

Impacto del Cambio Climático en la Incubación de *Caretta caretta* en Cabo Verde: estimaciones actuales y proyecciones futuras

M. SOUSA MARTINS*¹, I. ALVAREZ¹, A. MARCO²

**maria.esmartins@gmail.com*

¹*EPhysLab, Facultade de Ciencias, Universidade de Vigo, España*

²*Estación Biológica de Doñana (CSIC), Sevilla, España*

RESUMEN

Siendo el sexo de las tortugas marinas determinado por la temperatura de incubación que experimentan los huevos después de la postura, los cambios climáticos actuales podrán tener graves consecuencias para su dinámica poblacional, ya que con el aumento de la temperatura se espera que el número de machos producidos disminuya considerablemente. Aunque en 2010 la razón de sexos (SR) estimada para los neonatos de tortuga boba (*Caretta caretta*) en Boavista (Cabo Verde) no sea particularmente sesgada (comparando con valores obtenidos para otras poblaciones mundiales), su valor sobrepasa la relación teórica entre el número de hembras y machos necesaria para el equilibrio poblacional futuro. Ya que la temperatura del aire se relaciona directamente con la temperatura de la arena, donde los huevos son incubados, las SR de esta población alcanzarán, según los tres escenarios de cambio climático considerados en el presente trabajo (IPCC, 2007), valores extremos al final del siglo, llevando a una probable feminización total de los neonatos. A parte, este aumento podrá reducir la supervivencia de los embriones, ya que su desarrollo sólo se da dentro de un rango térmico. De hecho, en los últimos 30 años, Cabo Verde verificó un aumento significativo de la temperatura del aire, con lo que es probable que se cumplan estas predicciones.

Dada la importancia y vulnerabilidad de la población cabo verdiana de tortuga boba, que nidifica en pocos kilómetros de playa, es importante adoptar medidas de conservación para proteger esta especie en peligro de extinción. A parte de los esfuerzos actuales practicados por diferentes instituciones, se sugiere el desarrollo de estrategias que contraríen la feminización de los neonatos, lo que puede, entre otros, pasar por la translocación de nidos a zonas más amenas e incubación bajo condiciones controladas.

Palabras Clave: Cambio Climático, Tortugas Marinas, Temperatura de Incubación, Razón de Sexos, Éxito de Eclosión, Dinámica Poblacional.

1. Introducción

Tal como sucede con la mayoría de las especies marinas, es difícil conocer con exactitud el estado de conservación de las tortugas marinas. Sin embargo, existe una cierta unanimidad

internacional sobre la necesidad de proteger estos animales, ya que las especies se encuentran amenazadas en algún grado, estando todas incluidas en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN; www.iucnredlist.org).

La pesca no selectiva, alteración y destrucción del hábitat, contaminación marina, consumo directo, proliferación de especies invasoras, enfermedades, etc. son vistas como las principales amenazas de las comunidades de tortugas marinas de todo el mundo (Márquez, 1990). Sin embargo, el cambio climático representa hoy una de las mayores amenazas a la diversidad de la vida en nuestro planeta (IPCC 2007), y se reconoce que debe ser incorporado en los planes de conservación de muchas especies (Hamann *et al.*, 2007; Hawkes *et al.*, 2009). Considerando el comportamiento y la biología de las tortugas marinas, el aumento de la temperatura de la superficie terrestre, la subida del nivel del mar, la intensificación de las tempestades y la alteración de la circulación oceánica, impactan de manera significativa en estos animales (Fuentes *et al.*, 2009; Hawkes *et al.*, 2009; Poloczanska *et al.*, 2009; Witt *et al.*, 2010). De hecho, el calentamiento global está afectando y puede comprometer la supervivencia de las tortugas marinas, ya que durante la etapa de incubación¹ la temperatura de la arena influye, entre otros, sobre la determinación del sexo (Yntema y Mrosovsky, 1980) y el éxito de eclosión de estos animales (Carthy *et al.*, 2003).

Las tortugas marinas son réptiles que poseen determinación sexual por temperatura (TSD, *Temperature-dependent Sex Determination*), un tipo de determinación sexual ambiental en que el sexo de cada individuo se define después de la fertilización, según la temperatura de incubación² de los huevos predominante durante un periodo termosensible (segundo tercio del periodo de incubación en tortugas marinas; Yntema y Mrosovsky, 1982). La temperatura a la cual cada embrión tiene igual probabilidad de tornarse

macho o hembra es conocida como temperatura pivotante (PT, *Pivotal Temperature*); teóricamente, un nido mantenido a PT durante el periodo termosensible produce 50% de machos y 50% de hembras, lo que significa que la razón de sexos (SR, *Sex-Ratio*³) de los neonatos es de 50%♀. En el caso de TSD tipo "Macho-Hembra", como ocurre en las especies de tortugas marinas (Wibbels, 2003), en nidos incubados a temperaturas inferiores (superiores) a la PT, el porcentaje de machos (hembras) producidos aumenta. El rango de transición de temperatura (TRT, *Transitional Range of Temperature*) es el intervalo térmico en el cual se producen los dos sexos; por debajo y por encima de éste se produce un 100% de machos y de hembras, respectivamente (Hulin *et al.*, 2009).

La temperatura de incubación influencia también la morfología y supervivencia de los neonatos. El éxito de eclosión (EE⁴), aunque dependiente de otros factores, como depredación, humedad, aparamiento, salinidad, etc. (Miller *et al.*, 2003; Da Graça *et al.*, 2010), ocurre apenas en un rango térmico determinado (tolerancia térmica embriogénica o ETT, *Embryonic Thermal Tolerance*; Miller *et al.*, 2003). Por último, la temperatura del nido se correlaciona inversamente con el tiempo de incubación (Miller, 1985) y con el tamaño y peso de los neonatos (Burgess *et al.*, 2006).

Aunque variables entre poblaciones, los patrones de TSD para la tortuga-boba parecen ser conservativos (Mrosovsky *et al.*, 2009): PT está en torno a los 29°C (Freedberg y Wade, 2001; Mrosovsky *et al.*, 2002), TRT se define entre los 27 y 31°C (Yntema y Mrosovsky, 1982), y ETT es aproximadamente entre 23 y 35°C (Miller, 1997).

¹ Desarrollo embrionario dentro de los huevos.

² Temperatura del nido durante el periodo de incubación.

³ Razón entre el número de hembras y de machos.

⁴ Número de neonatos que salen de los huevos con respecto al total de huevos de la nidada (Varo Cruz, 2010).

La época de anidación de tortugas marinas en Cabo Verde va desde junio hasta octubre, y la incubación se prórroga hasta diciembre (Marco et al., 2011). El ciclo reproductor de las hembras se repite cada 2,4 años, y el promedio de nidadas por temporada reproductora es entre 3 y 6 (Varo Cruz et al., 2007). Más del 90% de los huevos son fértiles (Abella, 2010), pudiendo el valor medio exceder el 95%.

A pesar de que los nidos de tortugas marinas se construyen a profundidades y en condiciones óptimas que reduzcan la variabilidad térmica durante la embriogénesis (Broderick et al., 2001), la temperatura de incubación, aparte de las características bióticas y abióticas de la playa (Miller et al., 2003), depende de las condiciones climáticas. La temperatura de incubación, directamente influenciada por la temperatura de la arena, está bien correlacionada con la temperatura del aire (Fuentes et al., 2009). En consecuencia, las fluctuaciones climáticas interanuales y estacionales afectan la SR de las nidadas (y consecuentemente de los adultos), siendo determinantes para la evolución poblacional a lo largo del tiempo (Godfrey et al., 1996). Según el IPCC (2007), la temperatura superficial del aire podrá aumentar entre 0.6 y 6.4°C hasta el final del siglo XXI (comparativamente a los valores de 2000), lo que lleva a varios científicos a creer en una disminución general del EE y en un aumento significativo de la producción de hembras, provocando un SR acentuadamente sesgado en algunas poblaciones (Godley et al., 2001; Mrosovsky et al., 2002). Esta feminización puede tener implicaciones significativas en la dinámica de apareamiento y la estructura de las poblaciones (Orzack, 2002), pudiendo a medio plazo provocar extinciones locales (Matsuzawa et al., 2002). En este contexto, conocer los rangos de la temperatura de incubación en las áreas de

anidación de las tortugas marinas, es fundamental para evaluar su EE y SR actuales, y poder identificar cambios futuros en dichos parámetros (Abella, 2010).

La tortuga boba (*Caretta caretta*, Linnaeus 1758), una de las especies más comunes de tortugas marinas a nivel mundial y la más abundante con gran diferencia en aguas españolas, está clasificada como en Peligro de Extinción por la UICN desde 1996 (EN Alabd - UICN Red List; Camiñas, 2004). Con más de 10000 hembras nidificantes y entre 10000 y 25000 nidos por año, el Archipiélago de Cabo Verde es considerado la tercera zona de nidificación más importante de esta especie a nivel mundial (Marco et al., 2011). Aunque protegida por las principales convenciones y protocolos mundiales, en las últimas décadas se ha detectado un declive poblacional muy acusado de esta especie en la zona de Cabo Verde (Marco et al., 2009). El esfuerzo de conservación de *C. caretta* pasa obligatoriamente por el estudio profundizado de la especie y este trabajo pretende aportar conocimiento adicional a su biología, de contribuyendo de forma positiva a la creación de una estrategia de protección actualizada y efectiva que procure mitigar las principales amenazas de esta especie.

