



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



**PRONÓSTICO DE LA TEMPERATURA DE LOS
NIDOS DE TORTUGA GOLFINA (*Lepidochelys
olivacea*) EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA
AMBIENTE, LA PROFUNDIDAD Y EL CALOR
METABÓLICO**

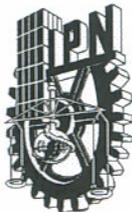
TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

PRESENTA

SARAHÍ SANDOVAL ESPINOZA

LA PAZ, B.C.S., JULIO DE 2008



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 12 del mes de Junio del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis de grado titulada:

"PRONÓSTICO DE LA TEMPERATURA DE LOS NIDOS DE TORTUGA GOLFINA (*Lepidochelys olivacea*) EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE, LA PROFUNDIDAD Y EL CALOR METABÓLICO"

Presentada por el alumno:

SANDOVAL
Apellido paterno

ESPINOZA
materno

SARAHÍ
nombre(s)

Con registro:

B	0	6	1	1	3	8
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis
PRIMER VOCAL

DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ

PRESIDENTE

DR. FEDERICO ANDRÉS GARCÍA DOMÍNGUEZ

SECRETARIO

DRA. DIANE GENDRON LANIEL

SEGUNDO VOCAL

DR. MIGUEL ÁNGEL PORTA GÁNDARA
2°. DIRECTOR

TERCER VOCAL

DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁNCHEZ

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE



IPN
CICIMAR
DIRECCION



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 12 del mes Junio del año 2008, el (la) que suscribe SARAHÍ SANDOVAL ESPINOZA alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS con número de registro B061138 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de: DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ y DR. MIGUEL ÁNGEL PORTA GÁNDARA y cede los derechos del trabajo titulado: "PRONÓSTICO DE LA TEMPERATURA DE LOS NIDOS DE TORTUGA GOLFINA (*lepidochelys olivacea*) EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE, LA PROFUNDIDAD Y EL CALOR METABÓLICO" al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: sasss2850@yahoo.com.mx vmgm84@hotmail.com
Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Sarahí Sandoval

SARAHÍ SANDOVAL ESPINOZA

nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos:

A mis directores de tesis Dr. Víctor Manuel Gómez Muñoz y Dr. Miguel Ángel Porta Gándara, por su apoyo, enseñanza y confianza.

A mis asesores Dr. Federico García Domínguez, Dra Diane Gendron Laniel y a mis revisores Dr. Enrique Nava Sánchez, Dra. Nancy Romero.

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) del IPN por el apoyo económico brindado.

Índice

	Pag.
Lista de Tablas.	iii
Lista de Figuras.	iv
Glosario.	vi
Resumen.	viii
Abstract.	ix
1. Introducción.	1
1.1 Tortuga golfina (<i>Lepidochelys olivacea</i>).	7
1.2 Distribución.	9
1.3 Alimentación.	10
1.4 Anidación.	10
1.5 Estatus de conservación.	11
2. Antecedentes.	13
3. Justificación.	15
4. Planteamiento del problema.	16
5. Hipótesis.	16
6. Objetivos.	16
7. Área de estudio.	17
8. Materiales y Métodos.	19
8.1 Medición de la temperatura de los nidos.	19
8.2 Modelo empírico.	19
8.3 Calor específico de los huevos.	20
8.4 Penetración de la onda de calor en la arena húmeda.	21
8.5 Calor metabólico.	24
9. Resultados.	28
9.1 Medición de la temperatura de los nidos.	28
9.2 Calor específico.	38
9.3 Modelos físicos.	39
9.4 Calor metabólico.	42

10. Discusión.	44
11. Conclusiones.	49
12. Recomendaciones.	50
13. Literatura citada.	51

Lista de Tablas

	No. de página	
Tabla 1	Distribución de las especies y subespecies de tortugas marinas reconocidas en la actualidad (Márquez, 1990).....	2
Tabla 2	Leyes y Reglamentos elaborados para la protección de tortugas marinas.....	3
Tabla 3	Temperatura media (°C) en diferentes regiones de nidos naturales o <i>in situ</i> de la tortuga <i>Lepidochelys olivacea</i> en San José del Cabo, B.C.S., México. Temporada 2004.....	30
Tabla 4	Temperatura media (°C) en diferentes profundidades de nidos colocados en corrales protegidos de la tortuga <i>Lepidochelys olivacea</i> en San José del Cabo, B.C.S., México. Temporada 2007.....	31
Tabla 5	Resultados de los cuatro nidos de <i>Lepidochelys olivacea</i> analizados.....	37
Tabla 6	Calor específico de los huevos de <i>Lepidochelys olivacea</i> en cada semana de incubación.....	38

Lista de Figuras

	No. de página	
Figura 1	Filogenia de vertebrados ilustrando el modo de la determinación sexual en diferentes taxa. Hembras y machos presentan tanto determinación sexual genética (GSD) (machos XY/XX y hembras ZZ/ZW heteromórficos), como determinación sexual dependiente de la temperatura de incubación (TSD).....	4
Figura 2	Esquema de la tortuga golfina <i>Lepidochelys olivacea</i> , Eschscholtz, 1829.....	7
Figura 3	Características de identificación de la tortuga golfina <i>Lepidochelys olivacea</i>	8
Figura 4	Distribución de la tortuga golfina <i>Lepidochelys olivacea</i>	9
Figura 5	Área de estudio, Campamento tortuguero “Don Manuel Orantes” municipio de Los Cabos Baja California Sur, México.....	18
Figura 6	(a) Localización de los sensores en nidos de <i>L. olivacea</i> , (b) Localización de sensores para el cálculo del calor metabólico.....	19
Figura 7	Esquema de la variación periódica de temperatura sobre la superficie de la arena.....	22
Figura 8	Representación del problema para el Cálculo del Calor metabólico.....	25
Figura 9	Proceso de la Solución de la Ecuación diferencial y proceso de optimización del cálculo de las conductividades de la arena y del calor metabólico: (a) Calibración de parámetros físicos; (b) Optimización de K_a & K_b , en ausencia del calor metabólico, durante los primeros días de incubación y con los valores óptimos de K_a & K_b optimización de Q_m	27
Figura 10	Temperatura ambiente del nido, corral e <i>in situ</i> a una profundidad de 30 cm, en playa La Fortuna de San José del Cabo, 2004 (nido 1).....	29
Figura 11	Temperatura ambiente del nido, corral e <i>in situ</i> a una profundidad de 30 cm, en playa La Fortuna, San José del Cabo, 2004 (nido 2).....	29

Figura 12	Variación de temperatura en nido de <i>Lepidochelys olivacea</i> a diferentes profundidades en playa La Fortuna de San José del Cabo (nido 3).....	31
Figura 13	Temperatura a 10 cm y 30 cm de un nido de <i>L. olivacea</i> durante 5 días del periodo de incubación.....	32
Figura 14	Correlación cruzada, con el desfase óptimo de temperatura (datos crudos) cada media hora (h/2).....	33
Figura 15	Estimación de la temperatura del nido a partir de la ambiental con datos crudos.....	34
Figura 16	(a) Promedios móviles de la temperatura ambiental, (b) Temperatura observada en campo y la estimada por el modelo.....	34
Figura 17	Correlograma de los promedios móviles de la temperatura.....	35
Figura 18	(a) Temperatura del nido a partir de la ambiental con promedios móviles, (b) Comprobación del pronóstico de la temperatura, los datos se ajustan a la recta de 45°.....	36
Figura 19	Comportamiento de la amplitud y desfase a diferentes profundidades de un nido de tortuga <i>Lepidochelys olivacea</i>	39
Figura 20	Temperatura máxima y mínima del nido de <i>Lepidochelys olivacea</i> un día a diferentes profundidades.....	39
Figura 21	Temperatura de incubación de un nido <i>in situ</i> de tortuga, <i>Lepidochelys olivacea</i> (línea azul), temperatura ambiental (línea negra) (nido 2).....	40
Figura 22	Temperaturas máximas y mínimas diarias durante todo el periodo de incubación de <i>Lepidochelys olivacea</i>	40
Figura 23	Estimación de la temperatura del nido de <i>Lepidochelys olivacea</i> a partir del modelo físico de difusión de onda de calor.....	41
Figura 24	Comprobación de la temperatura medida con datos experimentales y la estimada por el modelo.....	42
Figura 25	Cálculo de calor metabólico (a) Día 10 del periodo de incubación en ausencia de calor metabólico, en cuartos de hora (h/4) (b) Día 36 con 0.7 W de calor metabólico.....	43
Figura 26	Calor metabólico producido por los embriones de tortuga marina, <i>Lepidochelys olivacea</i> en función del tiempo de incubación.....	43

Glosario

Calor específico: Cantidad de calor en calorías que se requiere para elevar en 1°C la temperatura de un gramo de masa de una sustancia determinada. En otras palabras, es la cantidad de calor que hay que suministrar a un gramo de una sustancia para que eleve en un grado centígrado su temperatura, la cantidad de calor que cede o toma el cuerpo al variar su temperatura en un grado.

Calor: Energía que fluye entre un sistema y su entorno debido a que hay una diferencia de temperatura entre ellos. Flujo de energía causado por un gradiente de temperatura.

Conductividad térmica: Propiedad que tienen los cuerpos de transmitir el calor. Capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes, o a otras sustancias con las que está en contacto.

Corrales de incubación: Área de playa protegida para evitar el ingreso de depredadores, donde se resiembran los nidos de tortuga marina.

Correlación cruzada: Es una medida de la similitud entre dos series de tiempo, frecuentemente usada para encontrar características relevantes en una señal desconocida por medio de la comparación con otra que sí se conoce. Es la correlación lineal simple entre la 1ª serie y los valores de la 2ª con desfases de tiempo positivos y negativos.

Determinación sexual: Evento molecular que se establece en etapas tempranas del desarrollo embrionario, mediante el cual se define el sexo.

Diferenciación del sexo: Secuencia de eventos genéticos y hormonales que lleva a la gónada indiferenciada a desarrollarse como un ovario o como un testículo.

Ecuación diferencial ordinaria: Ecuación en la que la incógnita incluye una función desconocida de una variable y algunas de sus derivadas.

Ecuación diferencial parcial: Ecuación en la que la incógnita contiene una función desconocida de dos o más variables y alguna de sus derivadas parciales.

Energía cinética interna: Energía en movimiento de las moléculas de un cuerpo.

Inercia térmica: Es la resistencia que ofrece un cuerpo a ser calentado o enfriado.

Periodo termosensitivo: Lapso de tiempo o el grupo de estadios de desarrollo fuera del cual la manipulación de temperatura no ejerce influencia sobre el fenotipo sexual (Mrosovsky & Pieau, 1991).

Promedio móvil: Serie sucesiva de promedios simples para un periodo de tiempo definido, en donde a medida que un dato aparece, un nuevo promedio es generado y el dato más viejo sale de la serie.

Temperatura: Medida de la energía cinética de las moléculas de un cuerpo

Temperatura pivote: Temperatura de incubación a la cual la proporción sexual resultante en la nidada es 1:1.

RESUMEN

Se estudió la distribución de temperatura dentro de los nidos de la tortuga golfina *Lepidochelys olivacea* en función de la temperatura ambiente, profundidad del nido y el calor metabólico de los embriones, colocando sensores de temperatura a diferentes profundidades dentro de nidos de *L. olivacea*, así como el registro de la temperatura ambiental, debido a que la temperatura de la arena durante el periodo de incubación en nidos de tortuga influye en la supervivencia embrionaria, determina el sexo de las crías y afecta en la duración de la incubación. Las aportaciones más importantes de este trabajo son tres: La primera es que se pronosticó la temperatura de la arena a 30 cm de profundidad (a la que se localizan los nidos), a partir de los datos de temperatura a 10 cm, por medio de promedios móviles y correlación cruzada. De esta forma se podrá conocer el sexo de las crías sin necesidad de sacrificarlas, ya que la temperatura determina el sexo de una tortuga. La segunda aportación fue el cálculo inédito del calor específico en cada semana del tiempo de incubación de huevos de tortuga (*L. olivacea*) por medio de la ecuación de Siebel. Finalmente la tercera aportación es que a partir de la Primera Ley de la Termodinámica, se estimó el calor metabólico generado por los embriones en función del tiempo. Además, se aplicó un modelo físico a partir de la ecuación de difusión de calor para pronosticar la temperatura, que no pronostica de manera precisa la temperatura, pero permite estimar el amortiguamiento y el desfase de la temperatura de la arena a diferentes profundidades, a partir de la temperatura superficial.

Palabras clave: *Lepidochelys olivacea*, temperatura de incubación, determinación sexual, pronóstico de temperatura, calor metabólico.

ABSTRACT

In this thesis the temperature distribution inside a nest of a turtle (*Lepidochelys olivacea*) is studied as function of the environmental temperature, nest depth and metabolic heat of the embryos. Here, the most important contributions are: Using temperature data at 10 cm of depth and with statistical analysis (cross correlation and mobile average) the temperature is obtained at a depth of 30 cm where the eggs are localized, in this way the sex of turtles will be known without sacrificing them, because the sex of a turtle is determined by temperature. A second contribution was obtaining the specific heat during each week of incubation time of turtle eggs, using the Siebel's equation. Finally, using the First Thermodynamic law the metabolic heat generated by embryos was obtained as function of time. Also was applied a physic model by the diffusion of heat's equation for forecast the temperature from the superficial temperature in the sand.

Key words: *Lepidochelys olivacea*, incubation temperature, sexual determination, forecast temperature, metabolic heat.

1. INTRODUCCIÓN

México es considerado un país megadiverso, resultado de su ubicación geográfica, compleja topografía, variedad de climas e historia geotectónica y biogeográfica, ya que posee más del 10% de la diversidad terrestre del planeta (Mittermeier & Goettsch, 1992).

Los reptiles son un grupo de vertebrados que ha existido por más de 300 millones de años. Estos animales alcanzaron su plenitud durante el Jurásico y el Cretácico, actualmente representados por cuatro órdenes: Crocodylia (cocodrilos, caimanes), Rhynchocephalia (tuátaras), Testudines (tortugas), Squamata (serpientes, lagartos). No sólo ocupan una posición central en la filogenia de los vertebrados, si no que son los ancestros directos de aves y mamíferos. Poseen atributos biológicos únicos que podrían contribuir significativamente al entendimiento de la biología evolutiva básica y a los mecanismos moleculares detrás de la salud y enfermedad humana (Modi & Crews, 2005).

En las costas de México se pueden encontrar siete de las ocho especies de tortugas marinas que existen en el mundo, así como diez de las once variedades que se consideran hasta el nivel de subespecie (tabla 1). Las aguas que bordean la Península de Baja California proveen importantes zonas de crianza y de alimentación para cinco de ellas (Cliffon *et al.*, 1982; Seminoff *et al.*, 2003). Las tortugas *Eretmochelys imbricata* y *Dermochelys coriacea* están en la lista roja global de la IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources) en categoría de peligro crítico, mientras que *Caretta caretta*, *Lepidochelys olivacea* y *Chelonia mydas* son listadas como en peligro (Baillie & Groombridge, 1996).

Tabla 1. Distribución de las especies y subespecies de tortugas marinas reconocidas en la actualidad (Márquez, 1990).

Género	Especie	Subespecie	N. común	Distribución
<i>Caretta</i>	<i>Caretta</i>	<i>caretta</i>	Cahuama	Golfo y Caribe
<i>Caretta</i>	<i>Caretta</i>	<i>gigas</i>	Perica	Pacífico
<i>Chelonia</i>	<i>Mydas</i>	—	Blanca	Golfo y Caribe
<i>Chelonia</i>	<i>agassizii</i>	—	Prieta	Pacífico
<i>Eretmochelys</i>	<i>imbricata</i>	<i>imbricata</i>	Carey	Golfo y Caribe
<i>Eretmochelys</i>	<i>imbricata</i>	<i>bissa</i>	Carey	Pacífico
<i>Lepidochelys</i>	<i>Kempii</i>	—	Lora	Golfo y Caribe
<i>Lepidochelys</i>	<i>olivacea</i>	—	Golfina	Pacífico
<i>Dermochelys</i>	<i>coriacea</i>	<i>coriacea</i>	Laúd	Golfo y Caribe
<i>Dermochelys</i>	<i>coriacea</i>	<i>schlegelii</i>	Tinglada	Pacífico
<i>Natator</i>	<i>despressus</i>	—	Kikila	N. de Australia

Las poblaciones de tortugas marinas han sido diezgadas por una combinación de factores dentro de los cuales se incluyen la pesca comercial y artesanal en el pasado, la captura incidental y furtiva, la degradación y la pérdida de los hábitats de alimentación y anidación (Boulon, 2000; Witherington, 2000).

