tener un caparazón cubierto por grandes láminas córneas. Se diferencian seis especies: *Caretta caretta* (Linneo, 1758), *Chelonia mydas* (Linneo, 1758), *Natator depressus* (Bocourt, 1868), *Lepidochelys kempii* (Garman, 1880) *Lepidochelys olivacea* (Eschscholtz, 1829), *Eretmochelys imbricata* (Linneo, 1766). Sin embargo, la familia *Dermostochelyidae* se caracteriza por la ausencia de láminas o placas en su caparazón. El único representante de esta familia es *Dermostochelys coriacea* (Vandelli, 1761), siendo la más grande de todas las tortugas y pudiendo alcanzar los 2,4 m de longitud y hasta 500 kg de peso (Witherington, 2006). En la Tabla 1 se muestra un cuadro comparativo de algunas de las diferencias específicas más relevantes para este trabajo poniendo especial atención en las áreas de distribución. En las figuras del Anexo 1 se incluyen mapas específicos para cada especie que indican: distribución oceánica juvenil, playas de anidación y distribución de juveniles y adultos.

### 1.1. Ciclo biológico de las tortugas marinas

La vida de las tortugas marinas es, habitualmente, solitaria (Secretaría CIT, 2004) a excepción de alguna especie que en épocas reproductivas se vuelve gregaria formando arribadas. Para reproducirse, realizan grandes migraciones oceánicas desde las zonas de forrajeo hasta las playas de anidación, pudiendo llegar a ser de miles de kilómetros. Se aparean en playas expuestas como las que se encuentran en las islas oceánicas o en las costas continentales así como en el viaje hacia las mismas. Dicho apareamiento suele durar varias horas para asegurar la paternidad de los descendientes. Una vez se produce el apareamiento, el macho regresa a las áreas de forrajeo. La hembra sin embargo, permanece en la playa y se encarga de realizar un foso con sus extremidades palmeadas para depositar los huevos bajo la arena (a 0,5 m de profundidad). Con esto, se evita la erosión por el efecto de las olas (Witherington, 2006). Todas estas etapas del ciclo biológico aparecen esquematizadas en la Figura 1.



**Figura 1.** Esquema del ciclo biológico de las tortugas marinas. Imágenes tomadas de (Witherington, 2006).

El número de huevos depositados, el tamaño, el número de puestas y el tamaño de las crías depende de la especie, tal y como se puede observar en la Tabla 2. Cabe señalar que las tortugas marinas son los reptiles que más huevos ponen (Witherington, 2006). Tras realizar la primera puesta, la hembra regresa al mar y no vuelve hasta la siguiente puesta de la temporada. Entre las puestas transcurren, aproximadamente, 14 días. Además, la hembra se fertiliza con el esperma almacenado de la cópula inicial. Al término de la temporada de anidación, las hembras adultas antes de migrar a las áreas de forrajeo (donde se alimentan), borran sus huellas para evitar depredadores. La temporada reproductiva se repite cada 2-4 años ya que les supone un esfuerzo muy elevado debido a la pérdida de masa corporal (más del 15 %) puesto que, normalmente, no pueden alimentarse hasta regresar a las áreas de forrajeo. A pesar de ello, hay especies como *Eretmochelys imbricata* o *Lepidochelys olivacea* que se reproducen cada año (Witherington, 2006).

**Tabla 2.** Características propias de cada especie de tortuga marina. Información tomada de (Secretaría CIT, 2004), (Witherington, 2006).

ESPECIE DE TORTUGA	Nº PUESTAS	Nº HUEVOS PUESTA	PESO HUEVO (g)	PESO CRÍAS (g)
<i>Caretta caretta</i>	2-4	130	27	15
<i>Chelonia mydas</i>	1-7	80-145	45	25
<i>Natator depressus</i>	3	50	*	40
<i>Lepidochelys kempii</i>	1-3	100	30	17
<i>Lepidochelys olivacea</i>	1-7	115	33	30
<i>Eretmochelys imbricata</i>	1-3	100-150	35	17
<i>Dermochelys coriacea</i>	4-9	65-85	76	44

\*No se encontraron datos del peso de los huevos de *Natator depressus*.

En cuanto a los huevos, permanecen bajo la arena un par de semanas, tiempo en el que se produce la determinación del sexo de cada cría, la cual es en función de la temperatura ambiental, así a temperaturas inferiores a 29°C se producen machos y a superiores, se producen hembras. Una vez rota la cáscara de los huevos, las crías permanecen bajo la superficie de la playa hasta que la temperatura baja, es decir, al anochecer o al amanecer. Llegado el momento, las crías comienzan a moverse y a transmitir su energía hacia el resto (Witherington, 2006).

Ya en la superficie, las crías tienen el objetivo de encontrar el océano, comenzando así un periodo de gran actividad conocido como “frenesí natatorio” que dura aproximadamente 24 horas. En este periodo, las crías se mueven rápidamente hacia el agua para evitar ser comidas por depredadores. A partir de este momento, empieza la vida oceánica que dura entre 1-10 años dependiendo de la especie. En el caso de *Natator depressus* no experimenta etapa de dispersión oceánica, por lo que las crías son de mayor tamaño (como se puede observar en la Tabla 2) para soportar los ataques de los depredadores y poder permanecer en aguas superficiales. Por el contrario, *Dermochelys coriacea* pasa

la mayor parte de su vida en estas aguas. En esta etapa lejos de tierra, las tortugas marinas no nadan o bucean para evitar perder energía. Viven en zonas de convergencia y se alimentan de organismos arrastrados por el agua y/o el viento. Su baja actividad se debe a que reservan sus energías para el crecimiento (a mayor crecimiento mayor probabilidad de supervivencia). Además, los juveniles presentan una serie de estrategias o adaptaciones para sobrevivir como imitar objetos flotantes, desarrollar escamas en forma de quilla para protegerse o esconder sus extremidades para evitar los ataques de depredadores. Esta etapa entre que las crías entran en el océano y se convierten en adultos se conoce como “años perdidos” (Secretaría CIT, 2004) tal como se observar en la Figura 1. Recibe este nombre porque los detalles de este periodo son muy escasos (Witherington, 2006).

Tras la etapa oceánica, ya como adultas, migran hacia aguas más superficiales próximas a la costa donde se alimentan, denominadas áreas de forrajeo. La posibilidad de llegar a la etapa adulta es muy baja en estas especies, 1 de cada 1.000 consigue sobrevivir (Secretaría CIT, 2004), pero una vez alcanzan este estado su éxito es mayor (Witherington, 2006). Su edad es difícil de identificar (Secretaría CIT, 2004). A pesar de ello, se conoce que la mayoría alcanzan la madurez aproximadamente a los diez años, aunque algunas especies no comienzan a reproducirse hasta llegar a los 30 años como sucede con *Caretta caretta* (Witherington, 2006).

## **1.2. Mecanismos de orientación**

La orientación animal ha sido uno de los grandes misterios de la naturaleza (Carbonell et al., 2017). Las tortugas marinas, como se ha mencionado anteriormente, deben enfrentarse a diversos desafíos asociados con la navegación. El primer signo de orientación que muestran es al nacer ya que deben determinar la dirección del océano y ser capaces de llegar hasta él (Mäthger et al., 2011). Una vez en el océano abierto, tras los “años perdidos”, realizan un viaje hacia las zonas de forrajeo donde, cada temporada de reproducción, llevan a cabo grandes migraciones para regresar a las playas de anidación, atravesando largas cuencas oceánicas (Endres & Lohmann, 2013). Finalmente, deben volver eficientemente a las áreas de forrajeo (Lohmann, 2004). Por todo ello, las tortugas marinas tienen que valerse de señales y/o mecanismos de orientación para conseguir llevar a cabo sus objetivos vitales.

Tras haber realizado un análisis exhaustivo de la bibliografía, las tortugas marinas utilizan los siguientes mecanismos para orientarse: como mecanismo principal el campo magnético terrestre y secundariamente, las señales químicas, hidrodinámicas y/o visuales o celestes. Seguidamente, se detallará cada una de las señales mencionadas.

### **1.2.1. Campo magnético terrestre**

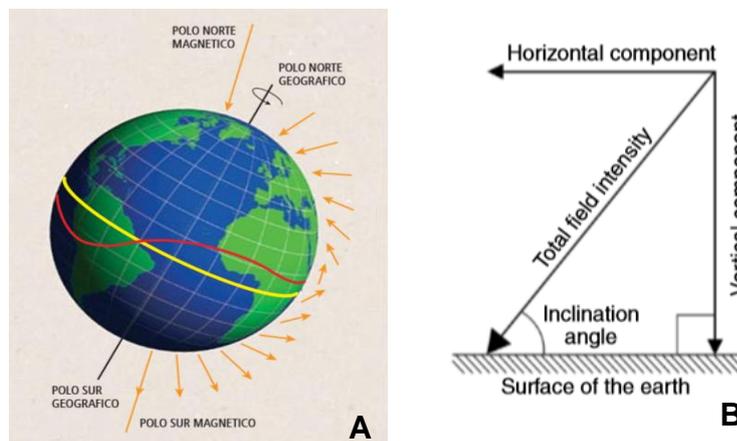
#### **1.2.1.1. Principios del campo magnético terrestre**

El campo magnético de la Tierra se genera gracias a las corrientes de convección y a los remolinos del material fundido del núcleo. El dipolo del núcleo no solo determina el campo magnético que recibe la Tierra sino que además, determina los vectores de campo (intensidad y ángulo de inclinación) (Diego-Rasilla, 2004; Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007).

La Tierra está formada por dos polos magnéticos, el polo norte magnético y el polo sur magnético. Ambos se encuentran próximos a los polos geográficos (Carbonell et al., 2017). Del mismo modo, el ecuador magnético (línea curva que cruza la Tierra horizontalmente) se encuentra desviado del ecuador geográfico (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007). Todo ello, puede ser apreciado en el diagrama de la Tierra de la Figura 2A.