El principal objetivo del presente trabajo fue estudiar el impacto del cambio climático sobre la incubación de la población cabo verdiana de *C. caretta*, más concretamente evaluar como la subida global de la temperatura superficial del aire podrá afectar el éxito reproductor de esta especie en el futuro. Para ello, con base en las características climatológicas y en perfiles térmicos de algunas playas del Archipiélago de Cabo Verde, se estimaron y compararon los EE y SR de los neonatos de 2010 con los de predicciones futuras.

2. Área de Estudio

2.1. Archipiélago de Cabo Verde

El Archipiélago de Cabo Verde (República de Cabo Verde) está situado en el Atlántico Oriental entre latitudes de 14°48'N - 17°12'N y longitudes de 22°40'W - 25°22'W (Figura 1a).



Fig. 1. Mapa de (a) Archipiélago de Cabo Verde y de (b) Boavista. Fuente: Google Earth.

Localizado en la zona sub-sahariana, Cabo Verde tiene un clima tropical seco (árido o semi-árido), caracterizado por una larga estación seca entre octubre y julio y un corto periodo de lluvias limitado a agosto y septiembre, con precipitaciones irregulares a veces de tipo torrencial. Durante la estación lluviosa es frecuente la formación de depresiones tropicales al sureste del archipiélago, desarrollados típicamente a partir de las ondas tropicales que se forman en la sabana africana. Estos ciclones, denominados huracanes tipo Cabo Verde (o huracanes CV), suelen

ser tormentas muy intensas, asociadas a lluvias y vientos fuertes.

La época más cálida va de agosto a octubre y la más fresca de enero a abril. Debido a la influencia del océano y de los vientos alisios, las temperaturas son más moderadas y constantes que las del continente africano, variando entre 20 y 25°C (CVN 2001).

2.2. Isla de Boavista

Boavista es la tercera isla en extensión de Cabo Verde (Figura 1b), con una superficie total de 620km² y 122km² de área costera. Es la más oriental del archipiélago (15°57'-16°13'N y 22°39'-22°57'W), y se trata de una isla eminentemente llana y árida.

Las cuatro playas estudiadas - Calheta (BV1), Ervatão (BV2), Figura (BV3) y Nhô Martin (BV4) - están localizadas en la costa sureste/este de la isla de Boavista (Figura 1b), donde se concentra el 85-90% de la actividad de nidificación de *C. caretta* en Cabo Verde (Marco et al., 2010). Las playas son todas de arena blanca, pero se distinguen por su extensión y características. Calheta es una pequeña playa (menos de 500m de longitud) de arena gruesa, muy empinada, que no presenta prácticamente zonas de inundación por marea. Ervatão es una playa larga (cerca de 1000m), estrecha y plana, donde la probabilidad de inundación durante pleamar es mayor. Con aproximadamente 800 y 500km de longitud respectivamente, Figura y Nhô Martin son playas más al norte, donde la actividad nidificante no es tan prominente. Las playas están orientadas al este (BV1), sureste (BV2), este (BV3) y nordeste (BV4), pudiendo estar influenciadas por las corrientes oceánicas y atmosféricas de manera distinta. Sin embargo, desconociendo su batimetría y topografía exactas, es difícil evaluar con exactitud la dinámica costera de estas playas.

Aunque existan pocos datos relativos a los perfiles térmicos del sustrato de las playas de Boavista, estudios recientes (Abella *et al.*, 2008b) indican que a 40cm de profundidad la temperatura de la arena varía entre 26.5 y 30.6°C.

3. Material y Métodos

3.1. Variables Climáticas

La caracterización climatológica de la zona se hizo en base a valores diarios de Temperatura del Aire ($T^{\circ}\text{aire}$ (°C); valores promedios), Total de Precipitación (PP (mm); valores totales) y Presión Atmosférica a Nivel del Mar (SLP, *Sea Level Pressure* (mb); valores promedios). Los datos utilizados provienen de dos estaciones meteorológicas, que distan respectivamente 75 y 150km de la isla de Boavista: Aeropuerto Amílcar Cabral, isla de Sal (85940 GVAC, 16°44'N-22°57'W (weather.noaa.gov)); y Nuevo Aeropuerto de Praia, isla de Santiago (85890, 14°54'N-23°31'W (weather.noaa.gov)). Se utilizaron datos oficiales publicados por el Instituto Nacional de Meteorología y Geofísica de Cabo Verde (INMGCV; 2005/2006-2010), y además, por la facilidad de acceso a datos antiguos, se obtuvieron también datos del aeropuerto de la isla de Sal extraídos de internet (se eligió la base de datos de www.tutiempo.net porque, comparativamente con www.wunderground.com, tiene disponibles datos en un mayor intervalo de tiempo, que se correlacionan mejor con los valores oficiales y mantienen la precisión de la décima de grado; no se utilizaron datos de Santiago de la misma base de datos dada la escasez de registros). Se dio prioridad a los datos del INMGCV, con excepción de PP, apenas disponibles en internet.

3.2. Temperatura de la Arena o del Sustrato

Los datos de la Temperatura de la Arena ($T^{\circ}\text{arena}$ (°C)) fueron tomados

cada 30 minutos con registradores automáticos de temperatura *Stow Away TibdiT Onset* (precisión 0.3°C) enterrados en la arena en playas de desove. Los aparatos fueron colocados a distintas profundidades (30 y 50cm) y distancias de la orilla (5, 20 y 50m) en 6 playas de Cabo Verde: 4 en Boavista (BV1, BV2, BV3 y BV4) y 2 en Fogo (FG1 y FG2) - "BV1(50m,50cm)" se refiere a $T^{\circ}\text{arena}$ medida por un registrador enterrado a 50m de distancia de la orilla y a 50cm de profundidad en la playa de Ervatão, Boavista; "?" indica dato no disponible. Para el análisis estadístico se utilizaron medias diarias entre junio y diciembre de 2010, calculadas por media aritmética simple. Para las fechas en que no había registros (1-jun a 22-jul y 12-oct a 27-dic), se utilizó la $T^{\circ}\text{arena}$ extrapolada a partir de la $T^{\circ}\text{aire}$ (ver Resultados). Como afirman algunos estudios (Hays *et al.*, 2003; Broderick *et al.*, 2001), en playas homogéneas las variaciones intra-playa son pequeñas, con lo que pocos termómetros por playa bastan para describir bien su perfil térmico.

3.3. Temperatura de Incubación

La Temperatura de Incubación ($T^{\circ}\text{incub}$ (°C)) depende de la $T^{\circ}\text{arena}$ y del Calentamiento Metabólico Embrionario ($C^{\circ}\text{metab}$ (°C)): $T^{\circ}\text{incub} = T^{\circ}\text{arena} + C^{\circ}\text{metab}$. Se utilizaron valores de $T^{\circ}\text{arena}$ medidos a (50m, 50cm), porque (a) se acercan al patrón promedio de nidificación de *C. caretta* (profundidad de nido máxima: 48.8 ± 6.6 cm; Marco *et al.*, 2011) y (b) fueron registrados en todas las playas. $C^{\circ}\text{metab}$ traduce el calor metabólico liberado por los huevos durante la embriogénesis, que se acumula en el nido y se hace patente en el segundo tercio de incubación, alcanzando su valor máximo al final del tercer tercio de incubación (Abella, 2010). Se han utilizado los valores de $C^{\circ}\text{metab}$ medios obtenidos por Abella (2010) para la población de Cabo

Verde: 0.07°C, 0.51°C y 1.95°C para el primer, segundo y tercer tercio del periodo de incubación, respectivamente.

3.4. Temperatura de Determinación Sexual

Para calcular el SR de las nidadas, se ha estimado la Temperatura de Determinación Sexual ($T^{\circ}\text{detsex}$ (°C)⁵) como la media de $T^{\circ}\text{incub}$ durante el periodo termosensible. Considerando la media del tiempo de incubación de los nidos para la región ($58 \pm 3.9\text{d}$; Marco *et al.*, 2011), $T^{\circ}\text{detsex}$ se calculó como la media aritmética de $T^{\circ}\text{incub}$ diaria entre el 20° y el 39° días de incubación. Así, para huevos puestos día 1 de julio, por ejemplo, $T^{\circ}\text{detsex}$ fue calculada con base en $T^{\circ}\text{incub}$ diaria entre 20 de julio y 8 de agosto.

3.5. Razón de Sexos y Éxito de Eclósión

En este trabajo, el SR de los neonatos se ha estimado en base al modelo de Kaska *et al.* (1998), que correlaciona $T^{\circ}\text{detsex}$ con el porcentaje teórico de hembras producido (%♀). Se consideró ETT entre los 23 y los 35°C, TRT entre los 27 y 31°C y PT igual a 29°C (Tabla 1). No se ha estimado el EE en función de $T^{\circ}\text{incub}$, una vez que se desconoce la relación directa entre las dos variables y se sabe que actualmente es un factor poco importante en playas de arena blanca. Sin embargo, se tuvo en consideración que valores de $T^{\circ}\text{incub}$ fuera del ETT están asociados a EE bajos/nulos (Miller, 1997).

$T^{\circ}\text{detsex}$	SR
< 23°C	---
23-27°C	0%♀
27-29°C	0-50%♀ (*)
29°C	50%♀
29-31°C	50-100%♀ (*)
31-35°C	100%♀
> 35°C	---

⁵ Temperatura de incubación que define el sexo de los embriones.