Esto ha llevado al desarrollo de programas de conservación y protección de especies amenazadas o en peligro de extinción, que mediante diversos mecanismos, logran desacelerar y evitar su desaparición (Márquez, 1996). Dentro de estos programas, las tortugas marinas han sido protegidas en todo el mundo y especialmente en México, donde además de haber tomado medidas legales y jurídicas en favor de ellas, cada año se instalan campamentos tortugeros a lo largo del litoral mexicano para su protección (tabla 2).

Tabla 2. Leyes y Reglamentos elaborados para la protección de tortugas marinas

Nombre y descripción	Año
Reglamento de Pesca: Prohibición en todo tiempo de posesión o consumo de huevo y destrucción de nidos, se establecen vedas y tallas mínimas de captura.	1927-1929
Creación del Programa de Investigación de Tortugas Marinas en el Instituto de Investigaciones Biológico Pesqueras (hoy Instituto Nacional de Pesca).	1962
Establecimiento de campamentos de protección e investigación para <i>L. olivacea</i> (Colima, Oaxaca, Guerrero y Jalisco).	1965
Veda total para todas las especies de tortugas marinas por dos años.	1971
Acuerdo de veda para la protección de tortugas marinas de julio a septiembre en el Océano Pacífico.	1973
Se amplía la veda de junio a octubre en el Océano Pacífico.	1975
Decreto de 17 playas como Zonas de Refugio para las tortugas marinas, 13 en el Océano Pacífico, para anidación de la tortuga golfina.	1986
Veda total y permanente para todas las especies y subespecies de tortugas marinas.	1990
Decreto presidencial denominado "Código de Ensenada", que establece la creación de un Museo Vivo de la Tortuga Marina en la Costa de Oaxaca (hoy Centro Mexicano de la Tortuga).	1991
NOM-059-ECOL-1994 que determina las especies y subespecies de fauna y flora en peligro de extinción	1994
NOM-001-PESC-1996 que establece el uso obligatorio de dispositivos excluidores de tortugas en el Pacífico Mexicano, incluyendo el Golfo de California.	1996
NOM-059-ECOL-2001 coloca a <i>L. olivacea</i> como especie en peligro.	2001

Los reptiles exhiben una extraordinaria variabilidad de las estructuras de los cromosomas sexuales y de los patrones de determinación sexual entre los vertebrados (Valenzuela & Lance, 2004) (Fig. 1). Por ejemplo, todos los cocodrilos, los tuátaras, la mayoría de las tortugas y muchos lagartos tienen determinación sexual dependiente de la temperatura (TSD, por sus siglas en inglés), en la cual el sexo anatómico del adulto es función de la temperatura a la cual se incuban los huevos. Las especies que exhiben el TSD no revelan diferencias cariotípicas entre los machos y hembras, y el rango en la temperatura donde se producen todos los machos o todas las hembras puede ser tan pequeño como 1°C (Crews *et al.*, 1994).

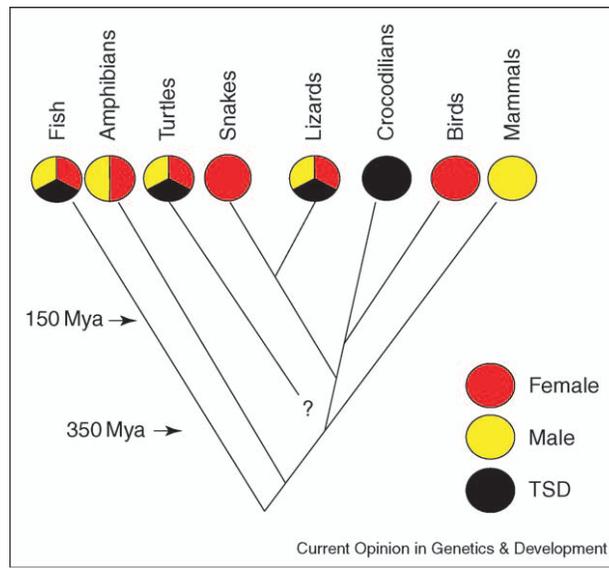


Figura 1 - Filogenia de vertebrados ilustrando el modo de la determinación sexual en diferentes taxa. Hembras y machos presentan tanto determinación sexual genética GSD (machos XY/XX y hembras ZZ/ZW heteromórficos), como determinación sexual dependiente de la temperatura de incubación TSD (tomado de Crews *et al.*, 1994).

En las tortugas marinas, la determinación del sexo por temperatura ha sido encontrada en *Caretta caretta* (Yntema & Mrosovsky, 1980), *Chelonia mydas* (Miller & Limpus, 1981), *Dermochelys coriacea* (Rimblot *et al.*, 1985), *Lepidochelys olivacea* (Morreale *et al.*, 1982), *Lepidochelys kempii* (Shaver *et al.*, 1988) y *Eretmochelys imbricata* (Dalrymple *et al.*, 1985).

Además, en todas las especies de tortugas marinas no hay una característica morfológica externa que pueda ser usada para determinar el sexo de las crías y sólo es posible a través de una disección (métodos invasivos), o por medio de la extracción de fluidos corioalantoideo y amniótico a través de determinar la proporción de estradiol y testosterona (radioinmunoanálisis); esta última técnica no funciona para el caso de *Lepidochelys olivacea* (Merchant-Larios, 2000).

La temperatura de los nidos de tortuga no sólo es crítica para la determinación del sexo, sino que también afecta el desarrollo embrionario (Ackerman, 1994) y el fenotipo de la descendencia (Packard & Packard, 1988; McGehee, 1990). El sitio que

una hembra escoge para depositar los huevos puede tener profundas consecuencias para el desarrollo exitoso (Mortimer, 1990) y la subsecuente supervivencia de su descendencia (Madsen & Shine, 1999).

McCoy *et al.* (1983) determinaron que los huevos de *Lepidochelys olivacea* incubados a temperaturas de 28°C producen el 100% de machos, cuando son incubados a 32°C producen 100% hembras, la determinación sexual se presenta alrededor del segundo tercio del tiempo total de incubación (periodo termosensitivo PTS) (Mrosovsky & Pieau, 1991), y la temperatura de incubación en la cual la proporción sexual resultante en la nidada es 1:1 es llamada temperatura pivote, que experimentalmente éste valor se ha obtenido incubando grupos de huevos a varias temperaturas constantes y determinando la proporción de crías hembras y machos, donde la temperatura pivote para *Caretta caretta* (28.74°C), *Chelonia mydas* (28.26°C), *Lepidochelys olivacea* (29.13°C) y *Eretmochelys imbricata* (29.32°C) (Ackerman, 1997).

Muy pocos estudios han examinado las variaciones dentro de los nidos incubados (Spotila *et al.*, 1987). Se ha registrado la elevación de la temperatura dentro de un nido causado por calor metabólico producido por el desarrollo de los embriones en nidos de tortuga verde, *Chelonia mydas* (Kaska *et al.*, 1998); carey, *Eretmochelys imbricata* (Raj, 1976) y laúd, *Dermochelys coriacea* (Godfrey *et al.*, 1997).

Se ha encontrado que las temperaturas de los nidos se incrementan en promedio 0.82°C durante el período termosensitivo, por lo que el calor metabólico puede influir en las proporciones de sexo. Se ha sugerido que el calor metabólico sólo puede ser importante si eleva la temperatura del nido más de 1°C durante el segundo tercio del periodo de incubación. Algunos estudios han mostrado que tal aumento en la temperatura ocurre en la segunda mitad del periodo de incubación y se ha sugerido que el calor metabólico no es importante con respecto a la TSD porque ocurre después del período termosensitivo crítico (Mrosovsky & Yntema, 1980).

La población de las tortugas es afectada por una relativa baja probabilidad de supervivencia de los embriones, a causa de depredación de huevos por humanos y otros animales, destrucción de embriones por factores abióticos como temperaturas extremas, humedad extrema, infecciones microbianas y destrucción de nidos por otras hembras, así como una baja probabilidad de supervivencia de los adultos (Iverson, 1991).

Bustard & Greenham (1968), citados por McGehee (1979), afirman que la falta de humedad en la arena de la playa a una profundidad similar a la del nido, causa que la cámara donde se depositan los huevos se colapse mientras la tortuga está construyendo el nido y cuando falla la construcción, la tortuga se mueve a otro lugar (esperando a que éste sea mejor) e intenta anidar nuevamente. Además, la humedad de la arena debe mantenerse en valores óptimos para el equilibrio osmótico de los huevos porque es un parámetro importante para el desarrollo embrionario.

A la fecha no se han diseñado ni realizado estudios a largo plazo que demuestren si la manipulación de la proporción sexual es benéfica o perjudicial. En tanto no se tenga más información disponible y a la luz de algunas consecuencias negativas que se derivarían de la manipulación, se asume el principio de que es más seguro mantener la proporción natural de sexos observada en el medio natural (Lovich, 1996; Girondot *et al.*, 1998).

El conocimiento de la proporción sexual natural en las poblaciones anidadoras de tortugas marinas es un componente importante de cualquier plan de manejo y proporciona un punto de comparación para evaluar los efectos de las técnicas de conservación: la reubicación de las nidadas, a otra área de playa o a un vivero, que podrían tener un régimen térmico diferente. La cosecha controlada de huevos durante un solo periodo de la temporada, podría resultar en la remoción desproporcionada de individuos de un solo sexo. El relleno artificial de algunas playas erosionadas (*beach nourishment*) también podría alterar sus características

térmicas por la introducción de un tipo de arena diferente, así como la remodelación de las playas (*beach armouring*) en los desarrollos turísticos (Mortimer, 1990).

Por tanto, es importante pronosticar la temperatura de los nidos, sobre todo en aquellos que pudieran ser removidos, para contribuir al conocimiento o estimación del sexo de las crías, aunque en este trabajo no se aborda el tema de la proporción sexual y de su estimación a partir de las temperaturas de incubación.

1.1 TORTUGA GOLFINA (*Lepidochelys olivacea*, Eschscholtz 1829)

Es considerada la más abundante de las tortugas marinas. En el Pacífico Mexicano, Costa Rica y Orissa en el este de las costas de India anidan generalmente más de 100,000 hembras (Pritchard, 1997; Pandav *et al.*, 1998).

De acuerdo con las clasificaciones modernas, según Carr, 1952; Pritchard, 1979 y Márquez, 1990, su ubicación taxonómica es la siguiente:

Phylum Chordata
Clase Reptilia
Orden Testudinata
Familia Cheloniidae
Genero *Lepidochelys*
Especie *Lepidochelys olivacea*

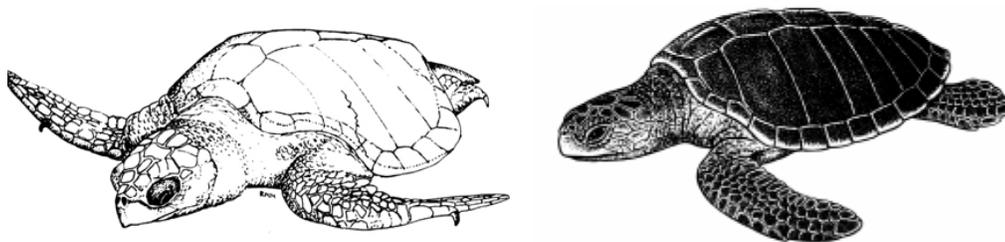


Figura 2 - Esquema de la tortuga golfina *Lepidochelys olivacea*, Eschscholtz, 1829 (tomado de Márquez, 1996).

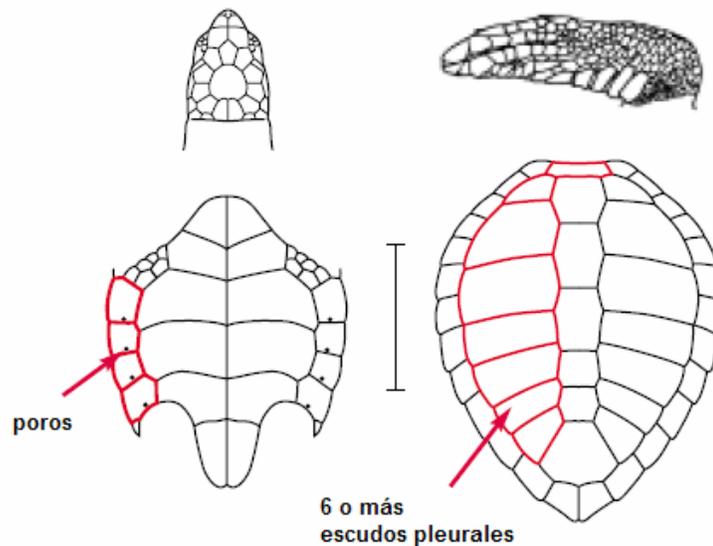


Figura 3 - Características de identificación de la tortuga *Lepidochelys olivacea* (tomado de Guía de identificación CITES, 1999).

Estos organismos presentan un carapacho casi circular en la edad adulta, con amplitud similar a su longitud, con los márgenes ligeramente levantados; su cabeza es de tamaño mediano y subtriangular. Las crías tienen el carapacho menos ancho. Su cabeza exhibe dos pares de escamas prefrontales, y un pico córneo sin sierra en sus bordes. El carapacho cuenta con más de 15 escudos mayores: 5-7 dorsales y 5-7 pares laterales, el par anterior está en contacto con el escudo precentral (Figs. 2 y 3).

Las crías son dorsal y ventralmente de color gris oscuro a negro. Los adultos dorsalmente van del olivo-gris al olivo-amarillento. Ventralmente van del color crema al gris verdoso claro, con manchas oscuras en los extremos de las aletas. Los flancos de los cuellos a veces ligeramente amarillentos o rosáceos. Las dimensiones de los huevos presentan un diámetro promedio de 39.7 mm y un peso de 34.2 g. Los nidos varían de 54 a 189 huevos. Las crías alcanzan una longitud media del carapacho de 43.5 mm y un peso de 16.2 g, y en los adultos la longitud recta del carapacho es de 51 a 78 cm y su peso de 33 a 52 kg (Márquez, 1996).

1.2 DISTRIBUCIÓN

La tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*) se distribuye en el Océano Pacífico Oriental desde el norte de California y el Golfo de California hasta Chile con áreas de concentración en México (Baja California, sur de Sinaloa, Michoacán, Guerrero y Oaxaca), Centroamérica, y más al Sur, hasta la zona entre Panamá y Colombia (Márquez, 1996).

También se ha visto que en el oeste del Océano Índico anida a lo largo de la costa este de África, en Omán (Frazier, 1975), Pakistan (Asrar, 1999), Gujarat (India) así como en las costas este de la India, Sri Lanka, Bangladesh (Kar & Bhaskar, 1982) y otros países del sureste de Asia (Limpus, 1995). En India, unos pocos miles de tortugas *Lepidochelys olivacea* anidan en Tamil Nadu (Bhupathy & Saravanan, 2002), Islas Andaman y Nicobar (Andrews *et al.*, 2001) (Fig. 4).



Figura 4- Distribución de la tortuga golfina *Lepidochelys olivacea*.

1.3 ALIMENTACIÓN

La tortuga golfina es altamente gregaria y básicamente diurna, se alimenta de organismos bentónicos presentes en aguas someras; además, durante las migraciones se alimenta también de organismos pelágicos como langostillas rojas (*Galateidae*, *Pleuroncodes planipes*), puestas de peces e incluso colonias de tunicados (*Pyrosoma*) (Márquez, 1996).