La dirección del vector de campo varía en función de su proximidad o lejanía al ecuador siendo paralelo a la superficie de la Tierra en el ecuador (ángulo de inclinación de  $0^\circ$ ) y perpendicular en los polos (ángulo de inclinación de  $90^\circ$ ) (Carbonell et al., 2017). “Las líneas de campo magnético abandonan la superficie terrestre por el polo sur magnético, rodean el globo y posteriormente ingresan en la Tierra por el polo norte magnético. Como consecuencia, las líneas de campo apuntan hacia arriba (hacia el espacio) en el hemisferio sur, corren paralelas a la superficie terrestre en el ecuador magnético y apuntan hacia abajo (hacia el interior de la Tierra) en el hemisferio norte” (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007). Estas líneas de campo, representadas en la Figura 2A por flechas, indican la dirección del vector.

El campo magnético terrestre no se ve alterado por el momento del día, el clima o la estación del año (Cain, et al., 2005). De igual forma, es omnipresente (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007) ya que cualquier punto del plano puede ser definido por una intensidad y un ángulo de inclinación (elementos del vector de campo). Por este motivo, es entendible que determinados organismos empleen las señales magnéticas para orientarse. En la Figura 2B se representan los elementos del vector de campo magnético. La intensidad total puede ser descompuesta en una componente horizontal y una vertical. El ángulo de inclinación hace referencia al ángulo formado entre la línea de campo y la Tierra (Lohmann, Lohmann, & Endres, 2008).

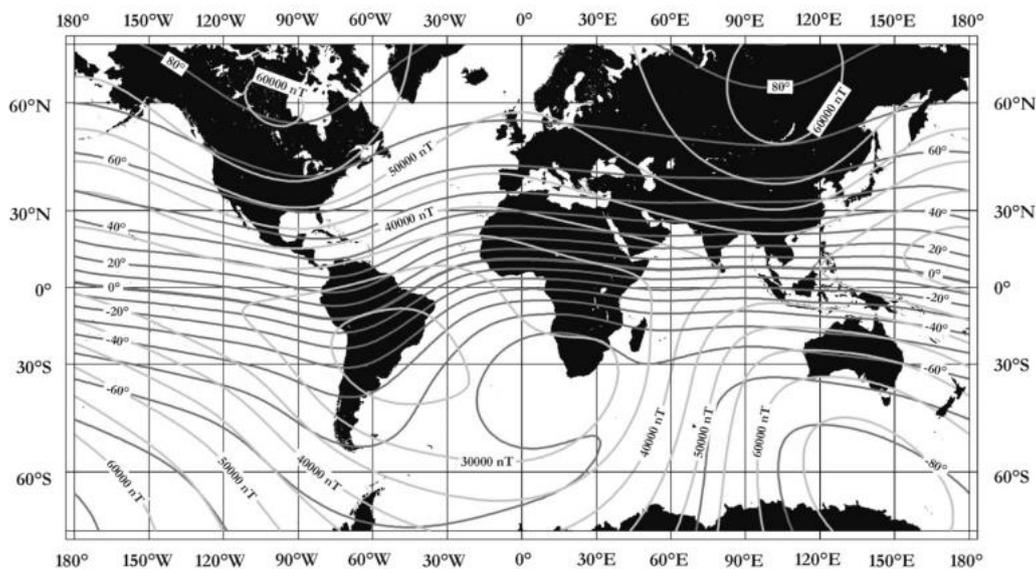


**Figura 2.** A) Diagrama de los polos geográficos y magnéticos y del ecuador geográfico y magnético de la Tierra B) Elementos del vector del campo magnético. Figuras tomadas de (Freake, Muheim & Phillips, 2006; Lohmann et al., 2008).

### 1.2.1.2. Empleo del campo magnético en tortugas marinas

A causa de que los campos magnéticos afectan a todos los seres vivos se ha estudiado, en gran medida, su efecto en animales migratorios como las tortugas marinas (Fanjul de Moles & Oyarzábal, 2007; Carbonell et al., 2017).

El campo magnético terrestre proporciona, a las tortugas marinas, tanto información direccional como de posición geográfica (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007; Putman et al., 2011). La información direccional, conocida como compás magnético, permite mantener un rumbo fijo hacia una dirección actuando a modo de brújula direccional (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007; Fanjul de Moles & Oyarzábal, 2007; Fuxjager et al., 2014). Este tipo de información es proporcionada por el vector magnético (Fanjul de Moles & Oyarzábal, 2007). El compás magnético depende, por tanto, de la dirección axial de las líneas de campo de forma que no diferencian entre Norte-Sur magnético sino que es un movimiento “hacia los polos” o “hacia el ecuador” (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007). La información de posición, conocida como mapa magnético, permite determinar la posición del animal en relación con un objeto (Fuxjager et al., 2014). Se determina gracias al ángulo de inclinación y a la intensidad magnética, es decir, al vector magnético (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007). Además, estudios recientes indican que la información de posición es innata, es decir, no es necesaria una experiencia migratoria para tener información de este tipo (Putman, 2018). Consecuentemente, todos los lugares del mundo pueden ser descritos según su intensidad y ángulo de inclinación (Lohmann, Lohmann & Endres, 2008) tal y como se observa en la Figura 3. Por ello, se considera que el mapa magnético es un sistema bicoordinado (ángulo de inclinación e intensidad) (Putman et al., 2011).



**Figura 3.** Mapa de la Tierra con las intensidades e inclinaciones del campo magnético terrestre. Figura tomada de (Freake, Muheim & Phillips 2006).

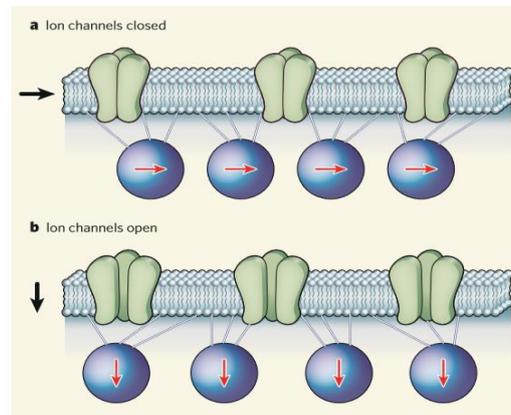
Es importante señalar que el campo magnético sufre oscilaciones en el tiempo y a esta variación se le conoce como variación secular. Se debe a cambios en los patrones de corrientes en el núcleo externo. Esto podría suponer un problema para las tortugas marinas que presentan una impronta magnética de determinadas áreas, como las zonas de forrajeo o las playas de anidación. Estas adquieren, por impronta, las firmas magnéticas de dichas áreas y, si estas firmas varían, provoría que no consiguieran orientarse y alcanzar su objetivo. Sin embargo, un estudio reciente apunta que las tortugas marinas podrían actualizar en cada viaje dichas firmas con lo que no necesariamente tendría que suponer un problema las variaciones seculares (Lohmann & Lohmann, 2019).

### 1.2.1.3. Mecanismo de detección del campo magnético terrestre

Se han propuesto diversas hipótesis para explicar cómo los animales podrían percibir el campo magnético de la Tierra. Una de las hipótesis es la magnetorrecepción química dependiente de la luz, la cual es empleada por animales como aves, moscas de la fruta o tritones. Sin embargo, las tortugas marinas no deben emplear este tipo de magnetorrecepción ya que son capaces de orientarse en ausencia de luz (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007). Por ello, se propone otra hipótesis independiente de la luz: la hipótesis de los cristales de magnetita (minerales ferromagnéticos). La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) fue descubierta por Anaxágoras (499-428 a.C.) y ya desde el año 800 a.C. se conocía que atraía a los fragmentos de hierro (Carbonell et al., 2017). Inicialmente fue encontrada en bacterias magnetotácticas y, con el tiempo, se observó en algunos vertebrados como tortugas marinas, anfibios o salmones. Estos imanes biogénicos se disponen, principalmente, en un tejido que se encuentra ligado con el hueso del cráneo, en la región frontal de la cabeza. Estos cristales, situados en el interior de células especializadas, podrían convertir la fuerza ejercida por el campo magnético terrestre en una señal mecánica detectable por el sistema nervioso. En la mayoría de ellos, aparecen como cristales de un solo dominio (de entre  $1,2 \mu\text{m}$  y  $0,05 \mu\text{m}$ ) actuando como imanes permanentes (Witherington, 2006; Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007; Carbonell et al., 2017). Existen dos mecanismos hipotéticos para que se pueda dar la transducción de la señal: uno de los mecanismos propone que los cristales de magnetita ejercen presión sobre mecanorreceptores (receptores secundarios) cuando la magnetita intenta alinearse con el campo magnético terrestre; el otro mecanismo propone que al rotar los cristales de magnetita, se produce la apertura de canales iónicos, pero esto solo sucedería si, por ejemplo, el citoesqueleto uniese la magnetita con los canales. De esta forma, gracias a las cadenas intracelulares, se podría obtener información tanto de la dirección como de la intensidad del campo terrestre ya que los cristales se alinean en función de la dirección del campo y la dispersión de las partículas depende de la intensidad de dicho campo. Todo ello, permite a los animales obtener información altamente sensible (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007; Lohmann, 2010).

Existe otro modelo independiente del anterior que considera que la magnetorrecepción se debe a partículas superparamagnéticas. Estas partículas de magnetita son de menor tamaño, con propiedades diferentes y sin momentos magnéticos permanentes, al contrario que los cristales de magnetita anteriormente mencionados. A pesar de no ser capaces de alinearse con el campo magnético terrestre, el eje magnético del imán es capaz de rastrear el eje de cualquier campo magnético. Cuando el campo magnético tiene una fuerza similar al terrestre, dichas partículas pueden generar campos capaces de repeler o atraer a otros cristales de forma que la interacción entre ellos es capaz de transformar la señal magnética en información mecánica (Diego-Rasilla & Rodríguez-García, 2007). Además, estas pequeñas partículas podrían estar asociadas a receptores de membrana mecanosensibles capaces de responder a cambios en la dirección y/o en la intensidad del campo magnético, activando canales de membrana y abriendo paso a la transducción de la señal (Freake, Muheim & Phillips 2006; Lohmann, 2010). El mecanismo que sostiene esta hipótesis mantiene que la membrana neuronal está asociada a canales iónicos y a partículas superparamagnéticas unidas mediante filamentos del citoesqueleto. Cuando el campo magnético terrestre es paralelo a la membrana

neuronal, Figura 4 (parte superior), los campos magnéticos de cada partícula se atraen haciendo que la membrana neuronal se comprima y se cierren los canales. Sin embargo, cuando el campo magnético terrestre se encuentra perpendicular a la membrana neuronal, Figura 4 (parte inferior), provoca que los campos magnéticos de las partículas de magnetita se repelan haciendo que la membrana se extienda generando la apertura de los canales iónicos.