TABLA 1. Valores de SR de neonatos en función de $T^{\circ}\text{detsex}$. (*) Sigue la ecuación: $\text{SR} = 25 \times T^{\circ}\text{detsex} - 625$, calculada teóricamente a partir de los límites de TRT y de PT.

3.6. Razón de Sexos Ponderada

La razón de sexos ponderada (SRpond) permitió una mejor aproximación a los valores reales de SR, y fue calculada en base al SR obtenida teóricamente y al número de nidos contados en 2010 en cada playa. Para ello, se ha tenido en cuenta una distribución variable del número de puestas a lo largo del periodo anidación (% mensual de nidos; máximo en agosto-septiembre y mínimo en junio y octubre), el número medio de huevos por nido (84 huevos/nido; Varo Cruz *et al.*, 2007) y el éxito de emergencia⁶ de cada playa (Abella, 2010). Aquí se trabajó con valores mensuales.

3.7. Descripción Metodológica

Caracterización Climática: Para caracterizar climáticamente Cabo Verde, se utilizaron registros de $T^{\circ}\text{aire}$, SLP y PP entre junio y diciembre (periodo de incubación para *C. caretta* en Cabo Verde). El estudio de la variabilidad interanual (1980-2010) e intra-anual se basó en datos de Sal (www.tutiempo.net), mientras la caracterización del periodo de estudio (2010) se hizo en base a datos de Sal y Santiago (INMGCV).

Caracterización Térmica del Sustrato: Se trató de evaluar los perfiles de $T^{\circ}\text{arena}$ obtenidos por los distintos termómetros entre julio y octubre de 2010. Dado que los registros de $T^{\circ}\text{arena}$ disponibles diferían en el periodo temporal, se utilizó siempre el menor intervalo posible para homogeneizar los resultados. Se hicieron comparaciones inter-isla (Boavista y Fogo), intra-isla/inter-playa (Boavista) e intra-playa (BV1). Posteriormente, se comparó

⁶ Número de neonatos que alcanza la superficie del nido con respecto al total de huevos de la nidada (Miller *et al.*, 2003).

T°arena (50m, 50cm) de las cuatro playas de Boavista con T°aire de Sal y Santiago, para determinar la relación entre la T°arena y la T°aire. Para ello, se calcularon coeficientes de correlación simples y desfasados entre las dos variables, para determinar la mejor aproximación y poder extrapolar la T°arena para los periodos sin registros. Sin embargo, no se ha trabajado con la serie completa. De hecho, ya que no se disponía de datos de años anteriores para "corregir" las anomalías detectadas en la T°arena para 2010 (ver Resultados), se ha dividido la serie temporal según ocurrencias significativas (máximos de T°arena y T°aire y fechas de pasaje de huracanes en la región) y se decidió trabajar con el periodo inicial, P1 (P1: 27jul2010-07sep2010, P2: 08sep2010-29sep2010 y P3: 30sep2010-11oct2010). Estudios recientes (Fuentes et al., 2009) indican que la T°arena está bien correlacionada con la temperatura del mar en superficie, pero, por falta de disponibilidad de datos, el presente estudio no se ha enfocado en esa relación.

Estimación de SR de neonatos de 2010: Ya que no se disponían de datos relativos a la SR de los neonatos de *C. caretta* en Cabo Verde para 2010, se estimaron estos valores para las cuatro playas de Boavista. Las estimaciones hechas se basaron en la T°detsex calculada para cada día de puesta (entre 1 de junio y 31 de octubre, periodo aproximado de anidación para *C. caretta* en Cabo Verde). Posteriormente, se ha estimado SRpond para los cinco meses de incubación.

Predicciones futuras de SR de neonatos (2090-2099): Se han considerado tres escenarios teóricos de cambio climático modelados por el IPCC (2000_const⁷,

B1 y A1F1), cuyos pronósticos térmicos se resumen en la Tabla 2. Considerando los valores de la T°aire proyectados para Cabo Verde (calculados sumando la T°aire promedio de 1980-1999 los aumentos térmicos óptimos estimados por los tres escenarios), se calculó la T°arena promedia para el periodo de anidación en 2090-2099 en las cuatro playas, en base a las respectivas rectas de regresión. A partir de estos valores (y asumiendo C°metab invariable), se estimaron distintas T°detsex para ese periodo, según las cuales se predijo el SR. Dado que se desconoce y es complejo predecir la evolución del número de nidos, de huevos por nido, etc. (valores que dependen de la dinámica de poblaciones y de otras variables), no se ha realizado una aproximación de la SRpond para el futuro.

	Aumento global de la temperatura (°C)	
	Estimación óptima	Intervalo probable
2000_const	0.6	---
B1	1.8	1.1 – 2.9
A1F1	4.0	2.4 – 6.4

TABLA 2. Resumen del aumento térmico global según el IPCC para tres escenarios de cambio climático: 2000_const, B1 y A1F1 (valores proyectados para 2090-2099 respecto a 1980-1999).

3.8. Análisis de Datos

Para el análisis estadístico de los datos se calcularon (a) coeficientes de correlación de Pearson normales (r o $Odías$) y desfasados ($\pm 1día$, etc., obtenidos entre la T°arena del día t y la T°aire del día $t\pm 1$, etc.), y (b) rectas de regresión lineal simples, conseguidas a partir de diagramas de dispersión. Los resultados fueron sometidos a significancia estadística mediante la prueba t -Student, a $\alpha = 0.05$.

⁷ 2000_const es una denominación propia de este trabajo, que refiere el escenario del IPCC que considera una constancia en las concentraciones gaseosas durante el siglo XXI, con base en los valores del año 2000.

5. Resultados

5.1. Caracterización Climatológica de Cabo Verde

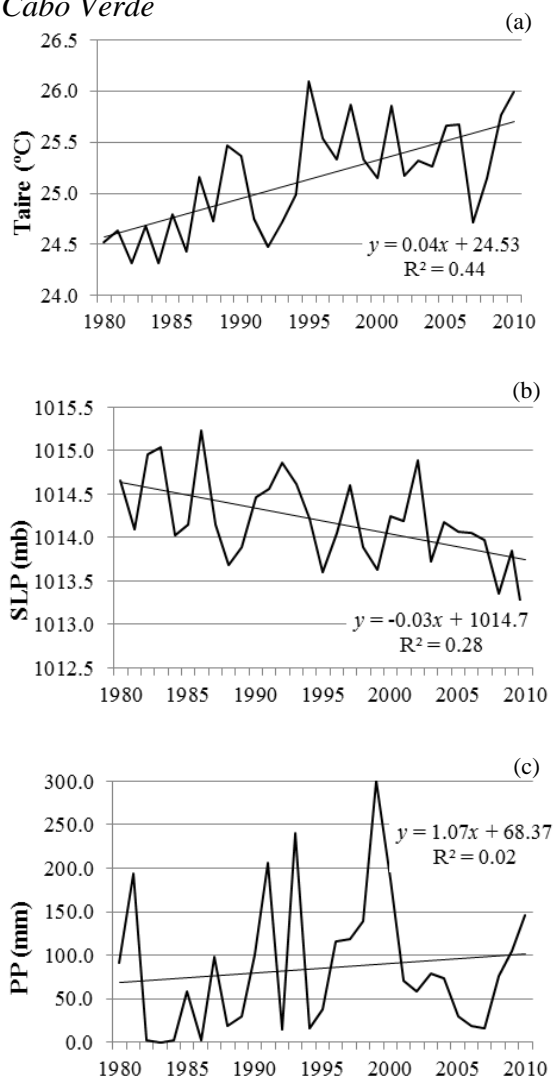


Fig. 2. Evolución de (a) T°aire, (b) SLP y (c) PP entre 1980 y 2010; Valores promedios entre junio y diciembre.

Variabilidad Interanual e Intranual.

Entre 1980-2010, la T°aire media para la época de incubación (junio-diciembre) en Sal fue de $25.0 \pm 1.4^\circ\text{C}$, y ha aumentado en las últimas décadas (declive positivo de la recta de regresión (Figura 2a). SLP ha disminuido en el mismo periodo (declive negativo de la recta de regresión, (Figura 2b), siendo la media registrada de $1014.3 \pm 1.6\text{mb}$. Los valores de PP fueron más variables, no presentaron una tendencia significativa y el promedio registrado fue de

$85.0 \pm 77.0\text{mm}$ (Figura 2c). Considerando los valores de 1980 (24.5°C y 1014.7mb) y de 2010 (25.7°C y 1013.8mb) calculados en base a las respectivas rectas de regresión, se puede decir que en promedio en Sal durante los últimos 30 años: la T°aire aumentó 1.2°C y la SLP disminuyó 0.9mb . Durante el periodo de incubación (Figura 3), en Sal, la T°aire es máxima en septiembre ($26.8 \pm 0.1^\circ\text{C}$) y mínima en diciembre ($22.8 \pm 0.5^\circ\text{C}$), al revés de SLP, que es máxima en diciembre ($1015.2 \pm 0.4\text{mb}$) y mínima en septiembre ($1013.3 \pm 0.4\text{mb}$). La PP no tiene un patrón tan claro, presentando valores nulos en la mayoría de los días y máximos concentrados en cortos periodos entre mediados de julio y finales de octubre. Esta tendencia contraria entre la T°aire y la SLP es comprensible, ya que el aire cálido tiende a ascender, lo que baja la presión a nivel del mar.