En un estudio realizado en la costa de Oaxaca, sobre contenido estomacal con 139 ejemplares de *Lepidochelys olivacea*, encontraron de acuerdo al orden de importancia, que se alimentaban de: salpas, peces, moluscos, crustáceos, algas, briozoarios, sipuncúlidos, ascidias y huevos de peces. Por ejemplo, entre las especies más representativas del Phylum Mollusca están *Polinices ravidus*, *Turritella sp.*, *Persicula imbricata*, *Polystira oxitropis*, *Pitar sp.* y *Nuculana sp.* Los principales componentes volumétricos alimenticios durante la temporada de muestreo para este quelonio en estado adulto son las salpas y los peces. Con relación a la frecuencia se encontró que los moluscos y los crustáceos alcanzaron los porcentajes más elevados. A partir del material muestreado, tiempo y área de estudio, se concluye que tiene un tipo de dieta omnívora con tendencia a carnívora (Montenegro *et al.*, 1986).

1.4 ANIDACIÓN

La anidación de las golfinas comúnmente se efectúa durante el verano, llegan a playas abiertas, continentales, aisladas, con pendiente (cerca de 5°), de mediana energía y generalmente suben hasta la primera berma o terraza, donde es común que aniden al primer intento, en espacios libres de vegetación, dentro de zonas tropicales y subtropicales que se encuentran aproximadamente entre los 40°N y 30°S de latitud, siempre con temperaturas por encima de los 24°C del agua superficial del mar (Márquez, 1996). El ciclo reproductivo de las tortugas está ligado a las fases

lunares otoñales, por lo que la arribazón ocurre antes o después del cuarto menguante (Gallo, 1981).

La temporada de anidación más importante en el Océano Índico se presenta en playas de Orissa (Pandav *et al.*, 1998).

Al salir de la rompiente la tortuga se deja llevar por las olas para remontar más fácilmente a la playa. Al llegar al lugar preciso (consistencia de la arena, humedad, temperatura y quizá el olor del sitio escogido) la hembra comienza la excavación de la “cama”, aventando arena con las aletas anteriores. Comienza por introducir una de las aletas posteriores, saca la arena hasta hacer un hoyo a una profundidad de 45 cm, con una configuración interior similar a una olla de barro. Terminada la excavación, se inicia el desove, que suele ser agotador. Durante este arduo trabajo, la tortuga vierte lágrimas que le sirven para expulsar el exceso de sales del cuerpo y limpiar los ojos de la arena. Al terminar la puesta tapan el hoyo con las aletas y lo disimulan esparciendo arena, después aplanan la arena que cubre el nido con el plastrón. Todo el proceso les lleva alrededor de 45 minutos (Gallo, 1981).

Los huevos de las tortugas marinas son esféricos, de cascarón suave y presentan una escasa calcificación. Las crías como resultado de la incubación, aparecen en la superficie del nido a partir de los 45 días de haber sido depositado los huevos. Llegado el momento de la eclosión, rasgan al cascarón con un dentículo o carúncula que presentan en la punta del pico (Márquez, 1996).

1.5 ESTATUS DE CONSERVACIÓN

La Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna (CITES) enlista a la tortuga *Lepidochelys olivacea* en su Apéndice I, que se refiere a la prohibición en el comercio internacional, y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) considera a esta especie como en peligro.

La disminución de las poblaciones de tortugas marinas en peligro de extinción ha sido una preocupación de las comunidades dedicadas a la conservación en décadas. La conservación de las tortugas marinas incluye el manejo de playas de anidación, traslado de nidos a criaderos protegidos, reducción o eliminación de los depredadores naturales, protección contra la caza furtiva y pesca (Bjorndal, 1995; Ehrenfeld, 1995). La protección de playas de anidación y nidos es considerada parte de una gama de estrategias para la conservación de las tortugas marinas, donde los factores de mortalidad como escenario del ciclo de vida ha sido añadida (Frazer, 1992; Spotila *et al.*, 2000). La protección de las playas de anidación y el traslado de los nidos a corrales protegidos han sido ampliamente aplicados (Pritchard *et al.*, 1993; Tow & Moll, 1995). La reubicación de los nidos es una importante estrategia de conservación en las playas donde la supervivencia es baja o nula debido a la extracción furtiva, la depredación o la erosión.

Existe controversia acerca de la utilidad del traslado de nidos y la eliminación de criaderos de protección *in situ*, porque el manejo de los nidos puede ocasionar un menor éxito de eclosión y una alteración del sexo de las crías (Ehrenfeld, 1995; Pritchard, 1995).

Las principales estrategias para la conservación de la tortuga marina en México incluyen una prohibición completa de la explotación de la tortuga marina y sus huevos, así como la protección de playas de anidación (SEPESCA, 1991). La administración se ha centrado principalmente en la protección de nidos en playas de anidación (Kilma & McVey, 1995; INP, 1990). Se han encontrado problemas recurrentes relacionados con la falta de fondos, incluyendo la insuficiente protección de las playas y el inadecuado manejo de los nidos removidos a corrales protegidos, lo cual ha ocasionado fallas en los programas de conservación (Pritchard, 1995).

2. ANTECEDENTES

Se han hecho estudios para estimar la proporción sexual en la producción de crías de tortugas marinas, en los que se han utilizado técnicas que consideran diferentes aspectos: incubación en laboratorio (Mrosovsky & Yntema, 1980), inspección de la temperatura en nidos a diferentes profundidades (Godfrey *et al.*, 1996), inspección de la temperatura dentro de los nidos (Spotila *et al.*, 1987), así como inferencias a partir de la duración de la incubación (Marcovaldi *et al.*, 1997).

En un estudio realizado en Chipre (Godley *et al.*, 2001) se inspeccionó la temperatura en 23 nidos *in situ* de tortuga *Caretta caretta*, donde encontraron que la temperatura de la arena tiene una alta correlación con la temperatura media del ambiente y la temperatura media del nido. La temperatura media en los nidos varió de 29.5°C a 33.2°C y la temperatura media en el segundo tercio de incubación varió de 29.3°C a 33.7°C. El éxito de eclosión para este experimento tuvo una correlación significativa con la temperatura de incubación; por ejemplo, en nidos con altas temperaturas el éxito de eclosión fue menor. Todos los nidos mostraron una variación regular de temperatura con fluctuaciones diarias dentro de un rango de 0.3°C a 1.4°C. Se demostró un incremento en la temperatura de la arena debido al calor metabólico, y éste varió marcadamente a lo largo de todo el período de incubación, siendo mayor en el último tercio de la incubación.

Han sido extensos los estudios de la estimación de sexo de las eclosiones de la tortuga *Caretta caretta*. Por ejemplo para poblaciones separadas de anidación en Estados Unidos de Norteamérica y Brasil, las estimaciones basadas en datos a partir de cinco o más temporadas consecutivas de anidación, sugieren que las estimaciones de sexo en ambas áreas fueron del 90% de hembras (Mrosovsky & Provanha, 1992; Marcovaldi *et al.*, 1997).

Godfrey *et al.* (1999) estimaron la proporción de sexos en crías *in situ* de tortuga *Eretmochelys imbricata* producidos en Bahía, Brasil, durante 6 temporadas de

anidación, basados en la duración de la incubación y la temperatura pivote. El porcentaje de hembras entre los años 1991 hasta 1997 fue mayor del 90%. En Costa Rica encontraron que la temperatura umbral de la arena parece ser clave en el tiempo de eclosión de la tortuga marina. Ellos midieron la temperatura a profundidades de 0, 5, 10, 15 y 30 cm en nidos de *Lepidochelys olivacea* (n=20), *Chelonia mydas agassizi* (n=1) y *Dermochelys coriacea* (n=20). La razón de cambio de temperatura fue de 0 a 2°C/h. La temperatura máxima crítica de las eclosiones, fue de 41.3°C para *L. olivacea*, 41.3°C para *C. m. agassizi*, y 40.2°C para *D. coriacea* (Drake & Spotila, 2002).

En Isla Herón, Australia, estudiaron huevos de *Chelonia mydas*, que incubaron a temperatura masculinizante (26°C) y a temperatura feminizante (30°C). El consumo de oxígeno y crecimiento embrionario fue revisado en toda la incubación. Las eclosiones fueron de 79 días a 26°C y 53 días a 30°C (Booth & Astill, 2001).

Godley *et al.* (2001) midieron el tiempo de incubación de la tortuga (*Caretta caretta*) en Chipre, durante seis temporadas de anidación (1993-1998). Ellos estimaron la razón de sexos a partir del tiempo de incubación y encontraron que del 89 al 99% de crías fueron hembras.

Godley *et al.* (2002) examinaron el papel desempeñado por la temperatura en la duración de la incubación y el sexo de las crías de tortuga (*Chelonia mydas*) en Isla Ascensión, al sur del Atlántico. Midieron la temperatura en 39 nidos y el perfil estacional del sexo de las crías producidas en todas las playas de la isla y se mostró un sesgo hacia hembras en una proporción 3:1 y una temperatura pivote de 28.8°C.

En las tortugas, *Chelonia mydas* y *Caretta caretta* la temperatura de los nidos naturales en playas del norte de Chipre y Turquía fue examinada mediante registradores electrónicos de temperatura, colocados en la parte superior, media y en el fondo de los nidos. Las diferencias de temperatura dentro de la nidada fueron

mayores en *Caretta caretta* que en los nidos de *Chelonia mydas*. Los huevos en la parte superior del nido experimentaron generalmente condiciones más cálidas, hasta 1.4°C más que los huevos en la parte inferior del mismo nido, y esto causó la variación de los sexos dentro de los nidos. En el total de nidos, la proporción sexual fue 91% de hembras en la parte superior, el 83% en el centro, y el 69% en la parte inferior (Kaska *et. al.*, 1998).

3. JUSTIFICACIÓN

La temperatura de la arena durante el periodo de incubación en nidos de tortuga influye en la supervivencia embrionaria, determina el sexo de las crías y afecta en la duración de la incubación. Hasta la fecha no se han diseñado ni realizado estudios a largo plazo que demuestren si la manipulación de la proporción sexual es benéfica o perjudicial. En tanto no surja más información disponible a la luz de algunas consecuencias negativas que se derivarían de la manipulación, se asume el principio de mantener la proporción natural de sexos observada. El pronóstico de las temperaturas del nido se puede usar para desarrollar un método no invasivo que ayude a estimar la determinación sexual, utilizando herramientas estadísticas o físicas, sobre todo en las playas de anidación de los campamentos tortugueros. En cuanto al calor metabólico generado por los huevos durante su desarrollo embrionario, son escasos los trabajos en los que se ha estudiado su influencia en el incremento de la temperatura de los nidos que pudiera afectar la proporción de sexos y en ninguno se ha calculado su valor como una fuente de energía calorífica interna.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que las tortugas marinas están en peligro de extinción, para proponer planes de manejo adecuados es necesario conocer la proporción de sexos de los nidos en los campamentos tortugueros, a partir de métodos no invasivos que permitan realizar el pronóstico de la temperatura de los nidos utilizando sensores para la medición de la temperatura ambiente y a diferentes profundidades de la arena circundante.

5. HIPÓTESIS

Es factible pronosticar la temperatura del nido a través de mediciones de temperatura ambiental o en la arena, cercanas a la superficie, por medio de métodos estadísticos o modelos físicos teóricos.

6. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Describir y pronosticar las variaciones de temperatura en nidos de tortuga, *Lepidochelys olivacea* en función de la temperatura ambiente, la profundidad y el calor metabólico.

6.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Describir la temperatura a diferentes profundidades en nidos trasladados a corrales protegidos o *in situ* de tortuga, *Lepidochelys olivacea* durante las temporadas de anidación 2004-2007 y su relación con la temperatura ambiental.

- Aplicación de un modelo teórico de la difusión de calor a través de la arena a diferentes profundidades.
- Estimación del calor específico de los huevos en diferentes etapas del desarrollo embrionario.
- Cálculo del calor metabólico en diferentes etapas del desarrollo embrionario.
- Pronóstico de la temperatura de los nidos a partir de la temperatura de la capa superficial de la arena por medio de la solución de la ecuación diferencial de conducción de calor.

7. ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se efectuó en la zona aledaña a San José del Cabo, B.C.S., cubierta por el programa de protección de tortugas marinas a cargo del Municipio de Los Cabos, que abarca un total de 35 km de playa (Fig. 5). El municipio se encuentra situado al sur de la Península de Baja California, limitando al Norte con el municipio de La Paz, al Sur y al Este con el Golfo de California y al Oeste con el Océano Pacífico. Se ubica alrededor de los 23° 03' N y 109° 42' W a una altura promedio de 40 msnm. Los climas característicos del municipio de Los Cabos son: cálido-seco, al norte de San José del Cabo y templado-seco en la parte más alta de la Sierra de La Laguna y San Lázaro. El mes más frío del año por lo regular es el mes de enero y la temperatura media anual es de 24°C. Tiene un régimen de lluvias en verano, registrándose en el mes de septiembre la mayor precipitación pluvial (H. Ayuntamiento de Los Cabos, 2002).

Las aguas de la Península de Baja California proveen importantes criaderos y zonas de alimentación para cinco de las siete especies de tortugas marinas (Cliffon *et al.*, 1982; Seminoff *et al.*, 2003). Dos especies de tortugas marinas, *Dermochelys coriacea* y *Lepidochelys olivacea*, anidan regularmente en las playas de Baja

California. Las tortugas *Chelonia mydas* y *Caretta caretta* son las especies más comunes de tortugas marinas en esta región (Nichols, 2003).

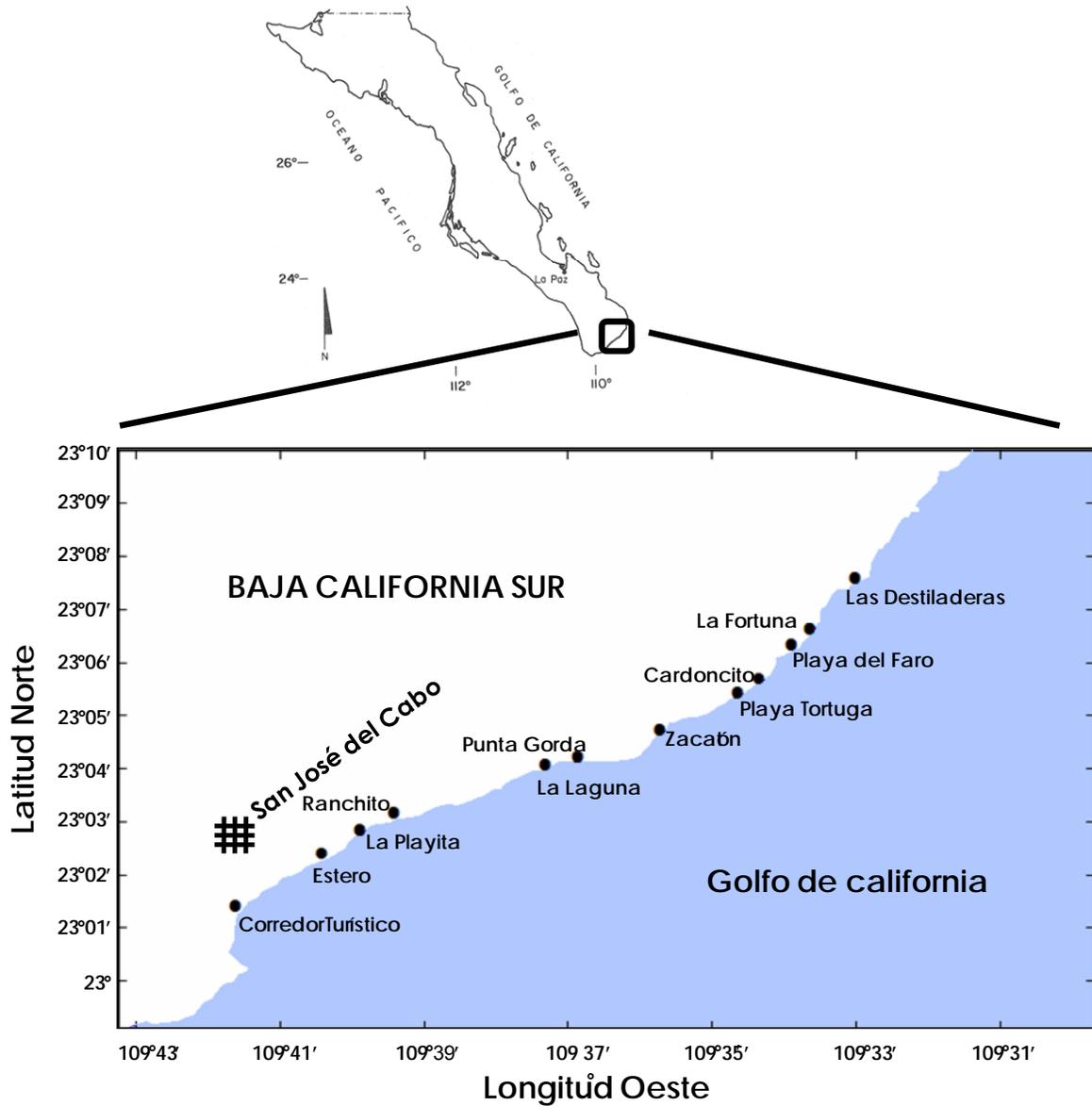


Figura 5 - Área de estudio, Campamento tortuguero “Don Manuel Orantes” municipio de Los Cabos Baja California Sur, México.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS NIDOS

Para describir la distribución de temperatura a diferentes profundidades en nidos trasladados a corrales protegidos o *in situ* de tortuga, *Lepidochelys olivacea* durante la temporada de anidación y su relación con la temperatura ambiental, se recolectaron datos que provienen de dos temporadas de anidación de la tortuga *L. olivacea*, una del año 2004 ($n=2$) y otra del 2007 ($n=4$), realizadas en el campamento tortuguero de San José del Cabo “Don Manuel Orantes”, se registró la temperatura del interior de los nidos utilizando termómetros digitales programables “HOBO Pro v2 2x Ext Temp Logger U23-003” con resolución de 0.02°C , a una profundidad de 10, 20, 30 (centro del nido) y 40 cm cada 0.5 h durante el periodo de incubación. También se registró la temperatura ambiental (Fig. 6).