**Figura 4.** Hipótesis de magnetorrecepción basado en superparamagnetita. Las esferas azules hacen referencia a las partículas supraparamagnéticas. Las flechas negras indican la orientación del campo magnético terrestre. Imagen tomada de (Lohmann, 2010).

Sin embargo, no hay evidencias del uso de alguno de estos modelos en las tortugas marinas, son hipotéticos, ya que la transducción de la información magnética continúa siendo desconocida para estos organismos (Putman, 2018). A pesar de ello, se conoce que el modelo de cristales de un solo dominio fue evidenciado en truchas y el de partículas superparamagnéticas en palomas, pero sigue siendo objeto de estudio (Johnsen & Lohmann, 2005).

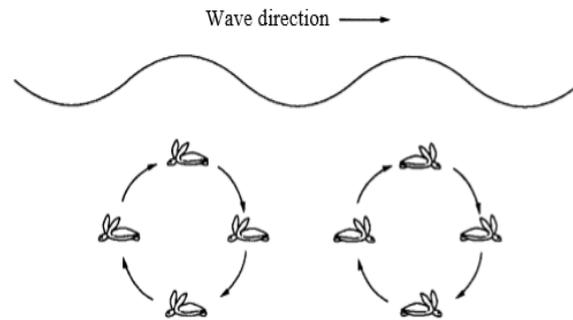
### 1.2.2. Señales químicas, hidrodinámicas, visuales y/o celestes

En las diferentes etapas de la vida de las tortugas marinas, además de utilizar la magnetorrecepción, se valen de señales químicas (principalmente olfativas), hidrodinámicas (olas y corrientes marinas), señales celestes (sol y estrellas) y/o visuales.

Cuando las tortugas marinas emergen de los nidos deben distinguir el brillo del océano gracias a la luz que les proporcionan las estrellas (Secretaría CIT, 2004). Esto lo consiguen porque cuentan con un sistema visual bien desarrollado, con, al menos, tres pigmentos visuales diferentes en su retina (Mäthger et al., 2011).

Una vez en el mar, se valen tanto de la dirección del oleaje como del campo magnético terrestre (Lohmann et al., 2004). Para el primero, emplean ondas refractadas, las cuales son detectadas mediante las aceleraciones producidas dentro de la onda por debajo de la superficie del agua (Cain et al., 2005; Lohmann, Lohmann & Endres, 2008). Una ventaja que presenta el empleo de la dirección del oleaje es que es una señal relativamente constante y las transporta hacia el océano abierto donde pasan varios años a la deriva (Lohmann, Lohmann, & Endres, 2008). El movimiento que realizan los neonatos tras encontrarse con una ola depende de la dirección de la misma: hacia arriba, hacia atrás, hacia abajo y hacia delante (si es en contra) y hacia arriba, hacia delante,

hacia abajo, hacia atrás (si es a favor). En la Figura 5 se representan estos movimientos con un diagrama.



**Figura 5.** Diagrama del movimiento de las crías de tortugas marinas a favor (derecha) o en contra (izquierda) de la dirección de la ola. Figura tomada de (Lohmann, Lohmann, & Endres, 2008).

Tras los años perdidos (hasta convertirse en adultas) las tortugas marinas regresan a las áreas donde nacieron para reproducirse. Se considera que emplean una especie de memoria para recordar las playas natales gracias a factores físicos, químicos o visuales (Secretaría CIT, 2004). Para localizarlas emplean además de señales magnéticas, información química basada en la detección de olores asociados con tierra (Endres & Lohmann, 2013). Este tipo de información no solo lo emplean cuando se encuentran en las proximidades de la zona de anidación sino también cuando regresan a las zonas de forrajeo (Endres & Lohmann, 2013; Brothers & Lohmann, 2015).

Otras señales hidrodinámicas empleadas por las mismas son las corrientes oceánicas. Estas son señales utilizadas en diferentes etapas del ciclo biológico, no solo como medio de transporte sino también para detectar la dirección del flujo oceánico (Fanjul de Moles & Oyarzábal, 2007) y como fuente de información química procedente de tierra (Charlotte et al., 2006). Las tortugas marinas se adaptan a las corrientes de forma que, algunas veces nadan activamente y otras sin embargo, se dejan arrastrar (Collett & Collett, 2011). La desventaja que presentan estas señales hidrodinámicas es que las pueden desviar de su ruta migratoria. Sin embargo, el mapa magnético puede ser empleado para corregir los errores que se producen en la navegación por culpa de las corrientes oceánicas (Putman, 2018).

## **2. OBJETIVOS**

Los objetivos de este trabajo son:

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de los últimos avances sobre los principales mecanismos que utilizan las tortugas marinas para orientarse.
- Analizar si prevalecen algunos mecanismos en las diferentes etapas del ciclo biológico.
- Revisar si todas las especies de tortuga marina emplean las mismas estrategias a la hora de orientarse o si hay discrepancias entre ellas.

### **3. MATERIAL Y MÉTODOS**

Para la toma de información de este trabajo se utilizó la base de datos Web of Science así como otras más específicas como Earth, Atmospheric and Aquatic Sciences y Greenfile. Para comprender la ecología de las tortugas marinas se tomó ayuda de diversos libros generales sobre las mismas.

En las bases de datos se emplearon palabras con carga semántica referentes al título del trabajo (tortugas marinas u orientación) y otros términos que fueron tomando importancia una vez se fue profundizando en el tema (navegación, orientación magnética, magnetorrecepción, campo magnético, geomagnetismo, quimiorrecepción, señales químicas, *Caretta caretta*, *Chelonia mydas*, etc). Estos se fueron combinando, principalmente en inglés, para acotar las búsquedas. Dichas búsquedas se realizaron entre el 10-01-2019 y el 13-06-2019.

Otra forma empleada para obtener la información fue observar la bibliografía utilizada en los propios artículos que se iban recogiendo. Esto se realizó para profundizar en determinados temas.

Tuvo gran relevancia a la hora de elegir la bibliografía, la fecha de publicación y el número de citas. Principalmente, se han evitado artículos con años de publicación anteriores al 2000 ya que el motivo de este trabajo es observar el estado de conocimiento en los estudios más recientes y/o los que presentasen mayores evidencias.

### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

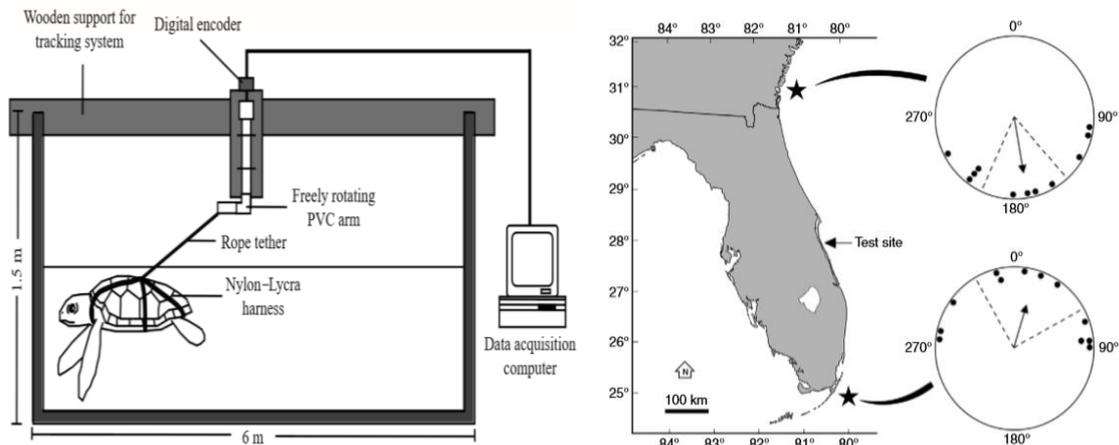
#### **4.1. Evidencias del empleo del campo magnético terrestre para la orientación de las tortugas marinas**

El campo magnético terrestre es considerado la principal forma de orientación que presentan las tortugas marinas. Este mecanismo de orientación afecta tanto a etapas adultas como a estados inmaduros. A continuación, se realiza una revisión sobre las diferentes investigaciones realizadas con las tortugas marinas, en concreto con *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*, en relación con las señales geomagnéticas. La elección de estas dos especies viene dada porque son unos excelentes migradores oceánicos que realizan grandes viajes entre las zonas de forrajeo y las playas de anidación. En el *Anexo 1* se incluye mapas con las distribuciones de dichas especies según: distribución oceánica juvenil, playas de anidación y distribución de juveniles y adultos.