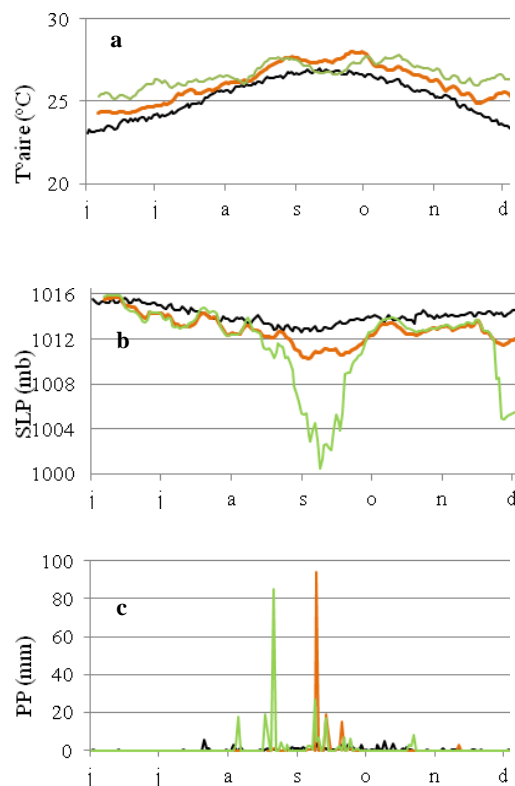


Fig. 3. Evolución de (a) T°aire, (b) SLP y (c) PP entre junio y diciembre; Media histórica entre 1980 y 2010 en Sal (negro) y valores de 2010 para Sal (naranja) y Santiago (verde).

Periodo de Estudio (junio-noviembre 2010). En base a los registros de 2010, vemos que durante el periodo de incubación de ese año, la T°aire fue, como se esperaba, superior a la media histórica (1980-2010), habiendo sido Santiago ($26.4 \pm 1.1^\circ\text{C}$) más cálida que Sal ($25.8 \pm 1.4^\circ\text{C}$; Figura 3a). Sin embargo, entre mediados de agosto y finales de septiembre, se registró una bajada anómala en la T°aire de las dos islas, más acentuada en Santiago, que en ese periodo fue inferior a la T°aire de Sal. La SLP en 2010 fue globalmente menor que la media histórica en ambas las islas ($1012.9 \pm 1.7\text{mb}$ para Sal y $1011.8 \pm 6.0\text{mb}$ para Santiago), observándose una bajada acentuada (principalmente en Santiago) entre mediados de agosto y finales de septiembre (Figura 3b). La PP registró máximos a mediados de agosto (Santiago) y de septiembre (Sal y Santiago; Figura 3c). Los datos de la T°aire y SLP de Sal y Santiago están bien correlacionados (T°aire: $r = 0.73$; SLP: $r = 0.68$; $N = 183$), mientras que la PP de las dos islas no presenta correlación significativa a 95% ($r = 0.10$; $N = 183$).

5.2. Caracterización Térmica del Substrato de distintas Playas de Cabo Verde

Dado que en Boavista, a excepción de BV4, todos los perfiles térmicos del sustrato (medidos en las distintas playas, a distintas distancias de orilla y profundidades) están bien correlacionados ($r > 0.75$; $N=81$), se presentan las comparaciones pertinentes para cada análisis; se dió preferencia al estudio de los perfiles (50m, 50cm) y de BV1 (donde, entre las cuatro playas, nidifican más hembras de esta especie; Abella, 2010).

Variabilidad Inter-isla, Intra-isla (o Inter-playa) e Intra-playa. En 2010, como se puede observar en Figura 4:

- La T°arena en Fogo es mayor que en Boavista ($35.5 \pm 1.3^\circ\text{C}$ y $29.6 \pm 0.7^\circ\text{C}$ respectivamente, medidos entre el final de julio e inicio de agosto; Figura 4a). Esta diferencia se debe probablemente y en gran medida al contraste de colores, y consecuentemente valores de albedo, del sustrato de las dos islas, ya que las playas de la primera presentan arena negra y las de la segunda arena blanca;
- En Boavista, BV2 tiene los valores de la T°arena más elevados ($31.1 \pm 0.6^\circ\text{C}$), seguidos de BV3 ($30.0 \pm 0.7^\circ\text{C}$) y BV1 ($29.6 \pm 0.7^\circ\text{C}$). BV4 ($29.3 \pm 1.0^\circ\text{C}$), es, hasta el final de agosto, la segunda playa más caliente, pasando su T°arena, a partir de septiembre, a ser menor que la de las otras playas (Figura 4b);
- La T°arena en Boavista, creciente entre julio y agosto, registró, al contrario de los datos referentes a 2005-2008 analizados por Abella (2010) - con máximos entre finales de agosto y mediados de septiembre - una bajada acentuada en la primera quincena de septiembre. En la segunda mitad de ese mes, la T°arena comenzó a aumentar, alcanzando, con excepción de BV4, valores máximos al final del mes (Figura 4b). A pesar de la similitud entre la T°arena y la T°aire (principalmente de Sal), se puede notar una mayor duración de los valores bajos de la T°arena relativa a los de la T°aire. Esto, conjugado con la baja T°arena de BV4 entre agosto y octubre, sugiere la influencia de otros factores en la determinación de la T°arena;
- Para cada playa, a una distancia constante de la orilla, la T°arena disminuye con la profundidad ($30.3 \pm 0.8^\circ\text{C}$ a 30cm y $29.6 \pm 0.7^\circ\text{C}$ a 50cm para BV1; Figura 4c1), siendo la amplitud térmica total y diaria a 30cm mayor que a 50cm (3.5 y 2.5°C , respectivamente (total), y 1.9 y 0.7°C (diaria); valores promedios). Por otro lado a profundidad constante,

la T°arena aumenta con la distancia de la orilla (29.0±0.6°C a 5m, 29.4±0.8°C a 20m y 30.3±0.8°C a 50m para BV1; Figura 4c2), no se verificando variaciones significativas en la amplitud térmica total (respectivamente 3.6°C, 3.5°C y 3.5°C). La amplitud diaria fue mayor a menor distancia (2.3°C a 5m y 1.4°C a 20 y 50m).

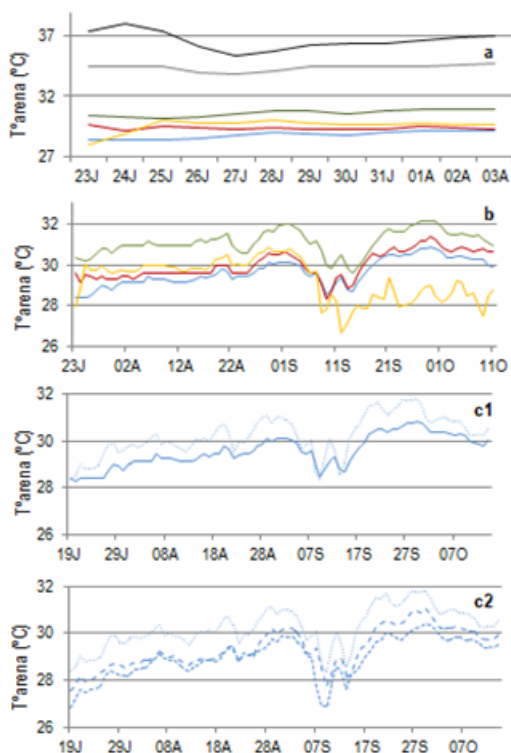


Fig. 4. Variabilidad (a) Inter-isla, (b) Intra-isla e (c) Intra-playa, a distancia de orilla (c1) y profundidad constante (c2); Registros entre julio y octubre. Leyenda: COLOR: Azul - BV1; Verde - BV2; Rojo - BV3; Amarillo - BV4; Negro - FG1; Gris oscuro - FG2 (Nota: FG's no respetan el esquema de trajeado). TRACEADO:

----- (5m,30cm) - - - - (20m,30cm) (50m,30cm)
 - - - - (20m,50cm) ——— (50m,50cm)

Relación T°arena-T°aire. Del análisis estadístico realizado para (50m, 50cm) (Tabla 3) se determinó que, de forma general, la T°arena de Boavista se correlaciona mejor con la T°aire de Sal, con un desfase de "-1día", lo que significa que la T°arena de un determinado día está mejor correlacionado con la T°aire del día anterior. Además, se comprobó que los

coeficientes de correlación en P1 ($r > 0.75$; N= 47) son superiores a los de P2 ($r > 0.29$; N= 22), P3 ($r > 0.29$; N= 12) y al periodo total ($|r| > 0.12$; N= 81). En base a estos resultados, se determinaron las respectivas rectas de regresión, utilizadas posteriormente para calcular la T°arena de periodos sin registro.