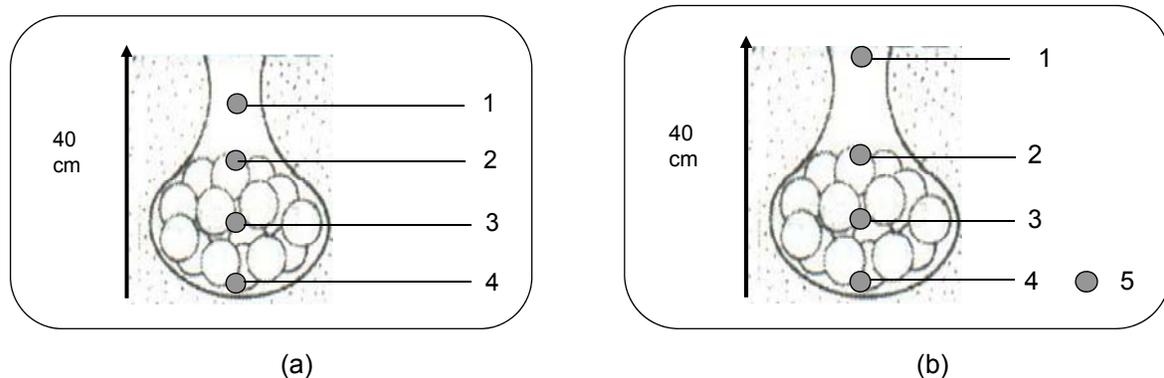


Figura 6 - (a) Localización de los sensores de temperatura en nidos de tortuga
(b) Localización de sensores para el cálculo del calor metabólico.

8.2 MODELO EMPÍRICO

Se aplicaron correlaciones cruzadas (Ec. 1) para diferentes desfases de tiempo δ entre las dos series de temperatura superficial de la arena $T_a(t)$ y la temperatura del nido $T_n(t)$:

$$r(\delta) = \text{corr}(T_a(t), T_n(t + \delta)), \quad \delta \geq 0 \quad (1)$$

Para eliminar la estacionalidad diaria y dado que se registró la temperatura cada 0.5 h, se utilizó el promedio móvil de orden 48 (Ec. 2), de modo que la serie resultante refleje la tendencia de corto plazo de las temperaturas:

$$\mathbf{pm}(t) = \frac{\mathbf{X}_{t-23} + \mathbf{X}_{t-22} + \dots + \mathbf{X}_t + \dots + \mathbf{X}_{t+24}}{48} \quad (2)$$

donde X_t representa a cualquiera de las series de temperatura $\mathbf{Ta}(t)$ o $\mathbf{Tn}(t)$. Tanto para los datos crudos de $\mathbf{Ta}(t)$ y $\mathbf{Tn}(t)$ como para sus correspondientes promedios móviles $\mathbf{pm}_a(t)$ y $\mathbf{pm}_n(t)$, se calcularon los desfases óptimos con los que se obtuvo la correlación más alta y se verificó la capacidad predictiva de la recta de regresión correspondiente.

8.3 CALOR ESPECÍFICO DE LOS HUEVOS

Para resolver la ecuación de difusión de calor a través de la arena a diferentes profundidades, se necesitan datos de varias variables involucradas en el modelo físico: el calor específico de los huevos y calor específico de la arena húmeda, por lo que es necesario su cálculo debido que no se incluyen en las tablas publicadas sobre las propiedades térmicas de los diversos materiales.

Para la estimación del calor específico en diferentes etapas de desarrollo embrionario, se utilizó la fórmula empírica de Siebel (Mohsenin, 1980), que es utilizada para medir el calor específico de materiales orgánicos.

El proceso para aplicar esta fórmula empírica fue el siguiente:

1. Extracción de los huevos de la tortuga.
2. Colocación en cajas de poliestireno dividiendo el total de huevos, en cada caja para ser utilizados cada semana, con una revisión continua de su temperatura, con un multímetro digital.

3. Cada huevo fue pesado una vez por semana y colocado en una cápsula de porcelana.
4. Posteriormente se llevó a su deshidratación en un horno.
5. Por último incineran los huevos en una mufla, con lo que se obtuvo el porcentaje de humedad, que se sustituyó la ecuación de Siebel (1892) (Ec.3).

$$C_{eh} = 0.008 \cdot M + 0.2 \quad (3)$$

donde:

C_{eh} = Calor específico del huevo

M = Contenido de agua del material en porcentaje de humedad

0.2 = Constante asumida del calor específico de materiales sólidos secos

8.4 PENETRACIÓN DE LA ONDA DE CALOR EN LA ARENA HÚMEDA

Con el objetivo de obtener la distribución vertical de la temperatura en un nido de tortuga se aplicaron modelos físicos teóricos conocidos y se realizaron las siguientes simplificaciones: se considera que el volumen que ocupan los huevos enterrados en la arena tiene forma esférica y que la frontera de la esfera permanece a temperatura constante. Para llevar a cabo este cálculo se utilizó la aproximación de una función sinusoidal que represente la variación de la temperatura durante un día sobre la superficie de la arena. El contenido del cuerpo esférico (que representa la masa de huevos depositados) se consideró uniformemente distribuido y continuo, además de poseer propiedades físicas constantes como densidad, conductividad y calor específico.

Así se considera el problema del flujo de calor sobre la arena húmeda en una dimensión, cuya frontera sea plana y normal a la dirección del flujo bajo una variación periódica de temperatura en su superficie (Fig. 7).

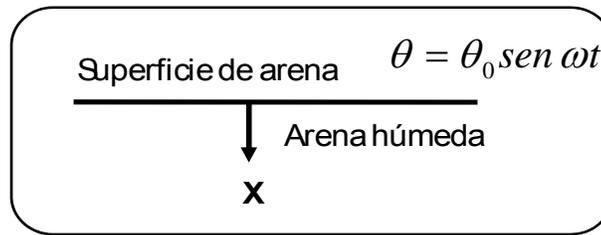


Figura 7 - Esquema de la variación periódica de temperatura sobre la superficie de la arena.

La ecuación fundamental para este problema unidimensional (Ec. 4) se desarrolló a partir de la ecuación de difusión de calor (Ingersoll & Zobel, 1966):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = h^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4)$$

donde :

θ = temperatura estandarizada respecto a su media

t = tiempo

x = profundidad

h = raíz cuadrada de la difusividad de la arena húmeda = $\sqrt{\frac{k}{\rho \cdot C_e}}$

k = conductividad

ρ = densidad

C_e = Calor específico

Se supone la condición de frontera en superficie (para $x=0$):

$$\theta = \theta_0 \text{sen}(\omega t) \quad (5)$$

Como la ecuación (4) es lineal y homogénea con coeficientes constantes, el valor de $h=0.05 \text{ m h}^{-1/2}$, $k=1.13 \text{ W/}^\circ\text{K}\cdot\text{m}$, $\rho=1640 \text{ kg/m}^3$, $C_e=836 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{K}$ y considerando que el volumen que ocupan los huevos enterrados en la arena tiene forma esférica y que la

frontera de la esfera permanece a temperatura constante, se puede asumir que la solución para cualquier tiempo t y profundidad x está dada por:

$$\theta = A e^{\alpha t + \beta x} \quad (6)$$

Para que (6) sea solución de (4) se debe cumplir que $\alpha = h^2 \beta^2$, con lo que (6) se reescribe como:

$$\theta = A e^{\alpha t \pm \frac{x}{h} \sqrt{\alpha}} \quad (7)$$

La ecuación (8) siguiente satisface la condición (5) y representa la solución al problema de difusión de calor en una dimensión:

$$\theta = \theta_0 e^{\frac{-x}{h} \sqrt{\frac{\omega}{2}}} \text{sen} \left(\omega \left(t - \frac{x}{h \sqrt{2\omega}} \right) \right) \quad (8)$$

Es decir, a partir de la suposición de que la variabilidad de la temperatura en la superficie sigue una forma sinusoidal, la solución (Ec. 8) de la ecuación de difusión también se representa en forma sinusoidal, donde para cada profundidad x , el senoide correspondiente se caracteriza por:

Amplitud = $\theta_0 e^{\frac{-x}{h} \sqrt{\frac{\omega}{2}}}$, que representa la amortiguación de la temperatura

Desfasamiento = $\frac{x}{h \sqrt{2\omega}}$, que es el retraso de la temperatura

donde $\omega = \frac{\pi}{12}$ es la frecuencia angular, que representa el inverso del periodo multiplicado por 2π .

8.5 CALOR METABÓLICO

Para calcular el calor metabólico generado por los huevos, se usó el modelo físico derivado de la Primera Ley de la Termodinámica (Ec. 9), en la que se establece el equilibrio entre la energía que se acumula en el nido (primer miembro de la ecuación), la energía interna generada por los embriones o calor metabólico y la energía transferida de la arena al nido (Fig. 8):

$$M_{\text{nido}} \cdot C_{p_{\text{nido}}} \cdot \frac{dT_{\text{nido}}}{dt} = Q_{\text{met}} - A_1 \cdot U_{na_1} (T_{\text{nido}} - T_{a_1}) - A_2 \cdot U_{na_2} (T_{\text{nido}} - T_{a_2}) \quad (9)$$

donde:

M_{nido} = Masa del nido

$C_{p_{\text{nido}}}$ = Calor específico de los huevos

T_{nido} = Temperatura del nido

Q_{met} = Calor metabólico generado por los embriones

A_1 = Área superior del nido

A_2 = Área lateral del nido

U_{na_1} = Coeficiente de transferencia de calor entre el nido y la arena superficial.

U_{na_2} = Coeficiente de transferencia de calor entre el nido y la arena lateral.

T_{a_1} = Temperatura superficial de la arena

T_{a_2} = Temperatura de la arena lateral

A partir de las conductividades de la arena a diferentes profundidades y de las distancias de los sensores al nido, los coeficientes de transferencia de calor entre el nido y la arena (superficial y lateral respectivamente) se calcularon mediante:

$$U_{na_1} = \frac{K_a}{d_1} \quad \text{y} \quad U_{na_2} = \frac{K_b}{d_2}$$

donde las conductividades K_a y K_b fueron estimadas en función de la solución óptima de la ecuación diferencial (9).

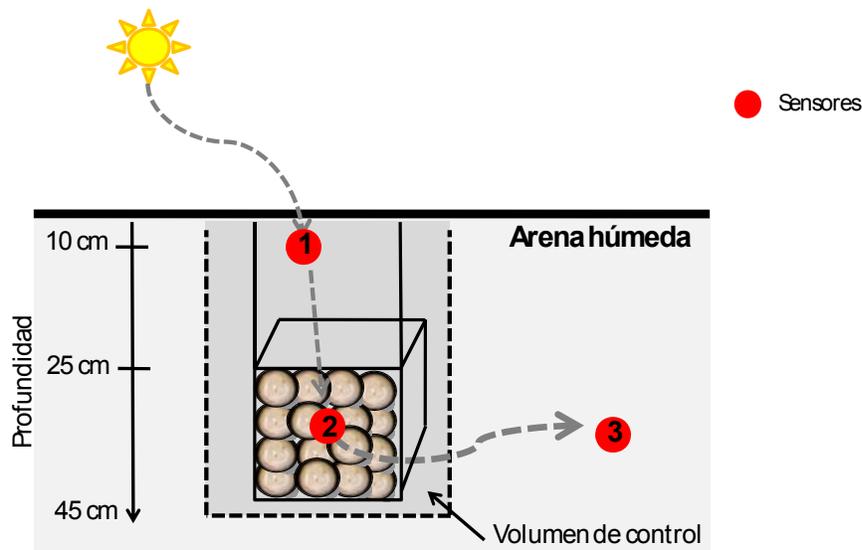


Figura 8 – Representación del problema para el cálculo del calor metabólico.

El procedimiento para el cálculo del calor metabólico a través de la ecuación diferencial (9), fue el siguiente:

1. Registro de datos de temperatura de la arena superficial T_{a_1} , para la cual se colocó el sensor 1 de temperatura a 10 cm de profundidad, para considerar la transferencia de calor entre la arena superficial y los huevos de la capa superior del nido; con un sensor 3 de temperatura a un lado del nido temperatura de la arena lateral T_{a_2} , para considerar la transferencia de calor entre la arena a la profundidad del nido, más húmeda y por ende con mayor conductividad térmica, y los huevos de la capa lateral del nido; y por último, temperatura del nido T_n , a partir de un sensor 2 colocado en el centro del nido.
2. Calibrar los parámetros físicos que se requieren: la conductividad de la arena en dos profundidades, masa del nido y área de contacto entre los huevos de la capa superficial y la arena.

3. Para resolver la ecuación diferencial (Eq. 9) que representa el modelo físico, se usa el programa de Matlab *ode45.m* con el que se obtiene como solución el pronóstico de la temperatura del nido, que se compara con los datos medidos por medio de la diferencia promedio en valor absoluto entre ambas temperaturas.
4. Se calcularon los promedios móviles de los datos de **Ta₁**, **Ta₂** y **Tn** ya que esto permite a la ecuación diferencial obtener un pronóstico más estable.
5. Mediante un proceso iterativo se estimaron los valores de conductividad óptimos debido a la variación de la humedad de la arena. Entre los días 6 y 20 de la incubación, se exploraron los valores de cada iteración que daba el mejor pronóstico de la temperatura del nido, según el criterio de la diferencia promedio, usando: **Qm**= 0 y el intervalo de exploración para cada conductividad entre: [0.5, 5.0] con incrementos de 0.25.
6. Una vez encontradas las conductividades **Ka** y **Kb** óptimas, se realiza la optimización del calor metabólico **Qm**, explorando valores en el intervalo [0,1.5] con incrementos de 0.1 y escogiendo aquel para el cual la diferencia promedio de las temperaturas es mínima.