##### **4.1.1. Métodos empleados en el análisis de los campos magnéticos**

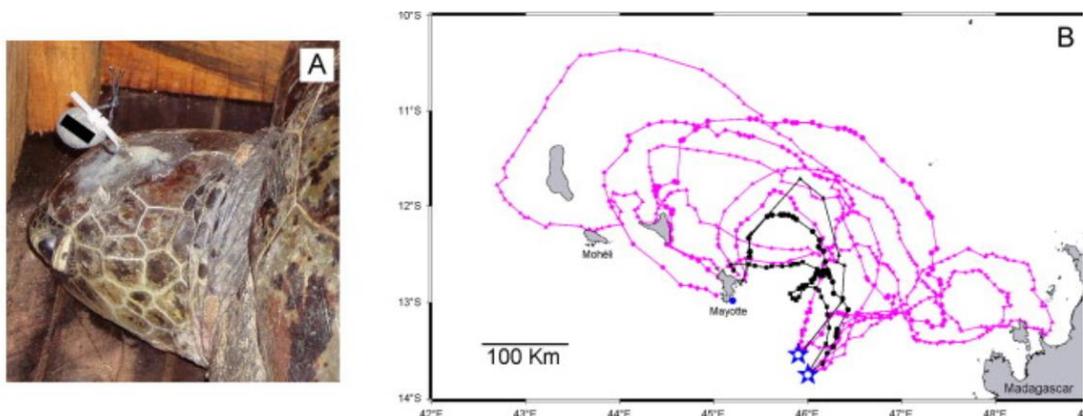
Los métodos empleados para estudiar el comportamiento de las tortugas se basan en análisis de laboratorio y/o de campo. Los análisis de laboratorio tiene la ventaja de poder controlar las condiciones de muestreo. Una de las técnicas más utilizadas en laboratorio se ilustra en la Figura 6A, donde se estudia el comportamiento de las tortugas marinas tras someterlas a campos magnéticos de zonas específicas. Se introduce al ejemplar en un tanque y se sostiene mediante un arnés unido a un brazo de libre movimiento. Los cambios de dirección realizados por el ejemplar, son registrados por un ordenador.

Lohmann, Lohmann y Endres en el 2008, expusieron a juveniles de *Chelonia mydas* a campos magnéticos existentes a 340 km al Norte y al Sur de la costa de Florida (área de forrajeo). Los resultados ilustrados en la Figura 6B, muestran que los juveniles con campos magnéticos del Norte, nadaron hacia el Sur y los que fueron expuestas a campos magnéticos del Sur, nadaron al Norte. Esto se interpreto como que eran capaces de detectar el campo magnético y responder comportamentalmente a este.



**Figura 6. A)** Diagrama de la arena experimental y el sistema con el que se obtienen los datos. **B)** Experimento de juveniles de *C. mydas*. Las estrellas representan el campo magnético expuesto. En el diagrama de orientación cada punto representa el ángulo medio de cada tortuga. La flecha representa el ángulo medio del grupo y las líneas punteadas representan el intervalo de confianza del ángulo medio. Figuras tomadas de (Avens & Lohmann, 2003; Lohmann, Lohmann & Endres, 2008).

Los análisis de campo suelen consistir en la incorporación de imanes suspendidos a 3 cm de la cabeza para inhibirles las señales magnéticas, como se muestra en la Figura 7A.



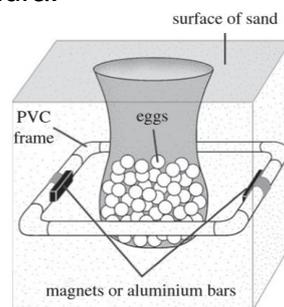
**Figura 7. A)** Imán fijado en la cabeza de *C. mydas*. **B)** Rutas tomadas por los grupos experimentales (en negro los controles y en rosa los grupos con campos magnéticos alterados); las estrellas indican los sitios de liberación). Figuras tomadas de (Luschi et al., 2007).

De esta forma, se alargan las rutas migratorias tal y como se puede observar en la Figura 7B, donde se muestra un experimento realizado con *Chelonia mydas* (Luschi et al., 2007). Estos métodos se llevaron a cabo porque las tortugas marinas, al igual que otros muchos migradores, son capaces de responder a cambios en el campo magnético. De esta forma, al variar la intensidad y/o la

inclinación del campo magnético terrestre son capaces de responder comportamentalmente (Collett & Collett, 2011).

#### 4.1.2. Influencia de los campos magnéticos en las puestas

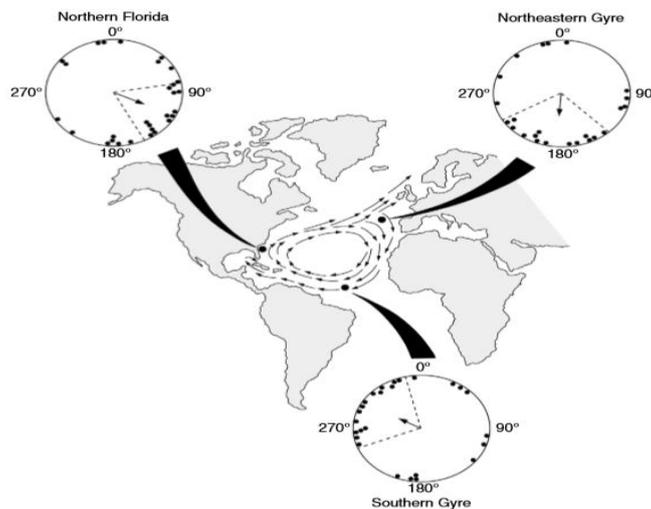
Fuxjager, Davidoff, Mangiamele y Lohmann en 2014 han demostrado que, al alterar el campo magnético de las puestas con imanes, se altera la orientación magnética de las crías ocasionando cambios en el comportamiento futuro. En la Figura 8 se representa el experimento llevado a cabo con las puestas de *Caretta caretta*; las puestas presentaban un marco de PVC alrededor y, a cada lado, imanes o barras de aluminio. Tras llevar a cabo el experimento, se observó que las crías no eran capaces de establecer un rumbo fijo (información direccional). Este hecho sugiere que la ontogenia del sentido magnético de las puestas se vio modificada. Los autores del estudio no consiguieron determinar si los efectos podrían ser permanentes o de larga duración o bien transitorios y desaparecer cuando la tortuga marina madura.



**Figura 8.** Diagrama del experimento llevado a cabo con las puestas de *Caretta caretta*. Figura tomada de (Fuxjager et al., 2014).

#### 4.1.3. Herencia de la capacidad de orientarse por parte de las crías

Lohmann, Lohmann y Endres en 2008, dispusieron en diferentes puntos del Atlántico Norte a crías de *Caretta caretta* para comprobar si eran capaces de reubicarse empleando el campo magnético terrestre.



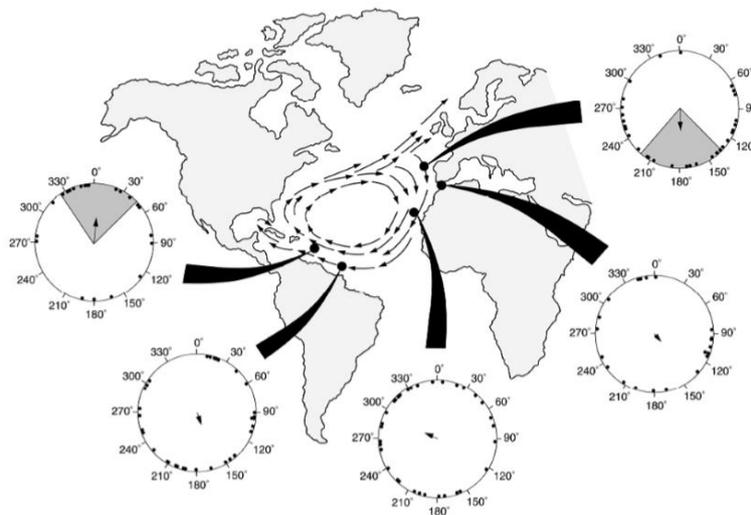
**Figura 9.** Ubicaciones de las crías de *Caretta caretta*. Los puntos indican el ángulo medio de cada cría. La flecha indica el ángulo medio del grupo y las líneas punteadas el intervalo de confianza al 95%. Figura tomada de (Lohmann, Lohmann & Endres, 2008).

Los resultados que obtuvieron mostraron lo siguiente: las crías ubicadas al Norte de Florida se reubicaron hacia el Sureste; las que se encontraban al Noreste de las corrientes del Atlántico Norte nadaron hacia el Sur y, las ubicadas más hacia el Sur nadaron hacia el Noroeste. Esto mismo se puede observar en los diagramas de la Figura 9.

Se evidenció, por tanto, que las crías habían heredado un mapa magnético ya que nunca habían estado en el océano abierto y no era posible el aprendizaje de la topografía magnética. Esta misma conclusión se obtuvo posteriormente en un estudio realizado por Fuxjager, Davidoff, Mangiamele y Lohmann en 2014.

#### 4.1.4. Influencia de la ecología en las señales magnéticas

Putman, Verley, Endres y Lohmann en 2015 simularon las coordenadas magnéticas de diferentes puntos de la corriente del Atlántico Norte, en la Figura 10 marcados con puntos negros, para determinar el comportamiento de *Caretta caretta* y a qué podía ser debido.



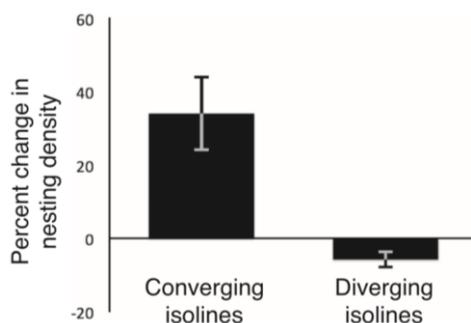
**Figura 10.** Ubicaciones simuladas de los ejemplares de *Caretta caretta* en la corriente del Atlántico Norte. Los puntos indican el ángulo medio de cada cría. La flecha indica el ángulo medio del grupo y las zonas sombreadas el intervalo de confianza del 95%. Figura tomada de (Putman et al., 2015).

Tras realizar el experimento en el laboratorio, se observó lo siguiente: las que se encontraban en Barbados y el Norte de Portugal siguieron la corriente ya que de no hacerlo, morirían o se perderían por las bajas temperaturas del agua durante casi todo el año; las que se localizaban al Noroeste de Surinam, Canarias y en el Estrecho de Gibraltar se encontraban a la deriva. Esto último podría deberse a que uno de los puntos (Atlántico oriental) es una zona de forrajeo por lo que no necesitaban orientarse para salir de dicha región y en otro de ellos, las corrientes eran rápidas dirigiéndolas eficientemente a su destino. Estos resultados son fácilmente observables en los diagramas de la Figura 10. Por lo tanto, dichos ejemplares podrían verse influenciados por la ecología de la zona.