		T°aire						
		Odías	-1día	-2días	-3días	-4días	-5días	
		SAL						
T°arena	TOTAL	BV1	0.63	0.71	0.70	0.65	0.63	0.60
		BV2	0.42	0.50	0.50	0.43	0.36	0.31
		BV3	0.53	0.61	0.58	0.56	0.56	0.55
		BV4	-0.12	-0.21	-0.33	-0.31	-0.30	-0.34
	P1	BV1	0.82	0.90	0.89	0.81	0.78	0.74
		BV2	0.70	0.77	0.76	0.68	0.60	0.54
		BV3	0.75	0.81	0.78	0.73	0.70	0.67
		BV4	0.70	0.75	0.73	0.68	0.62	0.57
	P2	BV1	0.42	0.51	0.43	0.29	0.23	0.23
		BV2	0.40	0.47	0.45	0.33	0.22	0.20
		BV3	0.49	0.58	0.46	0.29	0.25	0.27
		BV4	0.47	0.29	-0.08	0.32	0.67	0.42
P3	BV1	0.46	0.64	0.56	0.14	-0.10	-0.25	
	BV2	0.40	0.63	0.65	0.29	-0.16	-0.33	
	BV3	0.35	0.65	0.34	-0.49	-0.42	0.19	
	BV4	0.80	0.29	-0.32	-0.46	-0.55	-0.47	
		SANTIAGO						
TOTAL	BV1	0.46	0.45	0.45	0.29	0.27	0.23	
	BV2	0.43	0.42	0.42	0.23	0.17	0.14	
	BV3	0.41	0.41	0.41	0.25	0.25	0.21	
	BV4	0.15	0.05	0.05	0.03	0.07	0.05	
P1	BV1	0.56	0.56	0.50	0.53	0.57	0.56	
	BV2	0.45	0.45	0.39	0.41	0.42	0.40	
	BV3	0.40	0.47	0.43	0.47	0.52	0.48	
	BV4	0.37	0.46	0.43	0.45	0.51	0.46	
P2	BV1	0.46	0.44	0.21	-0.01	0.00	0.07	
	BV2	0.44	0.41	0.24	0.00	-0.06	0.02	
	BV3	0.52	0.47	0.23	0.00	-0.02	0.08	
	BV4	0.48	0.11	0.04	0.28	0.24	-0.10	
P3	BV1	0.31	0.24	-0.05	-0.22	-0.32	-0.43	
	BV2	0.36	0.34	0.07	-0.23	-0.47	-0.43	
	BV3	0.56	0.29	-0.52	-0.62	0.03	0.20	
	BV4	0.24	-0.48	-0.69	-0.53	-0.09	-0.56	

TABLA 1. Coeficientes de correlación (simples y desfasados) entre la T°arena de Boavista y la T°aire de Sal y Santiago. En verde están los valores más elevados.

5.3. Estimación de SR y EE de neonatos en 2010

En Boavista, la T°detsex calculada para las puestas hechas entre junio y octubre de 2010, fue, como era de esperar, máxima para BV2 (31.4±0.4°C), seguida de BV3 (30.3±0.5°C) y de BV1 (29.1±0.6°C); con excepción de agosto y septiembre, la T°detsex de BV4 fue la

segunda más elevada. Los valores máximos se obtuvieron para puestas hechas al final de agosto, menos en BV4 que lo fueron al inicio de ese mes. Se notó una bajada de la $T^{\circ}\text{detsex}$ de las puestas hechas en el mes de agosto (y entre agosto y finales de septiembre en BV4), explicada por la bajada registrada en la $T^{\circ}\text{arena}$ en agosto-septiembre.

Dado que la $T^{\circ}\text{incub}$ de las cuatro playas estuvo dentro del TRT considerado para *C. caretta* ($T^{\circ}\text{incub}$ mín.: 26.8°C y máx.: 34.1°C), no se considera que el EE haya sido nulo para ninguna de esas playas en 2010. Por otro lado, como se puede ver en la Figura 5, la SR de los neonatos varió entre playas y según el día de puesta, osciló entre 40.6 y $100\%_{\text{♀}}$ (BV1: $70.2 \pm 13.9\%_{\text{♀}}$; BV2: $99.7 \pm 1.1\%_{\text{♀}}$; BV3: $80.6 \pm 10.3\%_{\text{♀}}$ y BV4: $73.9 \pm 13.6\%_{\text{♀}}$). En BV2 la $T^{\circ}\text{detsex}$ fue siempre superior a 30.7°C y el SR fue inferior a $100\%_{\text{♀}}$ apenas para las puestas hechas al inicio de junio y finales de octubre. En BV4 - cuyos valores de la $T^{\circ}\text{arena}$ fueron "anormales" en agosto-septiembre -, los mayores $\%_{\text{♀}}$ se produjeron en los nidos hechos entre finales de agosto e inicios de septiembre, y los menores al inicio de junio y finales de octubre. El SR total estimado para Boavista durante el periodo de anidación de 2010 fue de $81.1 \pm 9.7\%_{\text{♀}}$.

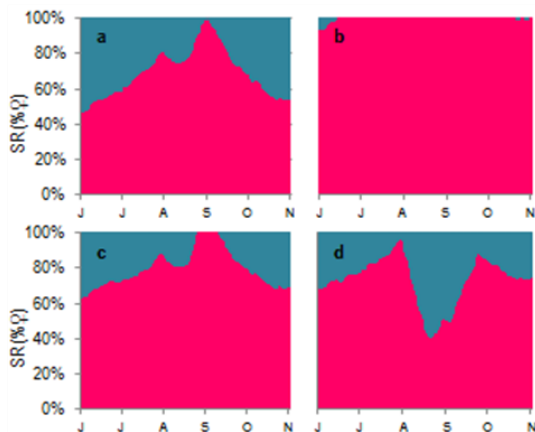


Fig. 5. SR teóricos de las puestas hechas entre junio y octubre en (a) BV1, (b) BV2, (c) BV3 y (d) BV4.

Para 2010, la SR_{pond} promedio fue de $83.7\%_{\text{♀}}$ en Boavista. El máximo se obtuvo en BV2 ($99.9\%_{\text{♀}}$) y el mínimo en BV4 ($70.7\%_{\text{♀}}$; BV1: $78.2\%_{\text{♀}}$ y BV3: $86.0\%_{\text{♀}}$). Como se puede ver, con excepción de BV4, los valores de la SR_{pond} fueron superiores a las primeras aproximaciones teóricas de SR. Esto significa que la aportación de machos ponderada es menor que la esperada *a priori*, y se explica por el menor número relativo de nidos durante junio y octubre, cuando las $T^{\circ}\text{detsex}$ son menores y potencialmente se producen más machos. Al contrario, en BV4, por tener los valores mínimos de SR en agosto-septiembre, cuando la frecuencia de nidos es mayor, la SR_{pond} es menor, una vez que la producción teórica total de machos fue mayor.

5.4. Predicciones futuras de SR y EE de neonatos (2090-2099)

Las proyecciones de la $T^{\circ}\text{aire}$ en Sal para el final del siglo XXI varían según el escenario: 25.4°C , 26.6°C y 28.8°C respectivamente para 2000_const, B1 y A1F1 (valores promedios). Como podemos ver, la $T^{\circ}\text{aire}$ en 2010 fue ya superior al valor proyectado según 2000_const, con lo que se considera que este escenario es muy improbable, pues requeriría un enfriamiento a partir de ahora.

Aunque la $T^{\circ}\text{incub}$ proyectada esté dentro del ETT (mín.: 24.3°C y máx.: 34.7°C), es probable que se verifique una disminución del EE, ya que los valores máximos tienden a aproximarse al límite térmico superior. Como podemos ver en la Figura 6, los valores de SR proyectados para las playas de Boavista en 2090-2099 son variables. Para todas las playas analizadas, la SR promedio (calculado entre las distintas proyecciones) es superior a $77\%_{\text{♀}}$ (BV1: $77.1 \pm 19.1\%_{\text{♀}}$; BV2:

98.7±4.0%♀; BV3: 85.9±13.7%♀; BV4: 89.1±12.1%♀). La SR promedio en las cuatro playas estimada para 2090-2099 es de 77.8±14.8%♀ si se verifica el escenario 2000_const, 87.6±9.8%♀ según el B1 y 97.7±2.2%♀ según el A1F1. Además, en los escenarios más dramáticos, pueden producirse un 100%♀ en las cuatro playas durante los periodos de mayor densidad de anidación (agosto-septiembre).

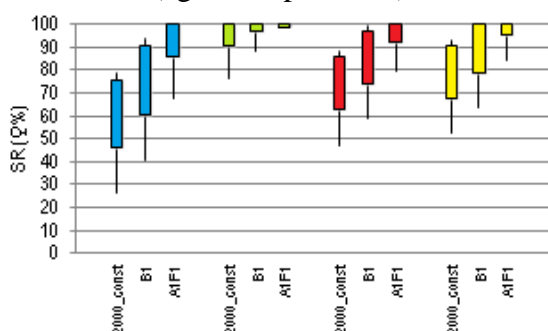


Fig. 6. SR proyectadas para BV1 (azul), BV2 (verde), BV3 (rojo) y BV4 (amarillo), según los tres escenarios del IPCC evaluados.

6. Conclusiones

Asumiendo los datos climatológicos de la isla de Sal como representativos de Sal, Boavista y Maio (islas climática y ecológicamente muy similares), se puede decir que las condiciones actuales en esas islas distan de hace 30 años: la temperatura del aire ha aumentado en más de 1°C y la presión atmosférica a nivel del mar ha disminuido en aproximadamente 1mb. Se notó un ligero aumento de la precipitación total en el mismo periodo, pero, al no ser estadísticamente significativo, no se puede decir que sea real. De hecho, esta subida de la T°aire y la bajada de la SLP están de acuerdo con los datos del IPCC (2007), y es probable que se acentúen durante el siglo XXI.