En resumen, se esquematizan ambos procesos en diagramas de flujo que representan las secuencias de los cálculos (Fig. 9).

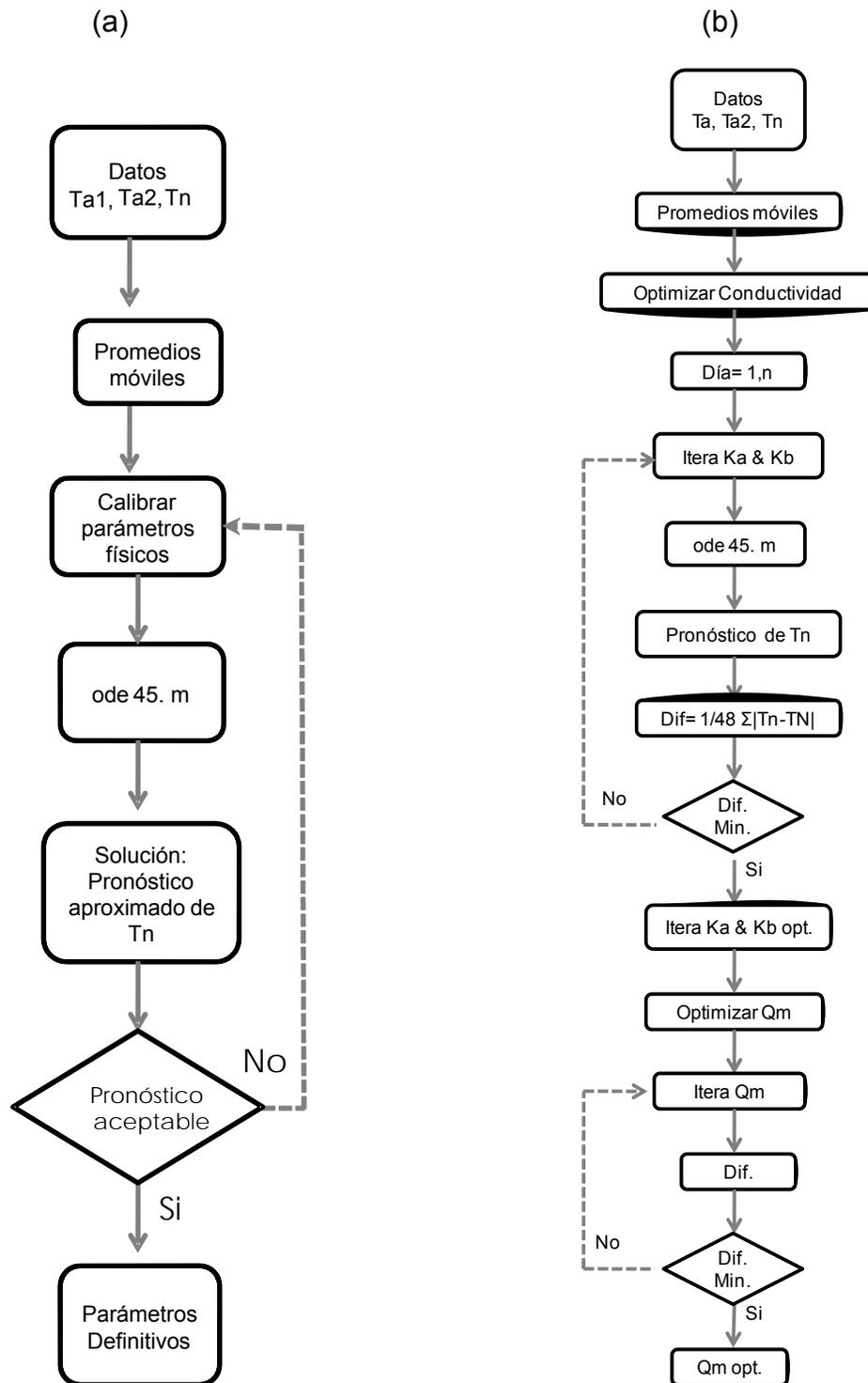


Figura 9 - Proceso de la Solución de la Ecuación diferencial y proceso de optimización del cálculo de las conductividades de la arena y del calor metabólico: (a) Calibración de parámetros físicos; (b) Optimización de Ka & Kb, en ausencia del calor metabólico, durante los primeros días de incubación y con los valores óptimos de Ka & Kb optimización de Qm.

9. RESULTADOS

9.1 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS NIDOS

En dos nidos de la temporada correspondiente al año 2004, se colocaron sensores de temperatura a una profundidad de 30 cm en nidos de tortuga *Lepidochelys olivacea*, entre un nido trasladado a corrales protegidos y nidos *in situ* donde la tortuga desovó. Cabe señalar que la especie se encuentra en peligro de extinción y uno de los objetivos de los campamentos tortugueros es la protección de la nidada para una futura liberación de crías, por lo que es necesaria la reubicación de los nidos. Por este motivo sólo se contó con dos nidos y no se pudo repetir este objetivo en la temporada 2007 (tabla 1).

La figura 10 muestra el registro de la temperatura en el primer nido medido *in situ* así como el trasladado a corrales protegidos en playa La Fortuna, incubados del 26 de julio al 06 de septiembre del 2004. Dado que durante el segundo tercio de incubación ocurre la determinación sexual, para este nido la temperatura de incubación se encontró por arriba de los 32°C, por lo que supone que el sexo de las crías fue de 100% hembras. En ese sentido, no hubo diferencias de temperatura entre el nido *in situ* y el trasladado al corral protegido, ya que las temperaturas fueron similares, pero si la temperatura del nido hubiera quedado alrededor de la línea divisoria del umbral de la temperatura feminizante (32°C), sí se hubiera notado diferencia entre los sexos producidos en estos nidos.

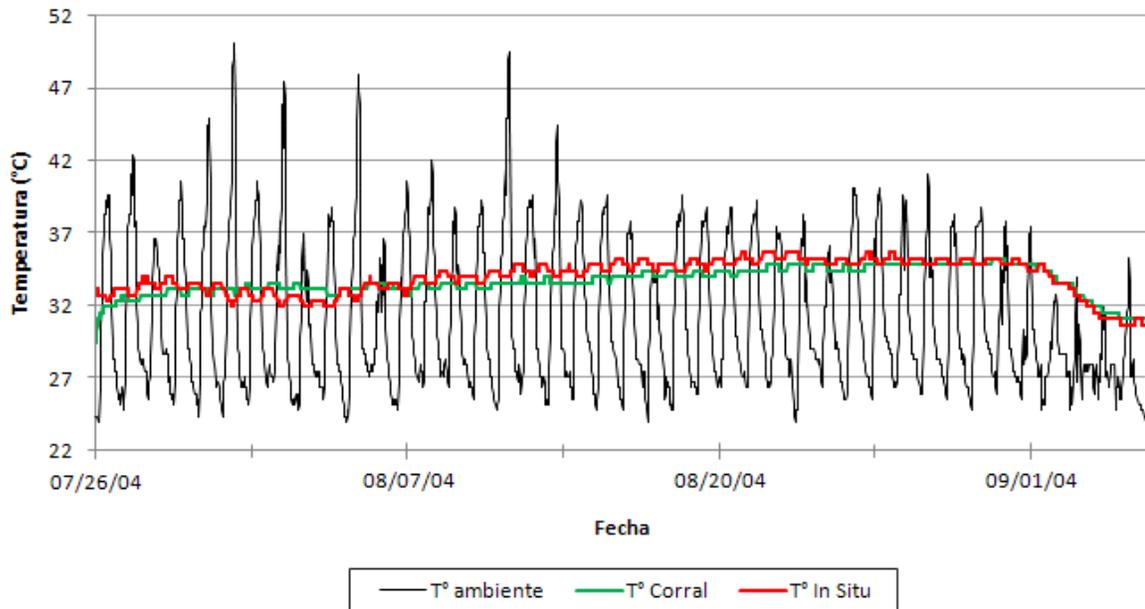


Figura 10 - Temperatura ambiente, corral e *in situ* a una profundidad de 30 cm, playa La Fortuna de San José del Cabo, 2004 (nido 1).

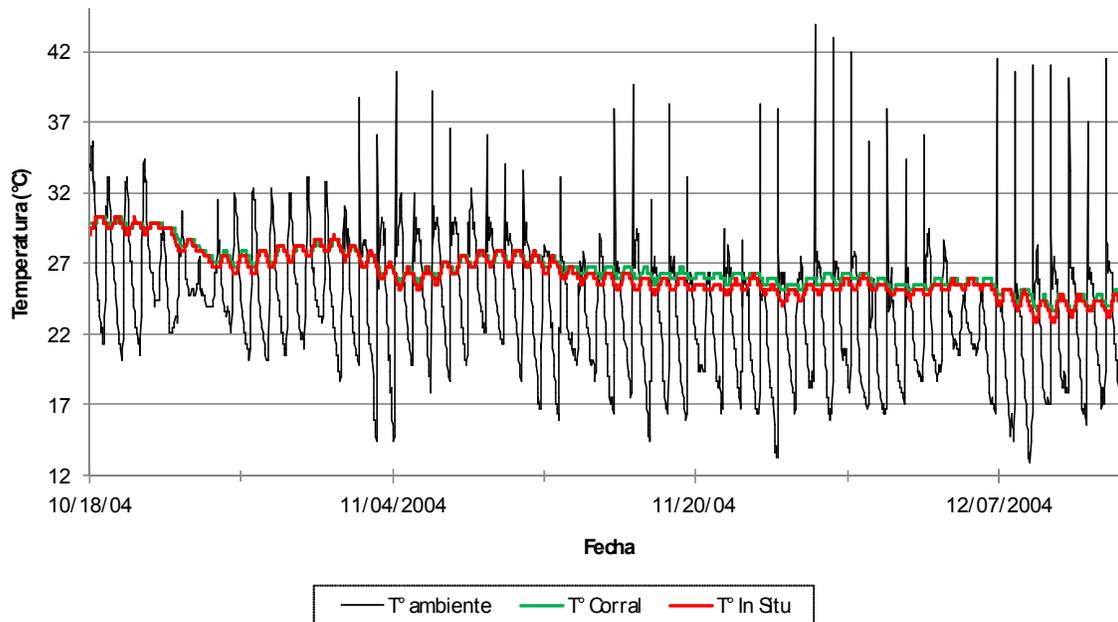


Figura 11 - Temperatura ambiente, corral e *in situ* a una profundidad de 30 cm, playa La Fortuna, San José del Cabo, 2004 (nido 2).

La figura 11 muestra el segundo nido incubado en playa La Fortuna durante otoño, con periodo de incubación del 18 de octubre al 13 de diciembre del 2004. En este caso se nota una temperatura de incubación por debajo de los 29°C por lo que el sexo de las crías debió ser 100% machos y una menor diferencia de temperatura entre el nido natural y el trasladado a corrales protegidos (tabla 3).

Tabla 3 – Temperatura media (°C) en diferentes regiones de nidos naturales o *in situ* de tortuga, *Lepidochelys olivacea* en San José del Cabo, B.C.S., México. Temporada 2004.

REGIÓN	NIDO 1 (°C)	NIDO 2 (°C)
1er tercio de incubación		
Ambiente	31.4	25.7
<i>In Situ</i>	33.0	28.4
Corral	33.1	28.3
2o tercio de incubación		
Ambiente	31.3	24.4
<i>In Situ</i>	34.0	26.8
Corral	34.7	26.6
3er tercio de incubación		
Ambiente	29.8	21.9
<i>In Situ</i>	33.9	25.5
Corral	34.0	25.0

La figura 12 muestra las variaciones de temperatura del nido 3 medido a cuatro diferentes profundidades. Se aprecia un amortiguamiento de la temperatura a los 40 cm de profundidad, ya que conforme aumenta la profundidad, menor es la variación de temperatura. En el segundo tercio de incubación, donde se da la determinación del sexo se nota una temperatura mayor de 32°C, por lo que se pronosticó un 100% hembras (tabla 4).

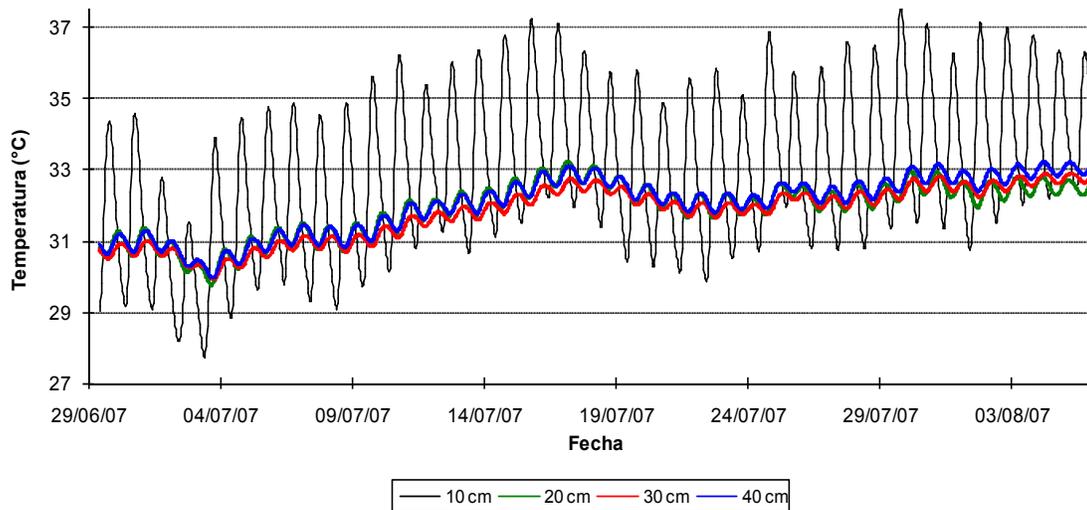


Figura 12 – Variación de temperatura en nido de tortuga *Lepidochelys olivacea* a diferentes profundidades en playa La Fortuna de San José del Cabo (nido 3).

Tabla 4 - Temperatura media (°C) en diferentes profundidades de nidos colocados en corrales protegidos de tortuga *Lepidochelys olivacea* en San José del Cabo, B.C.S., México. Temporada 2007.

REGIÓN	NIDO 3 (°C)	NIDO 4 (°C)	NIDO 5 (°C)	NIDO 6 (°C)
1er tercio de incubación				
10 cm	32.4	32.4	34.0	34.1
20 cm	31.5	31.7	33.7	31.2
30 cm	31.3	31.5	33.5	33.4
40 cm	31.6	31.4	33.7	33.7
2o tercio de incubación				
10 cm	33.5	33.5	32.5	32.4
20 cm	32.3	32.6	32.7	29.0
30 cm	32.2	32.5	32.6	32.6
40 cm	32.5	32.3	32.9	32.9
3er tercio de incubación				
10 cm	34.3	34.3	33.3	33.2
20 cm	32.4	33.3	33.7	30.0
30 cm	32.7	33.0	33.5	33.5
40 cm	33.0	32.9	33.9	33.9

Para una mayor comprensión del ambiente de incubación, en la figura 13 se muestran cinco días de la etapa de incubación para tener una visión a menor escala, con doble eje. Se observa claramente un desfase desde la temperatura más alta del primer día (10 cm) reflejada en la temperatura del nido (30 cm) algunas horas después, por lo que la gráfica sugiere que la temperatura de la arena a 10 cm de profundidad puede indicar como se encuentra la de 30 cm de profundidad en un desfaseamiento que debe calcularse con precisión.