#### 4.1.5. Influencia de las firmas magnéticas en la densidad de anidación

Se ha evidenciado la posibilidad de que las playas de anidación correspondan con las playas natales, hecho conocido con el término de “natal homing”. Este comportamiento no solo fue evidenciado en tortugas marinas sino también en otros animales. Brothers y Lohmann en 2015 consideraron que esto podría ser posible si las tortugas marinas se valiesen de la impronta geomagnética ya que la mayoría de las playas de anidación, presentan firmas magnéticas determinadas. Además, se cree que las tortugas marinas cuando nacen detectan la firma magnética concreta de dicha playa y son capaces de memorizarla hasta que, en la época de reproducción, las emplean para regresar a la misma playa, es decir, a la playa donde emergieron.

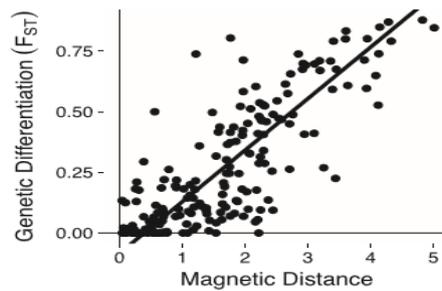
Brothers y Lohmann en 2015 determinaron además que, cuando las firmas magnéticas (isolíneas de inclinación o de intensidad) eran similares (dichas isolíneas convergían) la densidad de anidación por superficie aumentaba y cuando las isolíneas diferían (las isolíneas divergían) a lo largo de la costa, la densidad de anidaciones disminuía. Esta relación positiva se puede observar en Figura 11. Este hecho permitió evidenciar que las tortugas marinas emplean firmas magnéticas para localizar las playas natales. Sin embargo, no se conocen hasta el momento qué parámetros del campo magnético son los que influyen, si intensidad y/o inclinación magnética.



**Figura 11.** Representación gráfica de la relación entre la densidad de anidación y la convergencia/divergencia de las isolíneas. Imagen tomada de (Brothers & Lohmann, 2015).

#### 4.1.6. Influencia de las firmas magnéticas en la determinación de la variación genética de las poblaciones

Años más tarde del estudio anterior, los mismos autores (Brothers y Lohmann) comprobaron que las poblaciones de *Caretta caretta* que anidaban en playas con firmas similares eran genéticamente parecidas. Esto puede observarse en la Figura 12, donde en el eje Y se representan las diferencias genéticas ( $F_{ST}$ ) y en el eje X, la distancia magnética.  $F_{ST}$  indica que a valores bajos hay similitud genética y a valores altos hay diferencias genéticas (Brothers & Lohmann, 2018).



**Figura 12.** Representación gráfica de la relación positiva entre las diferencias genéticas y la distancia magnética. Figura tomada de (Brothers & Lohmann, 2018).

Esto es posible ya que dos o más playas natales pueden presentar firmas magnéticas parecidas (varían poco de Este a Oeste) y las tortugas marinas podrían acabar en la playa errónea (Brothers & Lohmann, 2015). Por esta razón, presentan un rango de anidación circunglobal (Putman, 2018). Esto por tanto, evidenció el empleo de las señales magnéticas como mecanismo de orientación. Además, esto mismo se puede apreciar en las playas de anidación de *Caretta caretta* en el Anexo 1.

#### **4.2. Evidencias del empleo de señales químicas, hidrodinámicas, visuales y/o celestes**

Además del empleo de los campos magnéticos para la orientación, se considera que deben existir más estrategias que ayuden a las tortugas marinas a llegar a sus metas. Cabe destacar que, ninguna de estas señales no magnéticas ha sido tan ampliamente estudiada y evidenciada como en el caso de las señales magnéticas. Seguidamente, se muestran algunas de las evidencias observadas:

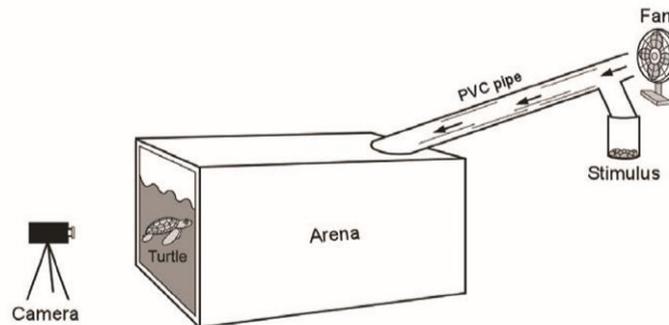
##### **4.2.1. Evidencias del empleo de señales químicas**

Endres y Lohmann en 2012 llevaron a cabo un experimento de campo donde consideraron que era posible que *Chelonia mydas* emplease un penacho químico transportado por el viento para reconocer la Isla Ascensión (rica en vegetación y, por tanto, en sustancias odoríferas). Esto se determinó porque, en estudios anteriores, se observó que al desplazar a *Chelonia mydas* de la Isla Ascensión, esta siempre conseguía alcanzala por el Noroeste (dirección contraria al viento) (Luschi et al., 2001).

Tras este estudio, los mismos autores (Endres y Lohmann) llevaron a cabo un experimento con *Caretta caretta* en 2013, para estudiar la capacidad de las tortugas marinas de detectar olores procedentes de tierra. Uno de los olores ensayados fue el disulfuro de dimetilo (DMS) ya que este se libera cuando un animal se alimenta de fitoplancton. Otros olores simulados fueron los aceites esenciales (canela, jazmín y limón). Dicho experimento fue realizado en el laboratorio, como se muestra en la Figura 13, donde se sometieron a los ejemplares a las sustancias mediante un pequeño ventilador. Cuando se simularon olores de DMS los ejemplares pasaron más tiempo en la superficie del agua que el control (sin sustancias odoríferas liberadas). Estos resultados se interpretaron como que las tortugas marinas eran capaces de reconocer estímulos olfativos significativos en el aire. Sin embargo, no sucedió lo mismo cuando se sometía a *Caretta caretta* a aceites esenciales. Esto último era debido

a que la respuesta no era generalizada para todos los olores, sino que solo detectaban aquellos asociados con su dieta.

Aclarar que, se seleccionó esta especie ya que viaja por zonas de convergencia y divergencia donde hay una elevada productividad de fitoplancton.



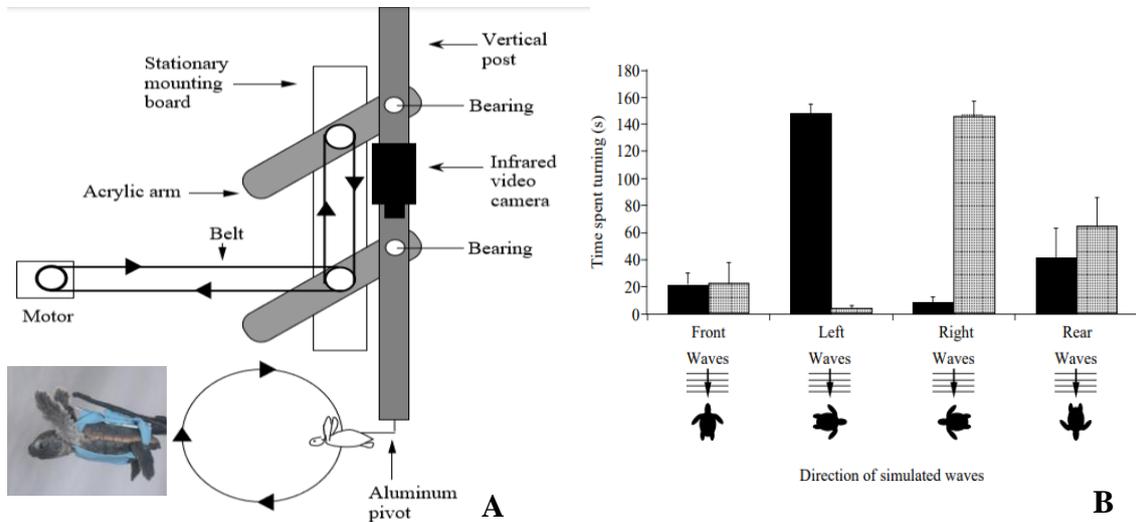
**Figura 13.** Esquema del experimento en el laboratorio dentro de una arena de fibra de vidrio. Figura tomada de (Endres & Lohmann, 2013).

Es importante mencionar que, hasta el momento, no se conoce la funcionalidad de esta señal química. Podría ser una respuesta comportamental de tipo alimenticio y no de tipo migratorio. Esto se explicaría ya que las señales odoríferas empleadas en el experimento, contenían estimulantes alimenticios como azufre y materia orgánica que llaman la atención de las tortugas marinas. Además, detectar este tipo de señales les serviría como fuente de información. Si estas señales son detectadas por juveniles les permitirían encontrar aguas poco profundas y con depredadores, respondiendo con la huida hacia aguas más profundas. Sin embargo, si son detectadas por adultos, les permitirían determinar áreas de forrajeo y/o áreas de anidación (como es el caso de *Chelonia mydas* que anida en la Isla de Ascensión en el océano Atlántico) (Endres & Lohmann, 2013). Por ello, son necesarios más estudios para poder determinar el objetivo de la detección de estos olores procedentes de tierra (Lohmann, Lohmann & Endres, 2008; Endres & Lohmann, 2012; Endres & Lohmann, 2013). Asimismo, esta capacidad podría estar presente en otras tortugas marinas como la tortuga *Dermodochelys coriacea* que también realiza grandes migraciones oceánicas y se alimenta en zonas de alta productividad.