Como se vió, y comparando con la T°aire promedio registrada entre 2005 y 2008 en Sal (25.6°C; Abella, 2010), la temporada de incubación del año 2010 fue cálida. Sin embargo, entre agosto y

septiembre se registró una disminución de la temperatura, que fue acompañada por una acentuada bajada de la presión atmosférica y elevada tasa de precipitación. Esto se justifica por la formación de cuatro huracanes tipo Cabo Verde de categoría 4 (escala de Saffir-Simpson) al sur/suroeste del archipiélago entre 21 de agosto y 12 de septiembre (Danielle, Earl, Igor y Julia; Beven y Landsea, 2010; Kimberlain, 2010; Cangialosi, 2011; Pasch *et al.*, 2011). Aunque en general hayan alcanzado su máxima fuerza en el Atlántico medio aproximadamente dos días después de su formación, estas tormentas afectaron la isla de Boavista, ya que, aunque más intensamente en Santiago, se hicieron sentir también en Sal. De hecho, la T°arena en Boavista sufrió una bajada acentuada al final de agosto en todas las playas, no siendo esta bajada completamente explicada por la T°aire ($r_{1\text{día}}$: 0.3 – 0.6 para Sal y 0.4 – 0.5 para Santiago, en P2). Estos valores bajos de la T°arena se deben probablemente a la inundación de las playas, causada por la elevada precipitación registrada y/o las mareas de tempestad asociadas a los fenómenos ciclónicos. A pesar de la T°arena haber "recuperado" en Calheta, Ervatão y Figura a mediados de septiembre, en Nhô Martin estos valores se mantuvieron bajos hasta octubre. Rechazando la hipótesis de avería de los termómetros - que es poco probable dado que los tres aparatos de esa playa registraron perfiles idénticos -, y la baja probabilidad de haberse debido a inundación continua, ya que es una playa de gran pendiente, se propone que esto está asociado a un depósito de arena sobre los termómetros (relacionado con la erosión en las partes altas de la ladera causada por las tormentas), que aumentó su profundidad.

Como se vió, los perfiles térmicos de las playas, y por lo tanto de las

condiciones de incubación, son variables entre islas, playas y zonas de playa. Fogo es una isla de arena típicamente negra, lo que explica los elevados valores de su T° arena (Hays et al., 2001). Aunque en el presente trabajo no se haya abordado este tema (tamaño de muestra poco significativo), estos valores tan altos de la T° arena apuntan a condiciones de incubación extremas para *C. caretta* en Fogo, probablemente asociadas tanto a una feminización total (o casi) de los neonatos, como a un bajo éxito de desarrollo embrionario. Aunque se desconozcan las características nidificantes de la isla en el pasado, se podrá pensar que tal vez por esta razón estas playas tengan actualmente una densidad de anidación tan baja, estimándose en menos de 150 el número total de nidos anuales (Marco et al., 2011). De hecho, las islas con playas de arena blanca (Boavista, Sal y Maio) concentran el mayor número de hembras reproductoras, mientras en las restantes islas (con playas de arena negra) se verifican pocos nidos. Se cree que en el futuro estas playas tendrán tasas de letalidad importantes y crecientes, con lo que se puede sugerir que las islas de arena blanca son las idóneas para la incubación de *C. caretta*.

En Boavista las condiciones térmicas medias entre junio y diciembre son más adecuadas para la incubación de tortuga boba (Abella, 2010). Sin embargo, se han notado diferencias significativas entre los perfiles térmicos de las distintas playas, coincidentes con los datos de Varo Cruz (2010) para Calheta y Ervatão⁸. Dado que no se verifican diferencias importantes en la textura de la arena (al contrario de lo que ocurre en

Fogo, donde la playa más cálida (FG1) presenta una textura más fina que la otra (FG2), lo que dificulta la liberación y disipación de calor y la ventilación de la arena en profundidad), estas desigualdades inter-playa se deberán explicar por diferencias en su topografía y batimetría, por la abundancia de vegetación, por su orientación y exposición a vientos, etc. (Varo Cruz, 2010). De hecho, aunque no explique el perfil de BV4, BV1 y BV3, al estar orientadas hacia el este, están más afectadas por los vientos alisios que transportan masas de aire marino frío y suavizan la temperatura, con respecto a BV2, que está más protegida. Una vez más, las diferencias inter-playa de la T° arena pueden deberse a variaciones en la profundidad de los termómetros causadas por procesos naturales de erosión o acreción de arena por mareas y/o inundaciones, o errores de medición, lo que es poco probable dado que los termómetros fueron todos comprobados e intercomparados y los perfiles intra-playa son coherentes.

También se verificaron variaciones térmicas intra-playa de la arena: a mayor profundidad y menor distancia de la orilla, la T° arena es menor. Esto se debe principalmente a su capacidad calorífica⁹ - que aumenta con el contenido de agua, lo cual es tanto mayor cuanto mayor la profundidad y menor la distancia de la orilla - y a la cantidad de energía solar que recibe - que disminuye con la profundidad.

Visto que los huevos se incuban en la arena sin recibir ningún cuidado parental, el local de construcción del nido puede condicionar el éxito reproductor de la especie (Mazaris et al., 2006), ya que, como afirmó Mrosovsky en 1980, pequeñas diferencias en la T° incub pueden provocar impactos profundos en el EE, la SR y el fenotipo de la nidada. Según

⁸ Se apuntan T° incub mayores en Ervatão que en Calheta, dado que el tiempo promedio de incubación de las puestas en la primera playa es menor, y las dos variables son inversamente proporcionales (Mrosovsky, 1988).

⁹ Energía necesaria para calentar un material.

Abella (2010), neonatos incubados a mayor profundidad (menor T° incub) presentan un mayor EE, una SR más balanceada y neonatos más vigorosos. Típicamente para Cabo Verde, *C. caretta* nidifica aproximadamente a una profundidad máxima de 50cm (Varo Cruz *et al.*, 2007), donde, como se vió, las condiciones de incubación son más amenas y la variación térmica es menor. Sin embargo, hay que saber que, al considerar la T° incub a 50cm de profundidad se infravalora la producción de hembras, pues los huevos son incubados a una profundidad promedia aproximadamente entre 25 y 50cm. De hecho, la temperatura dentro del nido es variable, pudiendo haber un gradiente de la SR según la profundidad: valores mayores en la parte superior, donde la T° incub es mayor. Se puede por esto decir que los resultados presentados en este estudio son conservativos con respecto a la amenaza del cambio climático.

Durante la última década, los valores de la SR de neonatos estimados para Boavista fueron entre 63 y 76%♀ (Delgado, 2008; Abella, 2010; Marco, *et al.*, 2010; Varo Cruz, 2010). El análisis realizado en el presente trabajo apunta a un mayor sesgo hacia las hembras durante 2010 (SRpond: 84.1%♀). A pesar de las variaciones en las metodologías utilizadas para estas estimaciones (véase los métodos aplicados en Delgado, 2008, Abella, 2010, Varo Cruz, 2010 y el presente trabajo), el hecho de que 2010 haya sido un año cálido puede justificar estas diferencias. Un aspecto que es importante indicar es que, en comparación con la SR (calculado basado exclusivamente en la T° detsex), la SRpond (que considera la distribución temporal de las puestas, el número de nidos y de huevos por nido, y el éxito de emergencia) es una mejor aproximación de la realidad, y debe ser utilizada siempre que sea posible.

Cuando se compara con otros estudios (aproximadamente 90%♀ en algunas zonas atlánticas y mediterráneas; Marcovaldi *et al.*, 1997; Hanson *et al.*, 1998; Baptistotte *et al.*, 1999; Godley *et al.*, 2001), los valores de la SRpond para Cabo Verde esbozan un escenario más optimista de esta población con respecto a otras poblaciones mundiales, dado que a pesar del elevado número de hembras estimado, el número de machos producidos en esta población es considerable (Marco *et al.*, 2011). En la base, pueden estar los valores medios de la T° arena en las otras zonas de anidación del Atlántico, que son aproximadamente 1°C superiores a los encontrados en Boavista (Abella, 2010). En esto sentido, la insularidad de la región es ventajosa, ya que el océano Atlántico actúa como tampón atenuando la T° aire (Abella, 2010). El éxito de emergencia¹⁰ de *C. caretta* obtenido en condiciones naturales para 2010 fue de aproximadamente 33%. Este valor está de acuerdo con la media anual para los nidos de las principales playas de anidación de Boavista, que está por debajo del 40% (Del-Ordi *et al.*, 2003; Varo Cruz *et al.*, 2007), lo cual es relativamente bajo cuando se compara con los encontrados en otras poblaciones del mundo. Teniendo en cuenta que actualmente la muerte por temperatura de los embriones no es un factor muy relevante en playas de arena blanca, estos valores están asociados a diferentes factores externos que pueden interrumpir el desarrollo embrionario, como inundación por lluvia o marea, depredación animal, presencia de organismos patógenos, etc. (Marco *et al.*, 2011). Particularmente para 2010, las inundaciones resultantes de las fuertes lluvias y tempestades de marea que se registraron entre agosto y

¹⁰ Concepto distinto del EE, pero cuyo valor nos puede dar una buena aproximación de él (ver datos Varo Cruz, 2010).

septiembre habrán afectado significativamente a varios nidos hechos entre finales de junio e inicios de septiembre, disminuyendo el suceso de las nidadas.

Se cree que la periodicidad de reproducción de esta especie es distinta para hembras y machos (♀: cada 2.4 años; ♂: anualmente), con lo que, considerando que la SR de la población adulta es igual a la de los neonatos, el nacimiento de 2.4 hembras por cada macho (SR de 70.6%♀) permite una razón operativa de individuos adultos de 1:1 durante el apareamiento (Hays *et al.*, 2010). El problema demográfico surge cuando la SR aumenta significativamente por encima de los 70-80%♀, ya que, aunque siendo una especie poligámica, a largo plazo el número de machos puede no garantizar la fertilización del número suficiente de hembras reproductivas. De hecho, el desequilibrio entre sexos en especies con TSD - actualmente acentuado por el calentamiento global - puede dificultar/impedir el reequilibrio fisheriano, que es un proceso lento (Carvalho *et al.*, 1998). Como se ha demostrado, según los tres escenarios evaluados, las proyecciones para el final del siglo en Boavista apuntan a una elevada feminización de los neonatos, con SR superiores a 77%♀. Si se considera B1 y A1F1 (dado que la probabilidad de verificarse 2000_const es muy baja) este valor sube hasta 87%♀, con lo que se puede afirmar que a medio-largo plazo la SR de adultos no será viable para mantener la dinámica poblacional.