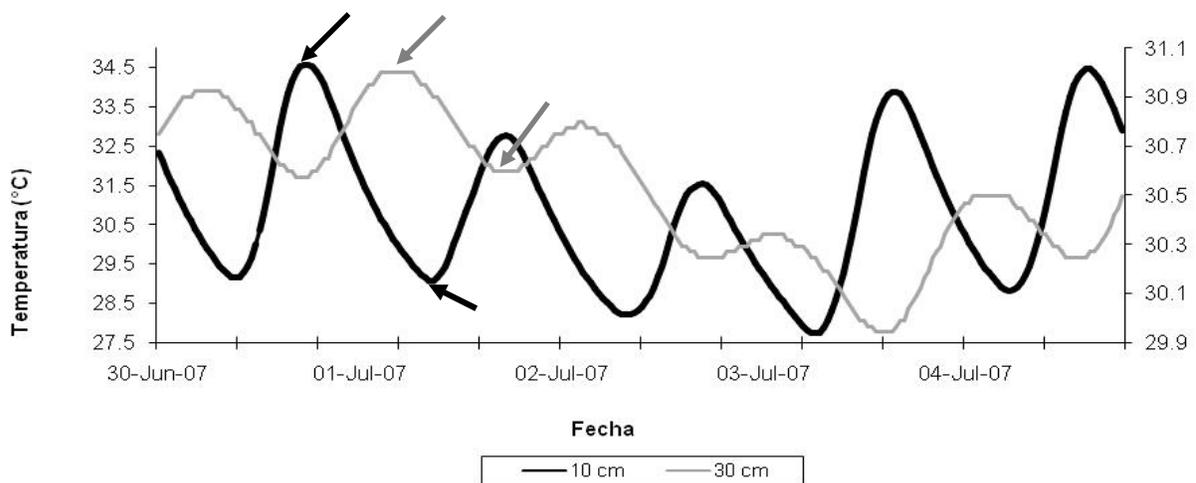


Figura 13 – Temperatura a 10 cm y 30 cm de un nido de *L. olivacea* durante 5 días del periodo de incubación (nido 3).

Una vez analizado el comportamiento de las temperaturas de incubación de cada uno de los nidos, se procedió a detectar el desfaseamiento óptimo entre la temperatura de la arena a 10 y 30 cm de profundidad, para lo cual se calcularon las correlaciones cruzadas con desfaseamientos de media hora cubriendo un total de 24 h. Este método fue aplicado a cada uno de los nidos medidos y se ejemplifica sólo del nido 3, para mayor claridad.

El resultado se muestra en un correlograma en el que se observa un desfase óptimo a las 8 h esto quiere decir que el sol genera la energía que es captada por la superficie de la arena y difundida a diferentes profundidades, por lo que el sensor

colocado a 10 cm de profundidad registra una cierta temperatura, a un tiempo dado y 8 horas después se refleja a 30 cm de profundidad (Fig. 14).

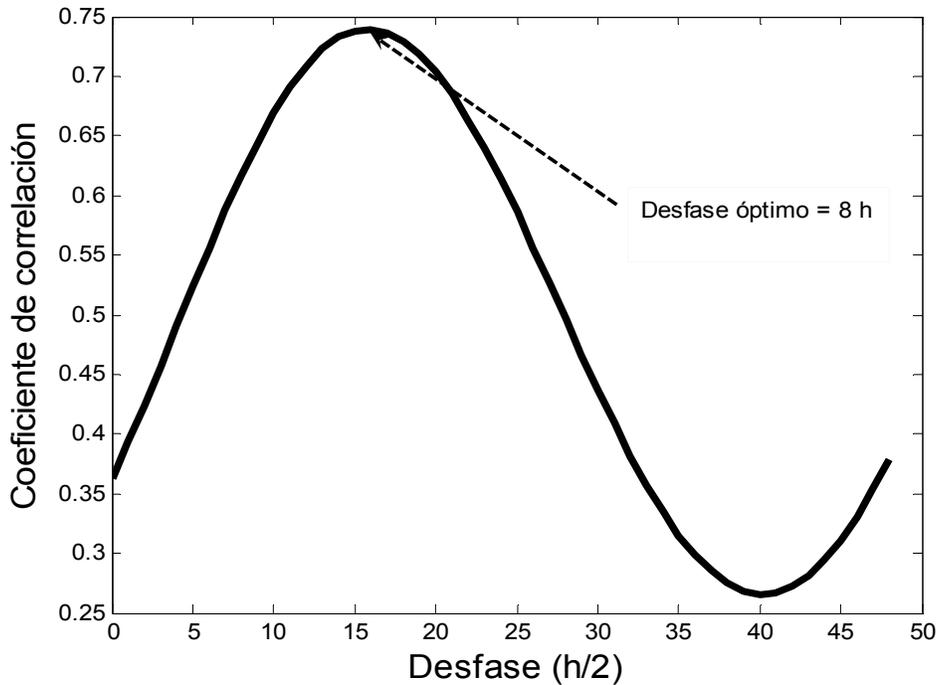


Figura 14 - Correlación cruzada, con el desfase óptimo de temperatura (datos crudos), (16h/2).

La mayoría de estas correlaciones son significativas por la cantidad de datos, pero a pesar de ello, los datos crudos de la temperatura a la profundidad de 10 cm no tienen capacidad predictiva, aún utilizando el desfase óptimo observado (Fig. 15), ya que el diagrama de dispersión de los datos en campo observados contra los calculados se separa demasiado de la recta de 45° , que representaría la coincidencia entre ellos.

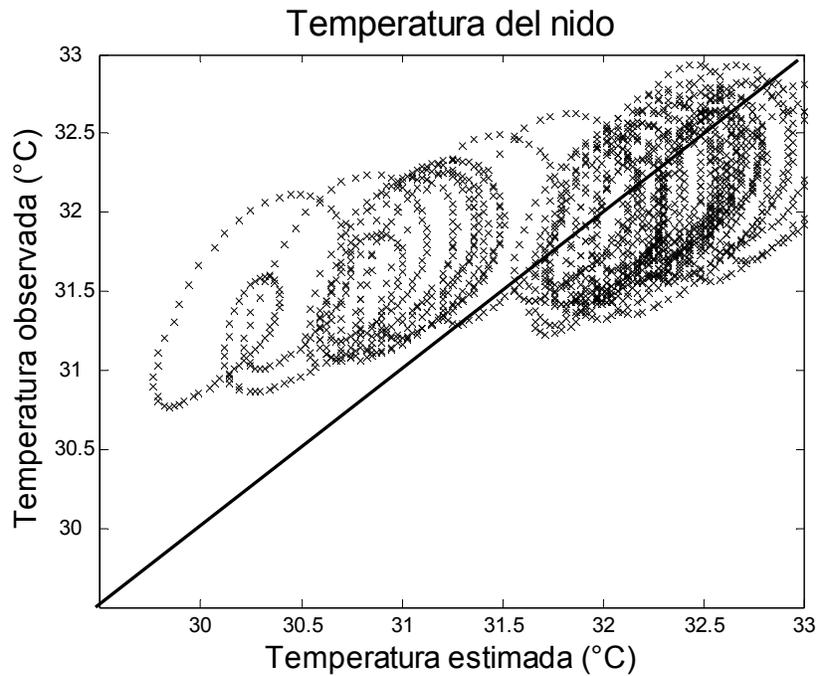


Figura 15 - Estimación de la temperatura del nido a partir de la de la ambiental con datos crudos.

Debido a que el análisis de los de los datos crudos muestra que estos no se pueden usar con fines de pronóstico, se aplicaron promedios móviles, tanto a los datos de 10 cm de profundidad como a los de 30 cm donde los huevos se encuentran (Fig. 16).

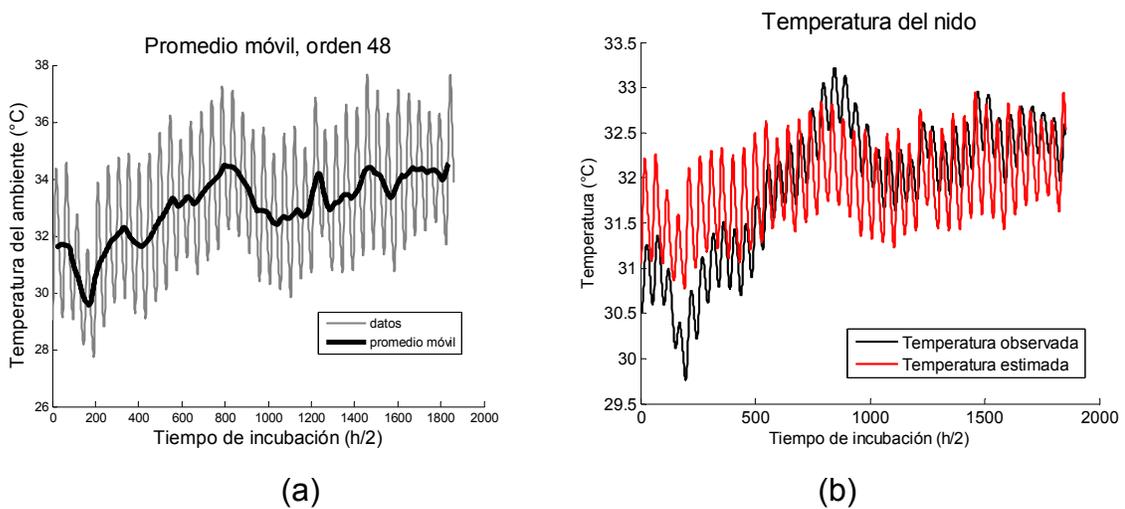


Figura 16 - (a) Promedios móviles de temperatura ambiental (b) Temperatura observada en campo y la estimada por el modelo.

La correlación cruzada de los promedios móviles muestra un desfase más amplio a partir de la señal a corto plazo de la temperatura a 10 cm de profundidad, ya que por la aplicación de los promedios móviles tardará más tiempo en reflejarse a 30 cm como se ve en la figura 16, en la que se muestran desfases de hasta de 10 días. El desfase óptimo fue de 18 h y todas las correlaciones fueron significativamente diferentes de cero (Fig. 17).

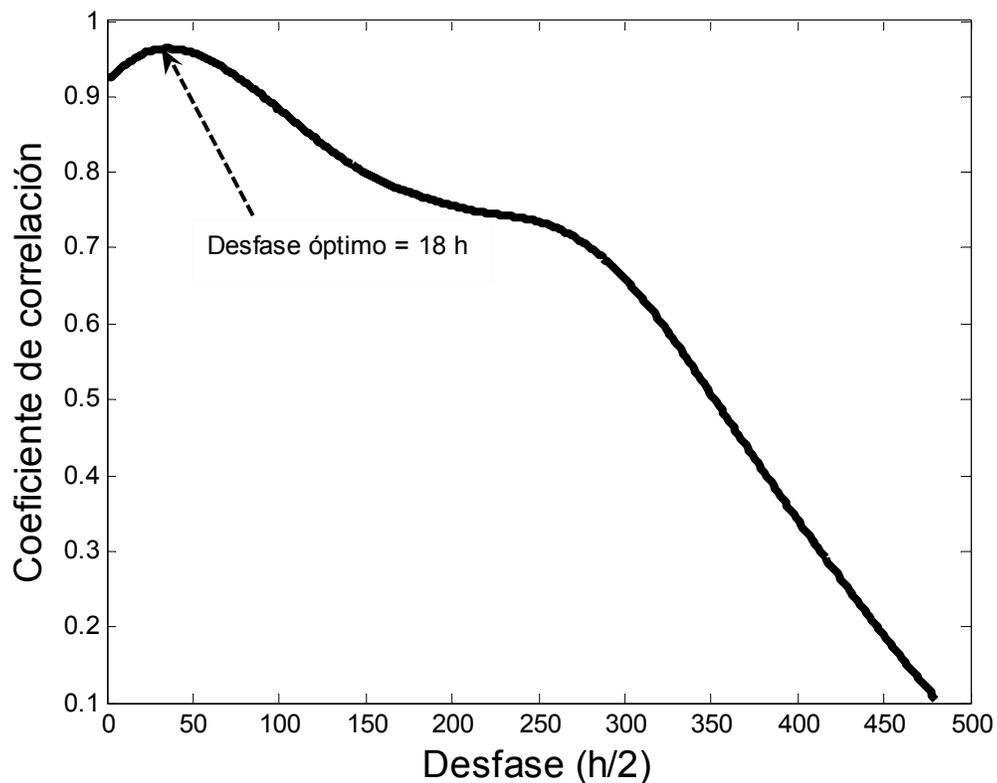
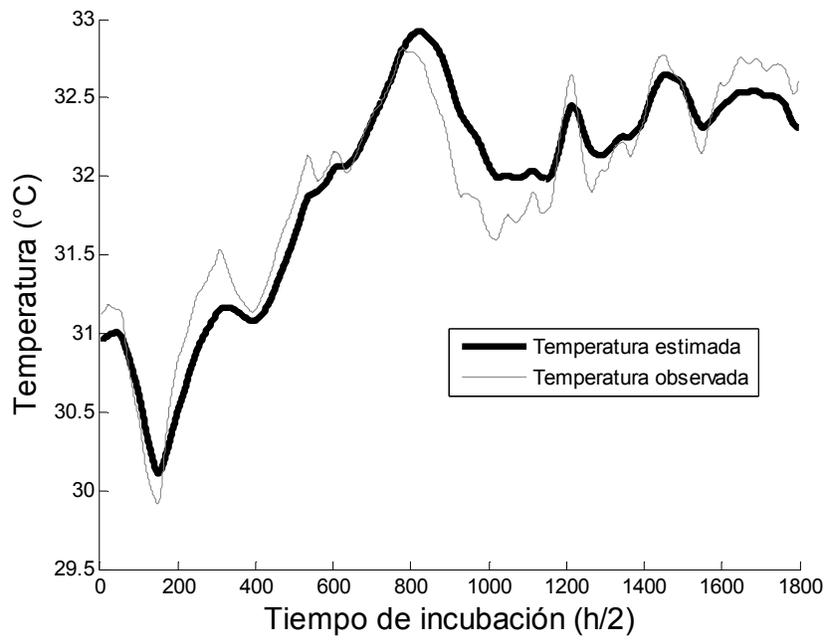
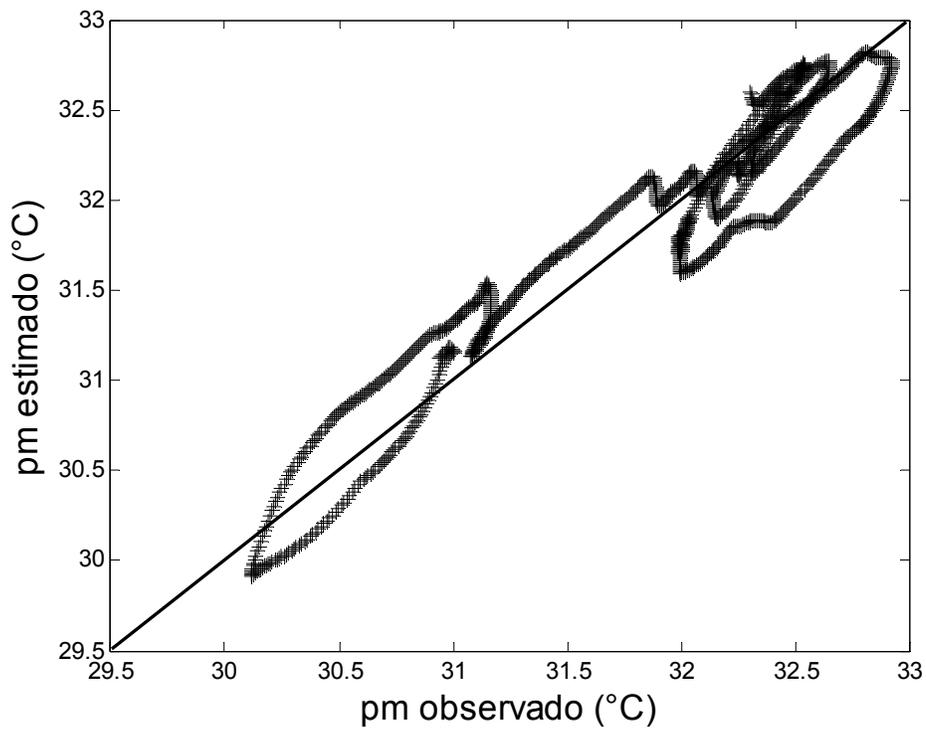


Figura 17 - Correlograma de los promedios móviles de temperatura.