#### 4.2.2. Evidencias del empleo de la dirección de las olas

Las crías son capaces de orientarse en función de la dirección de propagación de la onda teniendo en cuenta las secuencias de aceleraciones que experimenta cuando una ola pasa por encima de ellas. Esto se ha comprobado en un experimento realizado con *Caretta caretta* y *Chelonia mydas*. Este experimento se llevó a cabo en el laboratorio, Figura 14A, mediante un simulador de ondas que reproduce en el aire los movimientos ondulatorios de las olas del océano. Una vez se sometió a una de estas dos especies a olas directamente de frente, esta invirtió poco tiempo girando hacia la derecha o hacia la izquierda. Al someterla a olas desde la izquierda, invertía más tiempo en girar hacia la izquierda. Si esto mismo se repetía hacia la derecha, sucedía lo contrario, invertía más tiempo en girar hacia la derecha. Tras someterla a olas traseras, la mayoría invertía más tiempo girando hacia la derecha que hacia la izquierda. Estos resultados se pueden apreciar con mayor claridad en la gráfica de la Figura 14B, donde las barras negras indican el tiempo invertido en girar a la

izquierda y las grises, en girar a la derecha. Todo ello, sirvió para demostrar que, estos pequeños migradores, son capaces de percibir las olas y orientarse en función de su dirección (Lohmann, Swartz, & Lohmann, 1995; Fuxjager et al., 2014).

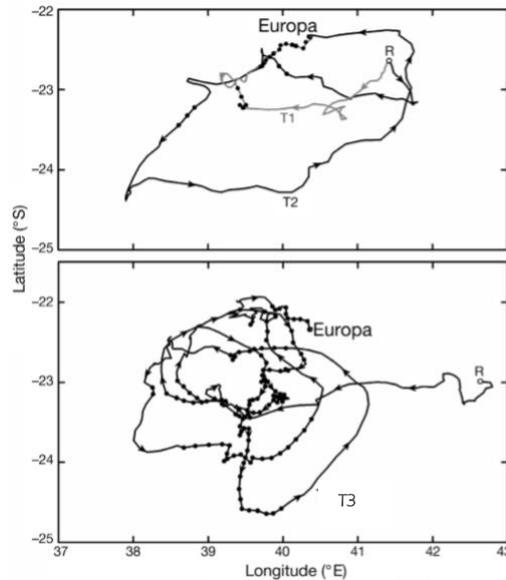


**Figura 14. A)** Simulador de ondas mediante secuencias de aceleración. **B)** Resultados obtenidos del experimento con *Caretta caretta* tras someterla a diferentes direcciones de las ondas. En cada barra se indica el error estándar. Figuras tomadas de (Lohmann, Swartz, & Lohmann, 1995; Lohmann, Lohmann & Endres 2008).

#### 4.2.3. Evidencias del empleo de las corrientes oceánicas

Las tortugas marinas realizan grandes migraciones entre las zonas de forrajeo y las de anidación. En estas migraciones, las corrientes oceánicas podrían influir en sus desplazamientos tal y como se ha mencionado en el apartado 4.1.4. Las corrientes oceánicas no solo podrían proporcionar información de la navegación sino que también, tienen un efecto mecánico que provoca la aceleración, ralentización o desviación de la ruta migratoria (Girard et al., 2006). Sin embargo, son escasos los estudios con evidencias claras de los efectos en las tortugas marinas.

En un estudio llevado a cabo por Girard, Sudre, Benhamou, Roos y Luschi en 2006 con tres ejemplares de *Chelonia mydas*, se intentó probar si estos migradores pelágicos eran capaces de corregir el desplazamiento provocado por las corrientes oceánicas y si estas les proporcionaban algún tipo de información. Los ejemplares de *C. Mydas* fueron desplazadas, aproximadamente, a 150 km de las playas de Europa. Los resultados mostraron la incapacidad de compensar el desplazamiento de las corrientes oceánicas ya que los ejemplares, llevaron a cabo rutas más o menos largas para llegar a las playas de Europa. Las rutas tomadas por las tres tortugas marinas (T1, T2 y T3) pueden observarse en la Figura 15. En esta misma figura se puede percibir que la T3 realizó una ruta más tortuosa en comparación con T1 o T2.



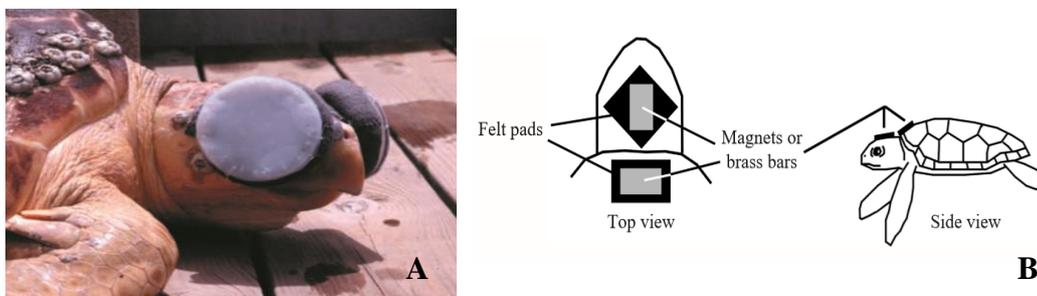
**Figura 15.** Rutas tomadas por las tres tortugas marinas (T1, T2 y T3). Figura tomada de (Girard et al., 2006).

Sin embargo, este estudio se basa en tan solo tres ejemplares de *Chelonia mydas* por lo que no se pueden sacar conclusiones claras acerca de la influencia de las corrientes oceánicas en las tortugas marinas. Además, cabe destacar que no existen estudios posteriores que saquen conclusiones firmes sobre el efecto de dichas corrientes.

#### 4.2.4. Evidencias del empleo de señales visuales y/o celestes

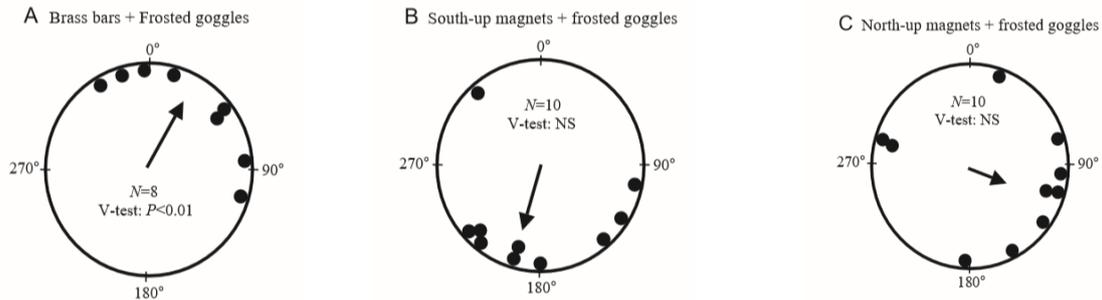
Se considera que las tortugas marinas podrían emplear las señales celestes en el momento de emerger del nido para localizar el océano mediante el brillo de las estrellas en el agua (valiéndose también de las señales magnéticas). Además, algunos estudios han considerado que también podrían hacer uso de las señales visuales para localizar tierra firme (islas o costas) aunque esto no ha sido demostrado. Asimismo, son pocos los estudios que apuntan al empleo de este tipo de mecanismo para la orientación de las mismas.

Avens y Lohmann en 2003 observaron el comportamiento de ejemplares de *Caretta caretta* al inhibirles las señales magnéticas y/o las visuales. En la Figura 16A y Figura 16B se ilustra los materiales empleados para inhibirles las señales visuales y/o magnéticas.



**Figura 16. A)** Especie de tortuga marina *Caretta caretta* con gafas que presentan lentes de esmerilado; **B)** Diagrama de la especie *Caretta caretta* con imanes y barras de latón. Figuras tomadas de (Avens & Lohmann, 2003).

Los resultados revelaron que tras reprimirles una de estas señales, las tortugas marinas respondían correctamente, pero al privarles de ambas señales, no conseguían alcanzar su objetivo. Esto último se aprecia en la Figura 17B y Figura 17C, donde cada punto representa la diferencia angular media entre el día 2 frente al día 1. Por ello, estos autores consideraron que ambas fuentes de información operaban conjuntamente y en ausencia de alguna de ellas, las tortugas se valían de aquella que estuviese presente. Además, es importante señalar que no consiguieron determinar qué tipo de información visual emplean.



**Figura 17.** Resultados del experimento en el que se interrumpe las señales visuales y magnéticas. **A)** Tratamiento control con barras de latón y gafas con esmerilado; **B)** Tratamiento con gafas esmeriladas e imanes hacia el Sur; **C)** Representa el tratamiento con gafas esmeriladas e imanes hacia el Norte. Figuras tomadas de (Avens & Lohmann, 2003).

## 5. CONCLUSIONES

Las tortugas marinas se valen de diversos mecanismos para orientarse a lo largo del ciclo biológico. La estrategia empleada por excelencia es el campo magnético terrestre, mediante un sistema que les informa tanto de la dirección (compás magnético) como de la posición geográfica (mapa magnético). Para extraer la información de posición no es necesaria la experiencia migratoria, como en el caso de la información direccional, lo que viene a indicar que es de carácter innato. El campo magnético parece ser detectado mediante los cristales de magnetita que convierten este tipo de información en una señal mecánica detectable por el sistema nervioso. Además de este sistema de referencia de navegación, se considera que podría haber otros que lo complementen, como estímulos químicos (olfativos), estímulos hidrodinámicos (olas y corrientes) y visuales o celestes. Pese a ello, no hay evidencias suficientes que respalden esta hipótesis. Asimismo, estos mecanismos son empleados en diferente grado a lo largo de las diferentes etapas de su ciclo biológico.

Sin embargo, los hallazgos que han llevado a considerar este sistema multisensorial, han sido resultado de investigaciones realizadas principalmente en el laboratorio bajo condiciones controladas y en menor medida, investigaciones de campo. Es importante mencionar que los ambientes controlados no son del todo realistas ya que se les priva de información que, en un ambiente natural, estaría presente. Esto provoca unas respuestas comportamentales que no necesariamente se desarrollarían bajo un hábitat natural. Por ende, considero que serían necesarios más estudios en condiciones naturales para testar los hallazgos observados en ambientes controlados. A

pesar de ello, en la actualidad, siguen siendo limitadas las metodologías empleadas para estudiar el comportamiento de las tortugas marinas en el campo. De igual forma, considero que los mecanismos de orientación de estos migradores pelágicos siguen siendo un campo con grandes vacíos, no solo por la dificultad de estudio en el océano, sino también porque, hasta la fecha, no se ha conseguido interpretar completamente los resultados observados en las investigaciones.