Sin embargo, estudios recientes (Delgado, 2008) indican que la SR de juveniles y adultos de *C. caretta* del Atlántico Norte es más baja que la de neonatos, lo que significa que el número de hembras y machos es más equilibrado. Esto puede deberse a distribuciones geográficas distintas entre sexos, pero puede también resultar

de una reversión sexual pos-incubación y/o mortalidad (natural o por captura) diferencial entre sexos (Delgado, 2008), entre otros. Aunque no existan estudios específicos para la población cabo verdiana, estas observaciones deben ser consideradas en el momento de evaluar su estado demográfico/ambiental, una vez que pueden de cierta forma minimizar el impacto del cambio climático.

De todas maneras, los escenarios futuros de calentamiento global postulan que algunas poblaciones de *C. caretta* pueden tornarse naturalmente feminizadas y experimentar niveles extremos de mortalidad, pudiendo los machos volverse escasos o mismo desaparecer a largo término (Abella, 2007). A lo largo de millones de años de existencia, las tortugas marinas han sobrevivido a diferentes presiones, demostrando su capacidad de resistir a cambios ambientales (Hawkes *et al.*, 2009). Aunque se hayan observado disminuciones poblacionales de *C. caretta* asociadas a eventos históricos de cambio climático (Reece, 2005), se piensa que la especie puede no evolucionar suficientemente rápido para contrariar las consecuencias negativas de los rápidos cambios actuales. Además, las múltiples amenazas de cariz antropogénico ejercidas sobre la especie hoy en día (pérdida de hábitat, captura accidental y deliberada, etc.) agravan su estado de conservación, aumentando su peligro de extinción (Fuentes *et al.*, 2009; Abella, 2010).

Se han propuesto diferentes respuestas evolutivas de las poblaciones de tortugas marinas frente al cambio climático (Delgado, 2008; Abella, 2010):

a) Cambio en la fenología de anidación, adelantando y/o retrasando el periodo de anidación para épocas más frescas (Pike *et al.*, 2006);

b) Variación del lugar y/o profundidad de construcción del nido, para zonas

menos cálidas de las playas actuales, para playas más frescas del área actual de anidación, y/o para nidos más profundos (Mrosovsky, 2006). Un punto interesante a tener en cuenta es que, a pesar de que hacer nidos más cerca de la orilla pueda ser una estrategia para aumentar el número de machos (visto que la T° incub es menor), ahí el riesgo de inundación por marea (más ahora que el nivel del mar está aumentando) y de depredación (principalmente por cangrejos) es mayor. Se puede con esto decir que es difícil calcular la localización idónea para la construcción de nidos, una vez que el cambio climático está acentuando dos problemas: el riesgo de inundación en nidos más próximos de la orilla y el riesgo de feminización y muerte por calor en nidos más alejados del mar.

c) Colonización de nuevas zonas de anidación desplazadas a mayores latitudes (Mrosovsky, 2006). Posibles zonas para la población cabo verdiana podrían ser el noroeste africano (principalmente Sahara Occidental y Marruecos - con una T° aire promedio de 20.7°C y 17.4°C ¹¹ respectivamente), el sur de la Península Ibérica (18.1°C y 17.9°C en Málaga (España) y Faro (Portugal)^k, respectivamente) e islas atlánticas, como las Canarias ($20.8^{\circ}\text{C}^{\text{k}}$), Madeira ($19.3^{\circ}\text{C}^{\text{k}}$) y Azores ($17.6^{\circ}\text{C}^{\text{k}}$);

d) Ajuste fisiológico de la PT (Davenport, 1989). Esta solución es menos probable tanto por el carácter conservativo de la PT, como también por el tiempo que se estima que tardaría tal proceso.

Cabo Verde acarrea la tercera población de *C. caretta* a nivel mundial, siendo Boavista el lugar más importante para la anidación de esta especie en todo el Atlántico Oriental. Como vimos, la

insularidad del archipiélago es ventajosa al suavizar la temperatura del aire, lo que permite, comparativamente con otras poblaciones mundiales, la producción de un considerable número de machos. Sin embargo, dado el elevado riesgo de reducción del área de nidificación - no solo en consecuencia de las actividades humanas, si no también debido a la subida del nivel del mar y al aumento de la erosión causado principalmente por la intensificación de tempestades -, la vulnerabilidad de la población cabo verdiana de *C. caretta* se ve aumentada, una vez que la mayoría de las actividades nidificantes se concentra en pocos kilómetros de playa. Las amenazas actuales de la especie, agravadas por los impactos del cambio climático y la limitación geográfica de anidación, crean un escenario negativo para *C. caretta*, en particular para la población cabo verdiana.

Con base en la fragilidad actual de la especie, se recomienda el desarrollo de estrategias de conservación que complementen los esfuerzos de protección ejercidos actualmente. Una propuesta para reducir el impacto del cambio climático sobre la especie sería "suavizar" las condiciones de incubación de los huevos, intentando contrariar la tendencia de feminización de los neonatos. Esto puede pasar por (a) aumentar la profundidad de los nidos, (b) trasladarlos a zonas más propicias como la intraplaya, la interplaya, la interisla o incluso ampliar deliberadamente la distribución de la anidación a nuevas áreas, y/o (c) mantenerlos bajo condiciones controladas de incubación, en vivero o laboratorio. Una solución útil y simple propuesta recientemente en este sentido es la creación de sombras artificiales para nidos en viveros (Patino-Martinez *et al.*, 2011). Se recomienda, sin embargo, un estudio más profundo de las condiciones demográficas actuales y

¹¹ T° aire diaria promedio (1980-2010) adquirida de la base de datos de www.tutiempo.net (valores de las capitales o ciudades principales).

pasadas de la especie, de forma que permita encontrar alguna tendencia y poder predecir con mayor precisión las condiciones futuras, y valorar las posibilidades de adaptación y su rapidez. La evaluación de las medidas a tomar debe ser cautelosa y su aplicación debe realizarse solo en casos de emergencia, ya que influir/cambiar los patrones biológicos naturales de cualquier especie debe evitarse al máximo.

Agradecimientos

Como principal autora del presente estudio, dedico el trabajo al Dr. Josep-María Gili (Instituto de Ciencias del Mar - Barcelona, España), por el apoyo e incentivo que me ha dado en los últimos años para seguir mi sueño y trabajar con tortugas marinas.

Referencias

- Abella E, Marco A y López Jurado LF 2007. Climate change and evolution of loggerhead sex-ratio in Cabo Verde, *in*: Book of Programme & Abstracts of the 14th European Congress of Herpetology. Societas Europaea Herpetologica, Porto (Portugal), p 42
- Abella E, Sanz P, Martins S, Marco A y López Jurado LF 2008b. Variability of incubation temperature and metabolic heating as a function of embryonic survival in loggerheads, *in*: Proceedings of the 27th Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC, 569
- Abella E, 2010. Factores ambientales y de manejo que afectan al desarrollo embrionario de la tortuga marina *Caretta caretta*: implicaciones en programas de incubación controlada - tesis doctoral presentada dirigida por López Jurado LF y Marco A, Universidad Las Palmas de Gran Canaria (España).
- Baptistotte C, Scalfoni JT y Mrosovsky N, 1999. Male-producing thermal ecology of a southern loggerhead nesting beach in Brazil: implications for conservation. *Animal Conservation*, 2, 9–13
- Beven II J., y Landsea C. 2010. Tropical Cyclone Report - Hurricane Julia (AL122010). National Hurricane Center (EEUU)
- Broderick AC, Godley BJ y Hays GC, 2001. Metabolic heating and the prediction of sex ratios for green turtles (*Chelonia mydas*). *Physiological and Biochemical Zoology*, 74, 161–170.
- Burgess EA, Booth DT y Lanyon JM, 2006. Swimming performance of hatchling green turtles is affected by incubation temperature. *Coral Reefs*, vol 25, 341–349.
- Camiñas JA, 2004. Estatus y conservación de las tortugas marinas en España, *in*: Atlas y Libro Rojo de los Anfibios y Reptiles de España, tercera impresión (eds Pleguezuelos JM, Márquez R y Lizana M). Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Asociación Herpetológica Española, Madrid (España), p 587.
- Cangialosi J, 2010. Tropical Cyclone Report - Hurricane Earl (AL072010). National Hurricane Center (EEUU).
- Carthy RR, Foley AM y Matsuzawa Y, 2003. Incubation environment of loggerhead turtle nests: effects on hatching success and hatchling characteristics, *in*: Loggerhead sea turtles (eds Bolten AB y Witherington BE), Smithsonian Books, Washington (EEUU), 144–153.
- Carvalho AB, Sampaio MC, Varandas FR y Klaczko LB, 1998. An experimental demonstration of Fisher's principle: evolution of sexual proportion by natural selection.