Para la comprobación del pronóstico de la temperatura del nido a 30 cm a partir de la arena a 10 cm con los datos de promedios móviles (Fig. 18a), la mayoría de los datos se ajustan a la línea de 45°, de esta manera se comprueba que la capacidad predictiva es alta (Fig. 18b).



(a)



(b)

Figura 18 - (a) Temperatura del nido a partir de la ambiental con promedios móviles, (b) Comprobación del pronóstico de la temperatura, los datos se ajustan a la recta de 45°.

El desfaseamiento entre los promedios móviles de la temperatura a 10 y 30 cm de profundidad, indica que una tendencia sostenida en la temperatura a 10 cm se ve reflejada 18 h después en la tendencia de la temperatura a 30 cm, lo cual no tiene una interpretación física directa, contrario a los desfaseamientos encontrados entre los datos crudos, que indican un retardo en el calentamiento registrado a 10 cm con el observado en el nido a 30 cm a partir de la energía solar.

DESFASES ÓPTIMOS

El análisis de los 6 nidos muestra los desfases óptimos entre el nido *in situ* o trasladado a corrales protegidos, en general se observa que existe un mejor pronóstico del promedio móvil de la temperatura del nido a partir del promedio móvil de la temperatura registrada por el sensor colocado a 10 cm (tabla 5).

Tabla 5 - Resultados de los seis nidos de *L. olivacea* analizados

Datos Crudos			Datos con promedios móviles					
NIDO 1	DESFASE ÓPTIMO (h)	p	a	b	DESFASE ÓPTIMO (h)	p	# Datos	Mes año
Corral in situ	15	0.4309	33.75	-0,0003	28	<0.001	1948	Jul-04
	11,5	<0.001	33,42	0.01	18,5	<0.001	1948	
NIDO 2								
Corral in situ	11,5	<0.001	23,77	0.12	45	<0.001	2685	Oct-04
	10,5	<0.001	22,92	0.14	42	<0.001	2685	
NIDO 3								
20 cm	8	<0.001	24.72	0.22	18	<0.001	1814	Jun-07
30 cm	10	<0.001	25.44	0.19	24.5	<0.001	1814	
40 cm	10.5	<0.001	22.92	0.14	42	<0.001	1814	
NIDO 4								
20 cm	6.5	<0.001	22.85	0.28	16.5	<0.001	1814	Jun-07
30 cm	9.5	<0.001	24.67	0.22	22.5	<0.001	1814	
40 cm	10.5	<0.001	25.41	0.20	26.5	<0.001	1814	
NIDO 5								
20 cm	5	<0.001	12.59	0.62	8	<0.001	1960	Ago-07
30 cm	8.5	<0.001	17.19	0.48	13.5	<0.001	1960	
40 cm	7	<0.001	15.57	0.54	11	<0.001	1960	
NIDO 6								
20 cm	8	<0.001	12.98	0.51	12.5	<0.001	1960	Ago-07
30 cm	10.5	<0.001	20.98	0.37	16	<0.001	1960	
40 cm	9	<0.001	19.77	0.41	13.5	<0.001	1960	

En general se observa que existe un mejor pronóstico del promedio móvil de la temperatura del nido a partir del promedio móvil de los datos registrados por el sensor colocado a 10 cm. Para el pronóstico de la temperatura se usa la recta de regresión correspondiente (Ec. 12) con el desfase óptimo previamente encontrado:

$$y(t) = a + b \cdot x(t - \delta) \quad (12)$$

donde:

y= Promedio móvil pronosticado de la temperatura del nido

a= Término independiente (ordenada al origen)

b= Pendiente

x= Promedio móvil de la temperatura en superficie o a 10 cm de profundidad

δ= Desfase óptimo encontrado

9.2 CALOR ESPECÍFICO

Los resultados del calor específico obtenido a partir de la Ecuación de Siebel muestran que al inicio de la incubación el huevo es muy acuoso (clara) lo que indica que presenta gran cantidad de proteínas, y la cantidad de vitelo (yema) es mínimo, por lo que el resultado de calor específico debería ser muy parecido al del agua. Conforme se va desarrollando el embrión, el medio acuoso baja y la grasa se convierte en tejido por lo que el calor específico disminuye (tabla 6).

Tabla 6 - Calor específico de los huevos de tortuga en cada semana de incubación.

Tiempo de Incubación	Cp (cal / g °C)
Semana 1	0.92
Semana 2	0.91
Semana 3	0.90
Semana 4	0.88
Semana 5	0.88

9.3 MODELOS FÍSICOS

Bajo las condiciones establecidas en la sección 8.4 de la metodología, se encuentra la solución (Ec. 8, p26) de la ecuación de difusión de calor (Ec. 4), en la que el coeficiente del senoide es su amplitud, el cual muestra cómo se amortigua la temperatura de la arena conforme aumenta la profundidad de manera exponencial negativa (Fig. 19a). El desfase es rectilíneo, esto quiere decir que a mayor profundidad aumenta su valor proporcionalmente (Fig. 19b). Las temperaturas máximas y mínimas de la arena tienden a su media (Fig. 20).

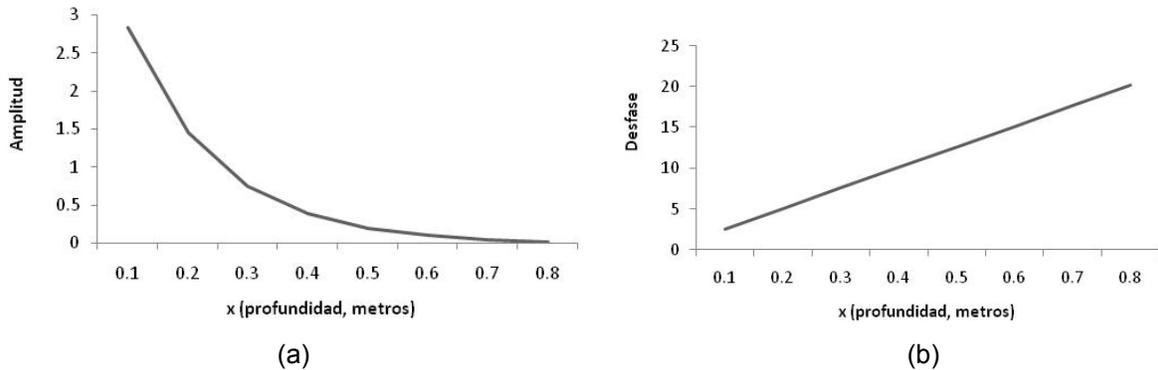


Figura 19 - Comportamiento de la amplitud y desfase a diferentes profundidades de un nido de tortuga, *Lepidochelys olivacea*.

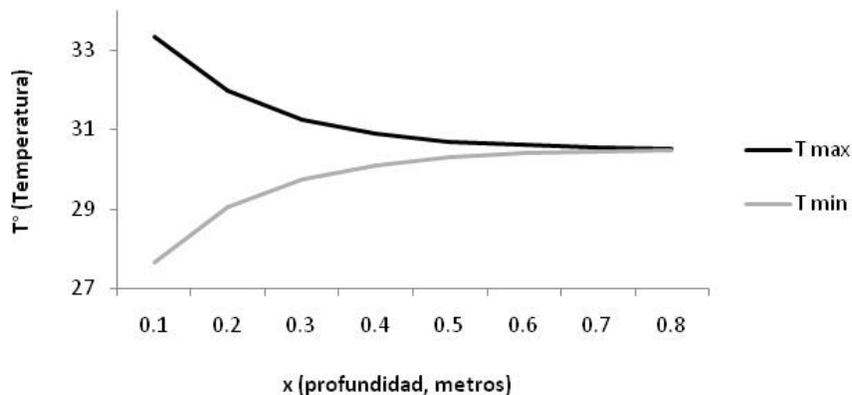


Figura 20 - Temperatura máxima y mínima de un día a diferentes profundidades.

Este modelo fue aplicado a datos reales, tomados de sensores colocados en campo (Fig. 21).

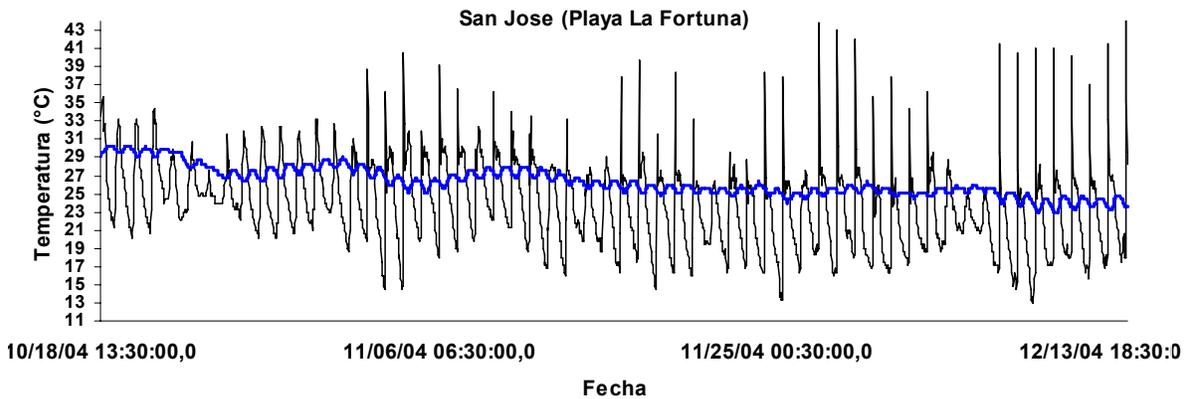


Figura 21 - Temperatura de incubación de un nido *in situ* de tortuga, *Lepidochelys olivacea* (línea azul), temperatura ambiental (línea negra) (nido 2).

Para la utilización del método, lo único que se requirió fue la temperatura máxima y mínima del día (Fig. 22).

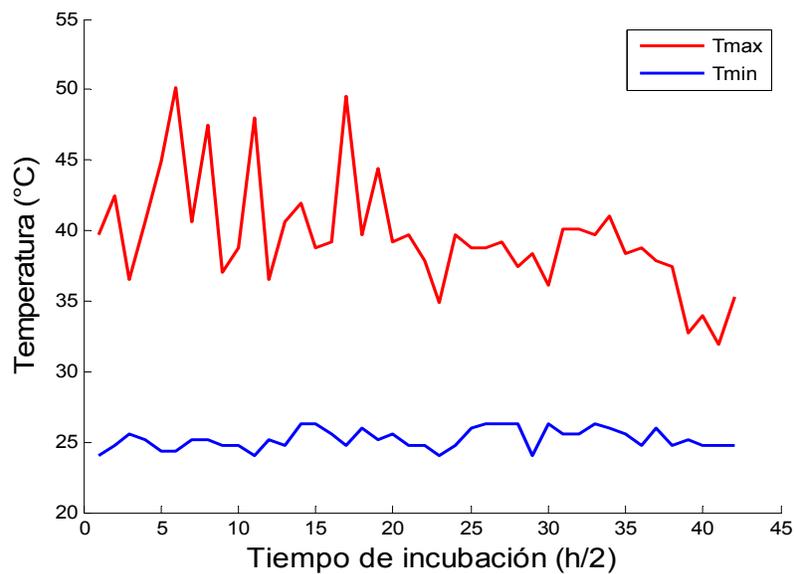


Figura 22 - Temperaturas máximas y mínimas diarias durante todo el periodo de incubación de *Lepidochelys olivacea*.

La figura 23 muestra las temperaturas simuladas a partir del modelo a 0, 30 y 70 cm, por lo que se observa que la variación de las curvas es discontinua debido a que cada día se actualizan el máximo y mínimo de la temperatura ambiente que alimentan al modelo.

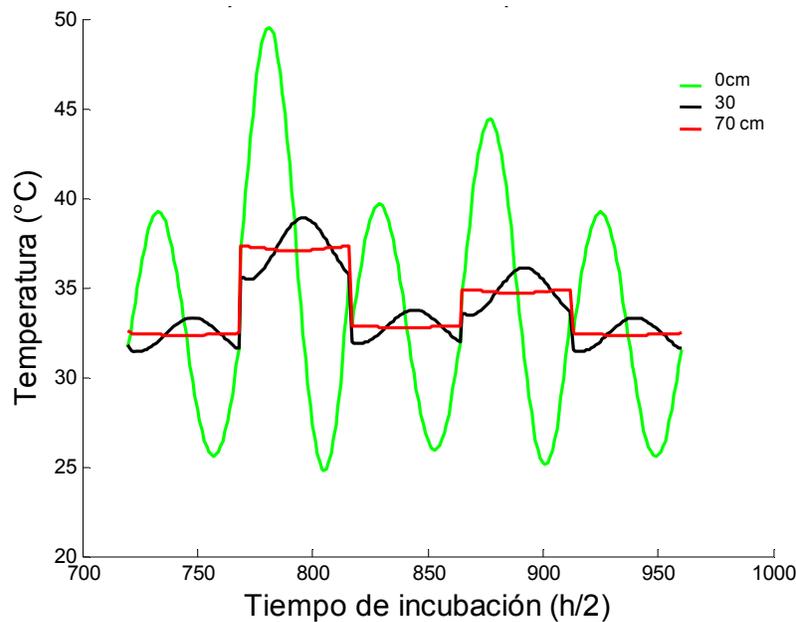


Figura 23 - Estimación de la temperatura del nido de *Lepidochelys olivacea* a partir del modelo físico de difusión de onda de calor.

En la temperatura estimada con el modelo en toda la etapa de incubación comparada con la de datos tomados en campo, se puede ver que no existe un buen pronóstico (Fig. 24), debido a que el senoide no contiene ningún elemento para considerar la inercia térmica de la arena al irse calentando gradualmente cada día y la generación interna de calor por desarrollo de los embriones.

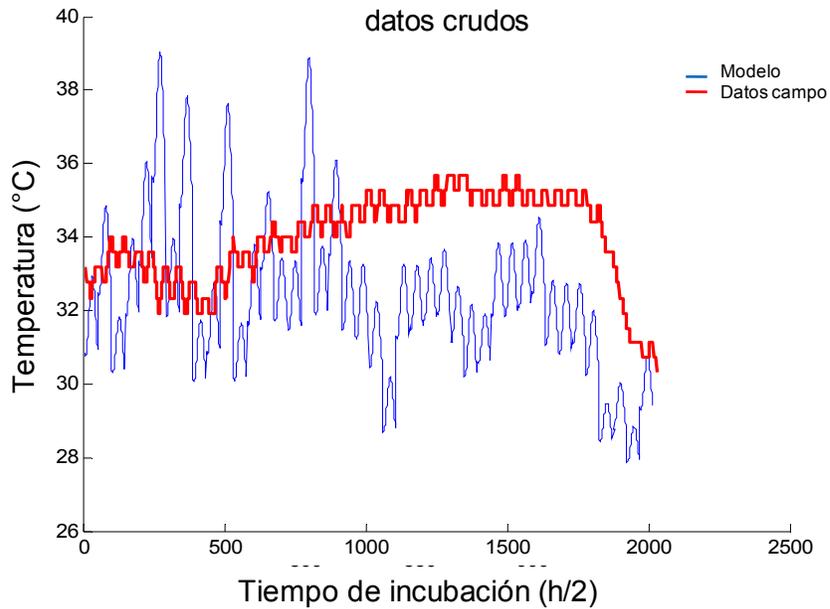
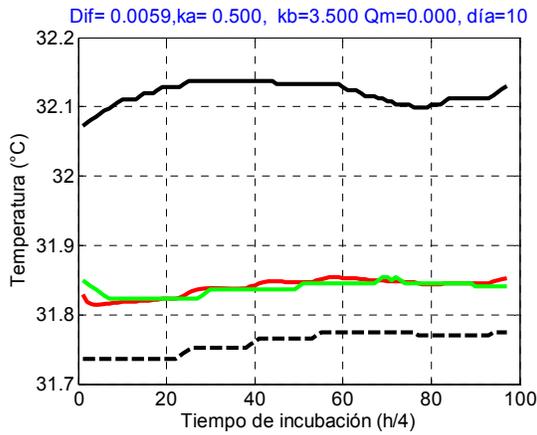


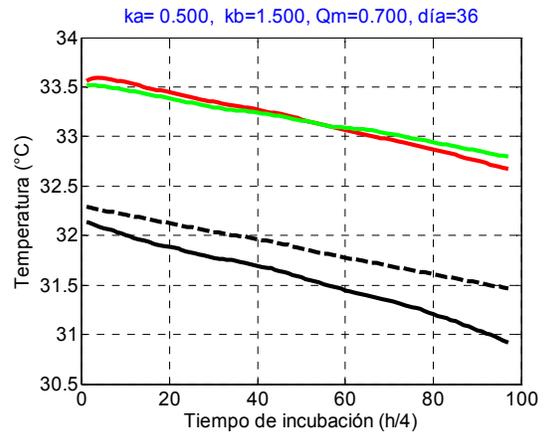
Figura 24 - Comprobación de la temperatura medida con datos experimentales y la estimada por el modelo.