Finalmente, aunque diversos autores extrapolan sus resultados a todas las especies de tortugas marinas, queda por analizar si los mecanismos para determinadas especies son utilizados también por las demás, teniendo en cuenta las diferencias en los patrones de distribución y en el ciclo de vida.

### **CONCLUSIONS**

Sea turtles use different mechanisms to orient themselves throughout their biological cycle. The strategy used by excellence is the earth's magnetic field, through a system that informs about both, the direction (magnetic compass) and the geographical position (magnetic map). In order to extract the position information, the migratory experience is not necessary, as in the case of directional information, which indicates that it is of an innate nature. The magnetic field seems to be detected through magnetite crystals, that turn this type of information into a mechanical signal detectable by the nervous system. It is considered that there could be other mechanisms that complement each other, such as chemical (olfactory), hydrodynamic (waves and currents) and visual or celestial stimuli. Despite this, there is not enough evidence to support this hypothesis. Moreover, these mechanisms are differently used in the different stages of their biological cycle.

However, the results that brought to consider this multisensory system, have been the result of investigations in the laboratory under controlled conditions and, to a lesser extent, under field conditions. It is important to say that the controlled environments are not entirely realistic and that they are deprived of information that, in a natural environment, could be present. This causes behavioural responses that would not necessarily develop under a natural habitat. Therefore, I think that more studies in natural conditions would be necessary to test the findings observed in controlled environments

Despite this, at present, the methodologies used to study the behaviour of sea turtles in the field are still limited. Likewise, I believe that the orientation mechanisms of these migrators continue to be a field with large gaps, not only because of the difficulty of studies in the ocean, but also because to date, the results observed have not been fully interpreted.

Finally, although several authors extrapolate their results to all species of sea turtles, it remains to be analysed if the mechanisms observed in certain species are also used by others taking into account the differences in their distribution patterns and in their life cycle.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecer a Montserrat Domínguez Pérez y a Nuria Fernández Rodríguez no solo por su dedicación sino también por su amabilidad, comprensión y el apoyo brindado durante todo el camino. En segundo lugar, a los compañeros de la biblioteca, tanto por la atención como por la ayuda prestada en los aspectos bibliográficos. En tercer lugar y más importante, quiero dar las gracias a mi familia, por ser mi motor y mi apoyo incondicional.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Avens, L., & Lohmann, K. J. (2003). Use of multiple orientation cues by juvenile loggerhead sea turtles *Caretta caretta*. *Journal of Experimental Biology*, 206(23), 4317-4325. doi:10.1242/jeb.00657
- Brothers, J. R., & Lohmann, K. J. (2015). Evidence for geomagnetic imprinting and magnetic navigation in the natal homing of sea turtles. *Current Biology*, 25(3), 392-396. doi:10.1016/j.cub.2014.12.035
- Brothers, J. R., & Lohmann, K. J. (2018). Evidence that magnetic navigation and geomagnetic imprinting shape spatial genetic variation in sea turtles. *Current Biology*, 28(8), 1325-1329. doi:10.1016/j.cub.2018.03.022
- Cain, S. D., Boles, L. C., Wang, J. H., & Lohmann, K. J. (2005). Magnetic orientation and navigation in marine turtles, lobsters, and molluscs: Concepts and conundrums. *Integrative and Comparative Biology*, 45(3), 539-546. doi:10.1093/icb/45.3.539
- Carbonell, M. V., Flórez, M., Martínez, E., & Álvarez, J. (2017). Aportaciones sobre el campo magnético: Historia e influencia en sistemas biológicos. *Intropica*, 12(2), 143-159. doi:10.21676/23897864.2282
- Charlotte, G., Sudre, J., Simon, B., Roos, D., & Luschi, P. (2006). Homing in green turtles *Chelonia mydas*: Oceanic currents act as a constraint rather than as an information source. *Marine Ecology Progress Series*, 322, 281-289. doi:10.3354/meps322281
- Collett, T. S., & Collett, M. (2011). Animal navigation: Following signposts in the sea. *Current Biology*, 21(20), R843-R846. doi:10.1016/j.cub.2011.09.002
- Diego-Rasilla, F. J. (2004). El sentido magnético y su uso en la orientación de los animales. En D. Pereira, M. A. Bárcena, I. Rubio & J. Sesma (Eds.), *Aproximación a las ciencias planetarias* (pp. 269-297). Salamanca: Ediciones Universidad de Salamanca.
- Diego-Rasilla, F. J., & Rodríguez-García, L. (2007). Orientación magnética y magnetorrecepción en anfibios. *Revista Española de Herpetología*, 21, 19-39. Recuperado de <https://www.herpetologica.es/publicaciones/revista-espanola-de-herpetologia>
- Endres, C. S., & Lohmann, K. J. (2012). Perception of dimethyl sulfide (DMS) by loggerhead sea turtles: A possible mechanism for locating highproductivity oceanic regions for foraging. *Journal of Experimental Biology*, 215(20), 3535-3538. doi:10.1242/jeb.073221

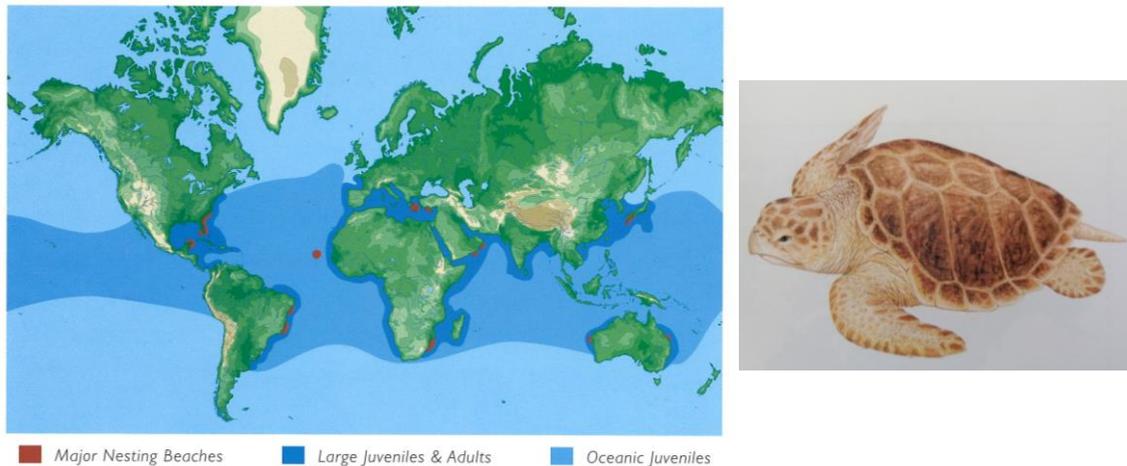
- Endres, C. S., & Lohmann, K. J. (2013). Detection of coastal mud odors by loggerhead sea turtles: A possible mechanism for sensing nearby land. *Marine Biology*, 160(11), 2951-2956. doi:10.1007/s00227-013-2285-6
- Fanjul de Moles, M. L., & Oyarzábal, A. (2007). Navegación animal. *Investigación y Ciencia*, 375, 66-73.
- Freake, M. J., Muheim, R., & Phillips, J. B. (2006). Magnetic maps in animals: A theory comes of age? *The Quarterly Review of Biology*, 81(4), 327-347. doi:10.1086/511528
- Fuxjager M. J., Davidoff K. R., Mangiamele L. A., & Lohmann K. J. (2014). The geomagnetic environment in which sea turtle eggs incubate affects subsequent magnetic navigation behaviour of hatchlings. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1791), 20141218. doi:10.1098/rspb.2014.1218
- Girard, C., Sudre, J., Benhamou, S., Roos, D., & Luschi, P. (2006). Homing in green turtles *Chelonia mydas*: Oceanic currents act as a constraint rather than as an information source. *Marine Ecology Progress Series*, 322, 281- 289. doi:10.3354/meps322281
- Johnsen, S., & Lohmann, K. J. (2005). The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(9), 703-712. doi:10.1038/nrn1745
- Lohmann, K., Swartz, A., & Lohmann, C. (1995). Perception of ocean wave direction by sea turtles. *Journal of Experimental Biology*, 198(5), 1079- 1085. Recuperado de <https://jeb.biologists.org>
- Lohmann, K. J. (2010). Magnetic-field perception. *Nature*, 464(7292), 1140-1142. doi:10.1038/4641140a
- Lohmann, K. J., & Lohmann, C. M. F. (2019). There and back again: natal homing by magnetic navigation in sea turtles and salmon. *Journal of Experimental Biology*, 222(Suppl 1), jeb184077. <https://doi.org/10.1242/jeb.184077>
- Lohmann, K. J., Lohmann, C. M. F., Ehrhart, L. M., Bagley, D. A., & Swing, T. (2004). Geomagnetic map used in sea-turtle navigation. *Nature*, 428(6986), 909-910. doi:10.1038/428909a
- Lohmann, K. J., Lohmann, C. M. F., & Endres, C. S. (2008). The sensory ecology of ocean navigation. *Journal of Experimental Biology*, 211(11), 1719-1728. doi:10.1242/jeb.015792
- Luschi, P., Åkesson, S., Broderick, A. C., Glen, F., Godley, B. J., Papi, F., & Hays, G. C. (2001). Testing the navigational abilities of ocean migrants: displacement experiments on green sea turtles (*Chelonia mydas*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 50(6), 528-534. doi:10.1007/s002650100396
- Luschi, P., Benhamou, S., Girard, C., Ciccione, S., Roos, D., Sudre, J., & Benvenuti, S. (2007). Marine turtles use geomagnetic cues during open-sea homing. *Current Biology*, 17(2), 126-133. doi:10.1016/j.cub.2006.11.062
- Mähnger, L. M., Lohmann, K. J., Limpus, C. J., & Fritsches, K. A. (2011). An unsuccessful attempt to elicit orientation responses to linearly polarized light in hatchling loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1565), 757-762. doi:10.1098/rstb.2010.0212

- Putman, N. (2018). Marine migrations. *Current Biology*, 28(17), R972-R976. doi:10.1016/j.cub.2018.07.036
- Putman, N. F., Endres, C. S., Lohmann, C. M. F., & Lohmann, K. J. (2011). Longitude perception and bicoordinate magnetic maps in sea turtles. *Current Biology*, 21(6), 463-466. doi:10.1016/j.cub.2011.01.057
- Putman, N. F., Verley, P., Endres, C. S., & Lohmann, K. J. (2015). Magnetic navigation behavior and the oceanic ecology of young loggerhead sea turtles. *Journal of Experimental Biology*, 218(7), 1044-1050. doi:10.1242/jeb.109975
- Secretaría CIT. (2004). *Una introducción a las especies de tortugas marinas del mundo*. Recuperado de <http://www.iacseaturtle.org/docs/publicaciones/5-EspeciesTortugasMarinasMundoesp.pdf> [Acceso 17-02-2019]
- Spotila J. R. (2004). *Sea turtles: A complete guide to their biology, behavior, and conservation*. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press.
- Witherington, B. (2006). *Sea turtles*. Grantown-on-Spey: Colin Baxter Photography.