- Genetics Society of America, 148, 719–731.
- Da Graça J, Marco A, Garcia Cerdá R, Ikarán M, Alberca E, Abella E, Freitas RP y López Jurado LF, 2010. Massive loggerhead nest predation by ghost crabs in Boavista Island (Cape Verde): implications of the absence of large predators, *in*: 30st Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation, Goa (India).
- Davenport J, 1997. Temperature and the life-history strategies of sea turtles. *Journal of Thermal Biology*, 22, 479–488.
- Del Ordi D, Diaz Merry A, Madariaga B, López O, Ballell L, Herraiz L, Abella E, Gracia M, Borrás S, Varo Cruz N, Cejudo D y López Jurado LF, 2003. Comparison of hatching success of *Caretta caretta* in 2000 and 2001 nesting seasons in the island of Boavista (Cape Verde, Western Africa), *in*: Proceedings of the 22nd Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC, 503
- Delgado C, 2008. Gonad development and hormone titres in loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in the NE Atlantic - tesis doctoral presentada dirigida por Owens D, Crespo E, Canário A, Almeida N y Dellinger T, Universidad da Madeira (Portugal).
- Freedberg S y Wade MJ, 2001. Cultural inheritance as a mechanism for population sex-ratio bias in reptiles. *Evolution*, 55, 1049–1055.
- Fuentes M, Maynard J, Guinea M, Bell I, Werdell P y Hamann M (2009), Proxy indicators of sand temperature help project impacts of global warming on sea turtles in northern Australia. *Endangered Species Research*, 9, 33–40.
- Godfrey MH, Barreto R y Mrosovsky N, 1996. Estimating past and present sex ratios of sea turtles in Suriname. *Canarian Journal of Zoology*, 74, 267–277.
- Godley BJ, Broderick AC y Mrosovsky N, 2001. Estimating hatchling sex ratios of loggerhead turtles in Cyprus from incubation durations. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 195–201.
- Hamann M, Limpus C y Read M, 2007. Vulnerability of marine reptiles in the Great Barrier Reef to climate change, *in* Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment (eds Johnson J y Marshall P), Hobart: Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australia Greenhouse Office (Australia), 465–496.
- Hanson J, Wibbels T y Martin RE, 1998. Predicted female bias in hatchling sex ratios of loggerhead sea turtles from a Florida nesting beach. *Canadian Journal of Zoology*, 76, 1850–1861.
- Hawkes LA, Broderick AC, Godfrey MH y Godley BJ (2009), Climate change and marine turtles. *Endangered Species Research*, 7, 137–154.
- Hays GC, Ashworth JS, Barnsley MJ, Broderick AC, Emery DR, Godley BJ, Henwood A y Jones EL, 2001. The importance of sand albedo for the thermal conditions on sea turtle nesting beaches. *Oikos*, 93, 87–95.
- Hays GC, Broderick AC, Glen F y Godley BJ, 2003. Climate change and sea turtles: a 150-year reconstruction of incubation temperatures at a major marine turtle rookery. *Global Change Biology*, 9, 642–646.
- Hays G, Fossette S, Katselidis K, Schofield G y Gravenor M, 2010. Breeding periodicity for male sea turtles, operational sex ratios and implications in the face of climate change. *Conservation Biology*, 24(6), 1636–1643.
- Hulin V, Delmas V, Girondot M, Godfrey MH y Guillon JM, 2009. Temperature-dependent sex determination and global change: Are

- some species at greater risk? *Oecologia*, 160(3), 493–506.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: the physical basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment. Report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kaska Y, Downie JR, Tippett R y Furness R, 1998. Natural temperature regimes for loggerhead and green turtle nests in the eastern Mediterranean. *Canadian Journal of Zoology*, 76, 723–729.
- Kimberlain T, 2010. Tropical Cyclone Report - Hurricane Danielle (AL062010). National Hurricane Center (EEUU).
- Marco A, Carreras C y Abella E, 2009. Tortuga boba – *Caretta caretta* (Linnaeus, 1758), *in*: Enciclopedia Virtual de los Vertebrados Españoles (eds Salvador A y Marco A), Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid (España).
- Marco A, Abella E, Martins S, Liria Loza A, Jiménez Bordón S, Medina Suarez ME, Oujo Alamo C, López O y López Jurado LF, 2010. The coast of Cape Verde constitutes the third largest loggerhead nesting population in the world, *in*: 30th Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation, Goa (India).
- Marco A, Abella E, Monzón Argüello C, Martins S, Araújo S y López Jurado LF, 2011. The international importance of the archipelago of Cape Verde for marine turtles, in particular the loggerhead turtle *Caretta caretta*. *Zoologia Caboverdiana*, 2 (1), 1–11.
- Marcovaldi MA, Godfrey MH y Mrosovsky N, 1997. Estimating sex ratios of loggerhead turtles in Brazil from pivotal incubation durations. *Canadian Journal of Zoology*, 75, 755–770.
- Márquez R, 1990. Sea turtles of the World: an annotated and illustrated catalogue of sea turtle species known to date. FAO Species Catalogue - Volume 11. FAO Fisheries Synopsis, 125, 1–81.
- Matsuzawa Y, Sato K, Sakamoto W y Bjorndal KA, 2002. Seasonal fluctuations in sand temperature: effects on the incubation period and mortality of loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*) pre-emergent hatchlings in Minabe, Japan. *Marine Biology*, 140, 639–646.
- Mazaris AD, Matsinos YG y Margaritoulis D, 2006. Nest site selection of loggerhead sea turtles: the case of the island of Zakynthos, W Greece. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 336, pp 157–162.
- Miller JD, 1985. Embryology of marine turtles, *in*: Biology of the Reptilia - Volume 14 (eds Gans C, Billett F y Maderson PFA). Wiley Interscience, New York (EEUU), 271–328.
- Miller JD, 1997. Reproduction in sea turtles, *in*: The biology of sea turtles (eds Lutz P y Musick J). CRC Press, Boca Raton, Florida (EEUU), 51–82.
- Miller JD, Limpus CJ y Godfrey MH, 2003. Nest site selection, oviposition, eggs, development, hatching and emergence of loggerhead turtles, *in*: Biology and Conservation of Loggerhead Sea Turtles (eds Bolten A y Witherington B), University of Washington Press, 125–143
- Mrosovsky N, Kamel S, Rees AF y Margaritoulis D, 2002. Pivotal temperature for loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from Kyparissia Bay, Greece. *Canadian Journal of Zoology*, vol 80, pp 2118–2124
- Mrosovsky N (2006), Distorting gene pools by conservation: Assessing the case of doomed turtle eggs. *Environmental Management*, 38, 523–531.
- Mrosovsky N, Kamel SJ, Diez CE y Van Dam RP, 2009. Methods of estimating natural sex ratios of sea

- turtles from incubation temperatures and laboratory data. *Endangered Species Research*, 8, 147–155.
- Orzack SH, 2002. Using sex ratios: the past and the future, *in*: *Sex Ratios: Concepts and Research Methods* (eds Hardy I), Cambridge: Cambridge University Press (Reino Unido), 383–398.
- Pasch R y Kimberlain T, 2010. Tropical Cyclone Report - Hurricane Igor (AL112010). National Hurricane Center (EEUU).
- Patino-Martinez J, Marco A, Quiñones L y Hawkes L, 2011. A potential tool to mitigate the impacts of climate change to the caribbean leatherback sea turtle. *Global Change Biology* (accepted article).
- Pike DA, Antworth RL y Stiner JC, 2006. Earlier nesting contributes to shorter nesting seasons for the Loggerhead sea turtle, *Caretta caretta*. *Journal of Herpetology*, 40, 91–94.
- Poloczanska ES, Limpus CJ y Hays GC, 2009. Vulnerability of marine turtles to climate change, *in*: *Advances in marine Biology* (eds Sims DW). Burlington: Academic Press, 151–211.
- Reece JS, 2005. Historical Responses of Marine Turtles to Global Climate Change and Juvenile Loggerhead recruitment in Florida, *in*: Department of Biology, College of Arts and Sciences. Orlando, Florida: University of Central Florida (EEUU), 56
- Varo Cruz N, Cejudo D y López Jurado LF (2007), Reproductive biology of the loggerhead turtle (*Caretta caretta*, L. 1758) on the island of Boavista (Cape Verde, West Africa), *in*: *Marine Turtles* (eds López Jurado LF y Liria A). Recovery of Extinct Populations. Instituto Canario de Ciencias Marinas (España), 127–144.
- Varo Cruz N, 2010. Biología Reproductiva de la tortuga boba (*Caretta caretta* Linneo, 1758) en la isla de Boavista, Archipiélago de Cabo Verde - tesis doctoral presentada dirigida por López Jurado LF, Universidad Las Palmas de Gran Canaria (España).
- Wibbels T, 2003. Critical approaches to sex determination in sea turtles, *in*: *The Biology of Sea Turtles* (eds Lutz PL, Musick JA y Wyneken J), CRC Press, Boca Raton, Florida (EEUU), 103–134.
- Witt MJ, Hawkes LA, Godfrey MH, Godley BJ y Broderick AC, 2010. Predicting the impacts of climate change on a globally distributed species: the case of the loggerhead turtle. *Journal of Experimental Biology*, 213, 901–911.
- Yntema CL y Mrosovsky N, 1980. Sexual differentiation in hatchling loggerheads (*Caretta caretta*) incubated at different controlled temperatures. *Herpetologica*, 36, 33–36.
- Yntema CL y Mrosovsky N, 1982. Critical periods and pivotal temperatures for sexual differentiation in loggerhead sea turtles. *Canadian Journal of Zoology*, 60, 1012–1016.