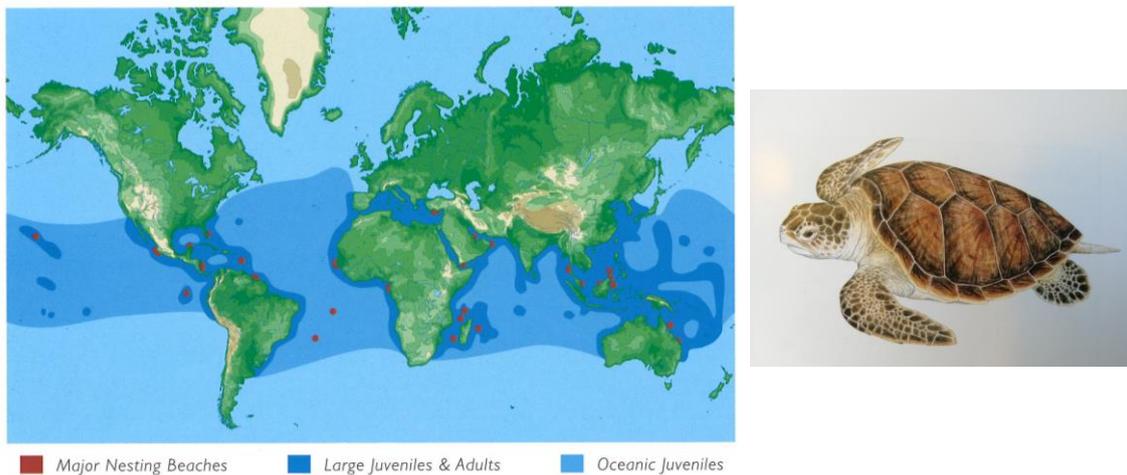


## **ANEXO 1**

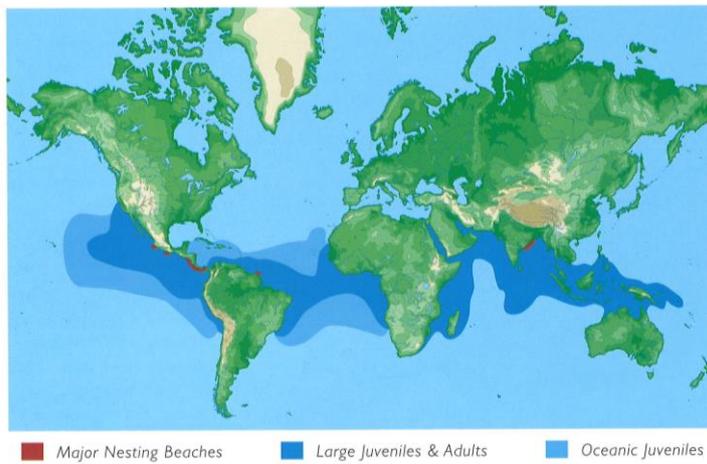
A continuación, se muestran los mapas de las distribuciones de las siete especies de tortugas marinas para hacer hincapié en sus largas migraciones, a excepción de alguna especie como *Natator depressus*. En cada figura se señala en rojo, las playas de anidación; en azul oscuro, la distribución de los juveniles y adultos y en azul claro, la distribución de la etapa oceánica de los juveniles. Además, cada mapa va acompañado de una ilustración de cada especie de tortuga marina.



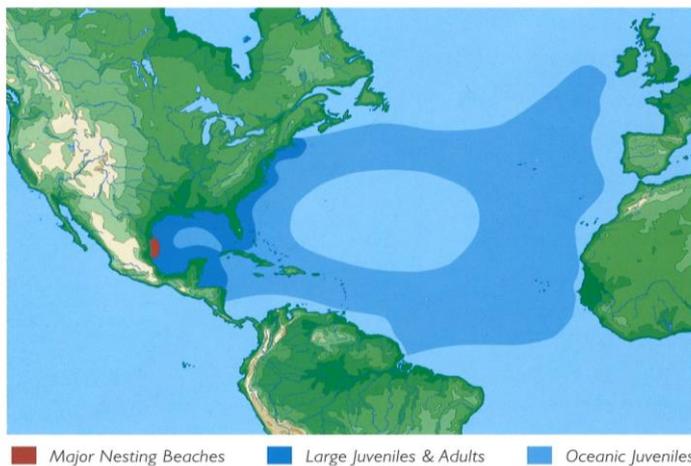
**Figura 1A.** Mapa e ilustración de *Caretta caretta*. Figuras tomadas de (Spotila, 2004), (Witherington, 2006).



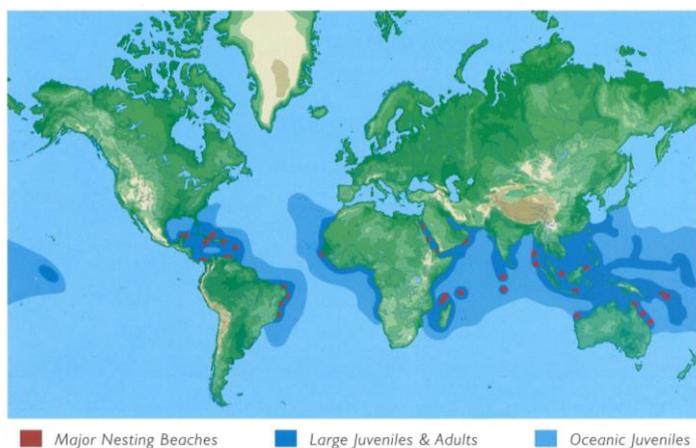
**Figura 2A.** Mapa e ilustración de *Chelonia mydas*. Figuras tomadas de (Spotila, 2004), (Witherington, 2006).



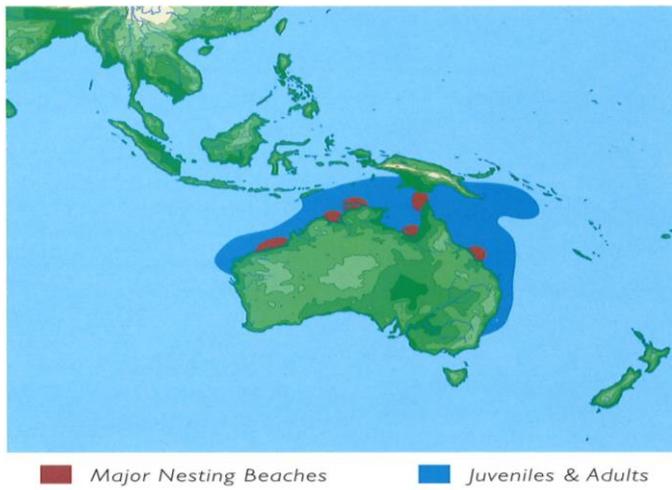
**Figura 3A.** Mapa e ilustración de *Eretmochelys imbricata*. Figuras tomadas de (Spotila, 2004), (Witherington, 2006).



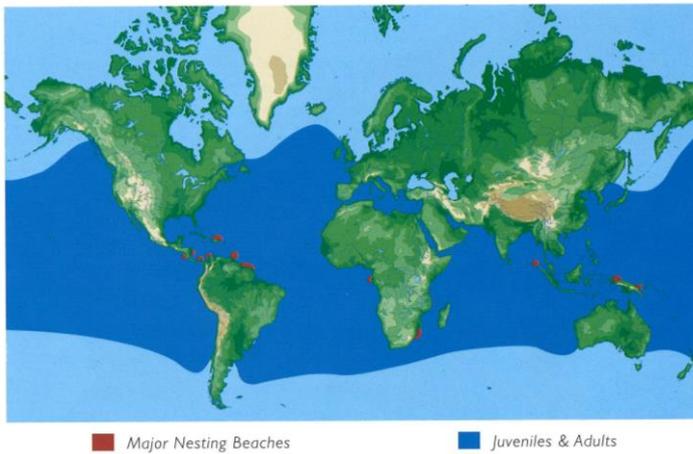
**Figura 4A.** Mapa e ilustración de *Lepidochelys olivacea*. Figuras tomadas de (Spotila, 2004), (Witherington, 2006).



**Figura 5A.** Mapa e ilustración de *Lepidochelys kempii*. Figuras tomadas de (Spotila, 2004), (Witherington, 2006).



**Figura 6A.** Mapa e ilustración de *Natator depressus*. Figuras tomadas de (Spotila, 2004), (Witherington, 2006).



**Figura 7A.** Mapa e ilustración de *Dermochelys coriacea*. Figuras tomadas de (Spotila, 2004), (Witherington, 2006).