9.4 CALOR METABÓLICO

Una vez calibrados los parámetros físicos, con los valores óptimos de K_a y K_b , se optimizó a su vez el calor metabólico mediante la solución numérica de la ecuación diferencial 9, durante todo el periodo de incubación de un nido de *L. olivacea*. A manera de ejemplo se muestran las soluciones de la ecuación para dos días del periodo de incubación, donde se observan los datos de temperatura del nido medidos experimentalmente (línea verde), los valores obtenidos por el modelo (línea roja), la temperatura de la arena a 10 cm de profundidad (línea negra) y la temperatura de la arena lateral a 20 cm (línea negra punteada) (Fig. 25). Las soluciones de la ecuación para todo el periodo de incubación se muestran en el Apéndice, desde el día seis hasta el día 39.



(a)



(b)

Figura 25 – Cálculo de calor metabólico (a) Día 10 del periodo de incubación en ausencia de calor metabólico (b) Día 36 con 0.7 W de calor metabólico.

Durante el periodo de incubación de un nido de *Lepidochelys olivacea* se observa que antes del día 20, no existe calor metabólico y después de ese día se incrementa hasta llegar a un máximo de 0.8 W en la última semana de incubación (Fig. 26). Al final se nota un descenso abrupto del calor metabólico debido a que llovió el día 38.

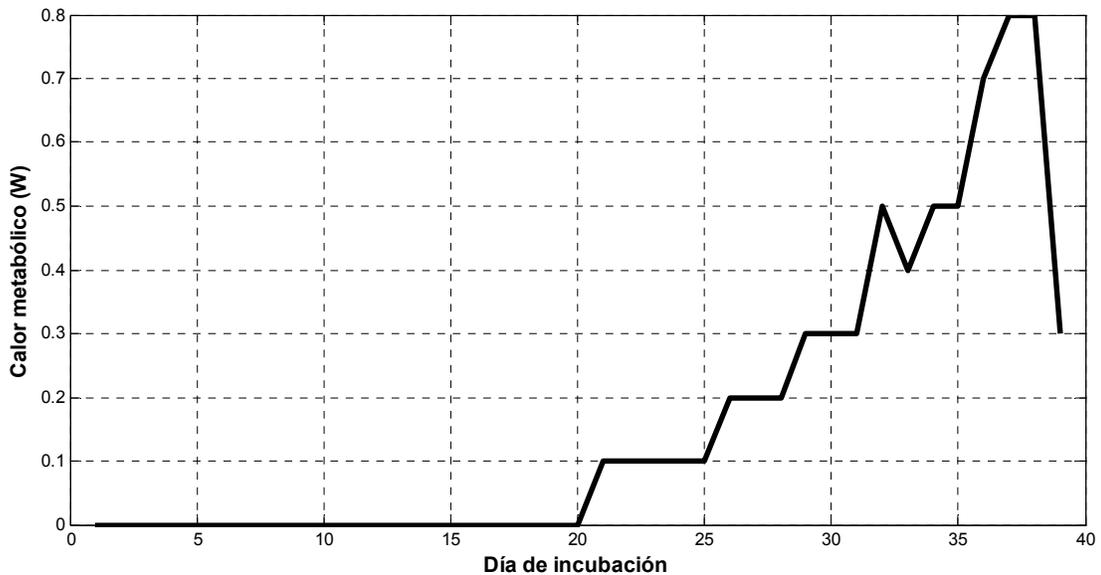


Figura 26 - Calor metabólico producido por los embriones de tortuga marina, *Lepidochelys olivacea* en función del tiempo de incubación.

10. DISCUSIÓN

De acuerdo a la temperatura de los dos primeros nidos, medida a 30 cm de profundidad en ambos nidos (natural y de corrales de incubación), presentaron un promedio de 34.43°C para el nido uno, y de 26.76°C para el nido dos. Según McCoy *et al.* (1983), quienes determinaron que los huevos de *L. olivacea* incubados a temperaturas de 28°C producen 100% de machos, y los incubados a 32°C producen 100% de hembras, por lo que se infiere que en el nido uno la proporción sexual fue de hembras, y el nido dos de machos.

A la fecha, no se han diseñado ni realizado estudios a largo plazo que demuestren como afecta a la supervivencia de la especie la proporción sexual de las crías, modificada por la manipulación de los nidos. En tanto no surja más información y a la luz de algunas consecuencias negativas que se derivarían de la manipulación se asume el principio de que el curso de acción más seguro es mantener la proporción natural de sexos (Lovich, 1996; Girondot *et al.*, 1998).

De acuerdo a los dos nidos analizados se puede decir que el traslado de la nidada hacia corrales de incubación provocó una variación de la temperatura aunque no afectó el sexo, por lo que la comprobación de esta hipótesis será hasta que se hayan medido muchos más nidos y en varios campamentos tortugueros.

En los nidos tres y cuatro se presentó una temperatura similar durante el segundo tercio de incubación, donde se determina el sexo de la nidada. El valor registrado para el nido tres fue de 32.28°C y para el cuatro de 32.50°C. Por lo que en ambos se supone que se produjeron hembras.

El conocimiento de la proporción sexual natural en las poblaciones anidadoras de tortugas marinas es un componente importante de cualquier plan de manejo y proporciona un punto de comparación para evaluar los efectos de las técnicas de

conservación y la reubicación de las nidadas a otra área de playa o a un vivero, que podrían tener un régimen térmico diferente (Mortimer, 1990).

De los seis nidos medidos en este estudio, cinco muestran que la proporción sexual tuvo un sesgo hacia hembras de acuerdo con Mrosovsky y Provancha (1992) y Marcovaldi *et al.* (1997), quienes estimaron la proporción sexual de la tortuga (*Caretta caretta*) en poblaciones separadas (EE.UU. y Brasil), basados en datos a partir de cinco o más temporadas consecutivas de anidación, los autores sugieren que las estimaciones de sexo en ambas áreas fueron hembras. Godfrey *et al.* (1999) estimaron la razón de sexo en crías de tortuga (*Eretmochelys imbricata*) producidos en Brasil entre los años 1991 hasta 1997 y resultó mayor del 90% en hembras.

Godley, *et al.* (2001b) estimaron la razón de sexo en tortugas (*Caretta caretta*) en Chipre, durante seis temporadas de anidación (1993 a 1998) y encontraron que del 89 al 99% de crías fueron hembras. En otro estudio del mismo autor (Godley, 2002) pero en Isla Ascensión, al sur del Atlántico, con tortuga *Chelonia mydas* el perfil estacional del sexo de las crías producidas en todas las playas mostró un sesgo de hembras en una proporción 3:1.

La masa de huevos medidos en el experimento para obtener el calor específico fue de 26.67 g para la semana uno de incubación, de 32.02 g para la semana dos, 32.58 g para las tres, 30.32 g para las cuatro y de 31.11 g para la cinco. Se puede notar que conforme aumenta el periodo de incubación también aumenta la masa de los huevos. El porcentaje de materia seca de los huevos en la semana uno se encontró de 9.31%, para la dos de 11.06%, en la tres de 11.49%, en la cuatro de 14.15% y en la semana cinco de 14.81%. En este caso a mayor número de días de incubación el porcentaje de materia seca del huevo aumentó.

El porcentaje de agua entre la semana uno y cinco de los huevos fue de 90.68, 88.93, 88.50, 85.84 y de 85.18% por lo que conforme aumenta la incubación el porcentaje de agua disminuye. Para el caso del calor específico conforme aumenta el tiempo de incubación el calor específico disminuye.

Otros autores han encontrado que en la tortuga, *Lepidochelys olivacea* que la masa húmeda del huevo es de 35.5 g y la masa húmeda de las crías es de 17 g (Van Buskirk & Crowder, 1994). Para las demás tortugas marinas la masa húmeda de los huevos varió desde 26.2 g para la tortuga, *Eretmochelys imbricata* (Hewavisenthi & Parmenter, 2002) hasta 80.9 g para *Dermochelys coriacea* (Wallace *et al.*, 2006).

La masa húmeda de las crías va de 14.8 g para la tortuga *E. imbricata* hasta 44.4 g para *D. coriacea* (Simkiss, 1962). Para la tortuga *Caretta caretta* los porcentajes de masa en yema, albúmina y cascarón fueron de 49.2, 45.5 y 4.8 respectivamente. Para *D. coriacea* los porcentajes son muy similares.

En huevos de tortuga marina la yema provee energía para facilitar la embriogénesis, mientras que la albúmina contribuye con agua y proteínas con agentes antimicrobianos, en almacenamiento de agua y en las propiedades nutritivas del desarrollo de los embriones (Palmer & Guillette, 1991). En general, el tamaño del neonato se incrementa con el tamaño del huevo y el aumento del tamaño de los huevos es generalmente correlacionado con el tamaño de la yema (Finkler & Claussen, 1997). Los huevos de tortuga contienen aproximadamente iguales proporciones de yema y albumina (Hewavisenthi & Parmenter, 2002). La yema de los huevos de las tortugas marinas contiene una mayor proporción de lípidos que hacen que las crías retengan más el residuo de la yema (Hewavisenthi & Parmenter, 2002).

Entre los reptiles ovíparos, el tamaño de la cría está correlacionado con el tamaño del huevo (Van Buskirk & Crowder, 1994; Hewavisenthi & Parmenter, 2002). La proporción de la masa húmeda de las crías respecto a los huevos es: en tortugas marinas de alrededor del 50%, cocodrilos 65%, lagartos 98%, serpientes del 76% (Ar *et al.*, 2004) y en aves del 74% (Ar *et al.*, 1987).

Los huevos de tortugas marinas reflejan rasgos únicos derivados de los patrones de localización maternal de recursos, comparados con los rasgos de los huevos de otros

amniotas ovíparos. Entonces las características bióticas de las tortugas marinas, así como las condiciones abióticas y el entorno de los huevos afectan el desarrollo de los embriones (Ackerman, 1997; Wallace *et al.*, 2004).

Los huevos de tortuga marina enterrados en la playa entre 30 y 100 cm, absorben el agua alrededor del nido (como huevos ectohídricos) y se inicia su desarrollo (Miller, 1997) porque el potencial hídrico de la arena de la playa es más alto que el potencial de agua dentro de un huevo ya que las cáscaras de los huevos de tortuga son flexibles y muy permeables al intercambio gaseoso (Ackerman, 1997).

Los fenómenos térmicos de la naturaleza pueden ser descritos por modelos matemáticos, físicos o estadísticos, que permitan el pronóstico de la temperatura a partir de datos simples observados. Para el desarrollo del modelo teórico de la difusión de la onda de calor a través de la arena a diferentes profundidades se utilizó un modelo de ecuaciones diferenciales parciales, porque contiene una función desconocida de dos o más variables (Cervantes, 2004), que es la temperatura del nido respecto al tiempo y la profundidad.

La ecuación 2 propuesta, se refiere al flujo de calor periódico en una dimensión, ya que ésta permite obtener soluciones más completas y por otra parte, ofrecer la posibilidad de formular un problema determinado en términos más sencillos. La ecuación es lineal y homogénea, por lo que se puede hacer equivalente a la suma de los planteamientos de un conjunto de problemas más simples (Ingersoll & Zobel, 1966).

Debido a lo anterior y a las suposiciones para encontrar la solución de la ecuación diferencial, los resultados obtenidos no coincidieron con las temperaturas medidas experimentalmente, pero si fue de gran utilidad para comprender el desfase y amortiguamiento del flujo de calor.

En cuanto a los antecedentes del estudio del calor metabólico en nidos de tortuga marina *Chelonia mydas*, en los años 1998-1999 se estudió este proceso en Isla

Ascensión, Australia, donde midieron temperatura en 23 nidos, encontrando que debido al calor metabólico los nidos incrementaron su temperatura de 0.07 a 2.61°C, y debido a esto hubo un incremento del 30% de hembras (Broderick *et al.*, 2000).

Otros autores trabajaron en el 2006 con la tortuga marina *Caretta caretta* en playas del Mediterráneo, y encontraron un incremento promedio de temperatura en el último tercio de la incubación de 1.6°C en 20 nidos (Zbinden *et al.*, 2006).

También se estudió este proceso con nidos *in situ* de tortuga marina *Dermochelys coriacea* en Surinam durante 1993-1994, los resultados mostraron un aumento de temperatura en los huevos del centro del nido de 0.86°C y de 0.78°C en la parte lateral (Godfrey *et al.*, 1997).

En las investigaciones descritas anteriormente, los autores confunden la temperatura con el calor metabólico y en ninguna de ellas se considera que el calor es una forma de energía que fluye entre un sistema y su entorno, debido a que hay una diferencia de temperatura entre ellos. Por lo tanto en ninguna de ellas se calcula el calor metabólico como tal, sólo se miden los incrementos de temperatura que ocasiona.

Los únicos autores que se encontraron en la literatura que sí midieron el calor metabólico, son Romijn y Lokhost (1960), pero para diferentes razas de pollos.

11. CONCLUSIONES

- En este trabajo se encontró de manera empírica que los promedios móviles de la temperatura en superficie de la arena del nido pronostican adecuadamente los promedios móviles de la temperatura del nido a diferentes profundidades.
- Se demostró que no hay un buen pronóstico de temperatura a partir de los datos crudos (datos tomados con los sensores).
- El modelo teórico es útil desde el punto de análisis, ya que predice fácilmente el amortiguamiento y el desfase de la temperatura de la arena a partir de su temperatura superficial, aunque la ecuación del senoide no es adecuada para el pronóstico.
- El cálculo del calor específico de huevos de tortuga *L. olivacea* en diferentes etapas de desarrollo embrionario mostró que al inicio del periodo de incubación es parecido al calor específico del agua, pero conforme aumenta el tiempo de incubación, éste disminuye.
- Es posible calcular el calor metabólico a partir de modelos físicos encontrándose que éste se manifiesta a partir del día 20 de la incubación, incrementándose hasta un valor de 0.8 W.
- Tanto las estimaciones del calor específico como del metabólico son resultados inéditos.

12. RECOMENDACIONES

- Para el caso del objetivo de difusión de calor, se sugiere aplicarle un segundo senoide, ya que de esta forma se podría encontrar una mejor relación con los resultados de los datos medidos experimentalmente.
- Para la medición del calor específico se podría hacer una vez más el experimento pero ocupando un calorímetro, para tener datos más confiables.
- En el objetivo del pronóstico de temperatura, se necesitaría medir la humedad de la arena para ver, si es la causante de cambios en el desfase en la temperatura de un mismo nido.

13. LITERATURA CITADA

- Ackerman, R.A. 1997. The nest environment and the embryonic development of sea turtles. *En: Lutz, P.L. & J.A. Musick (Ed.) The Biology of Sea Turtles*. CRC Press, 83-106 p.
- Ackerman, R.A. 1994. Temperature time and reptile egg water exchange. *Journal of Zoology*, 40:293-306.
- Andrews, H.V., S. Krishnan & P. Biswas. 2001. *The status and distribution of marine turtles around the Andaman and Nicobar Archipelago*. National Sea turtle Project, India, 29 p.
- Ar, A., B. Arieli., A. Belinsky & Y. Yom-Tov. 1987. Energy in avian eggs and hatchlings: utilization and transfer. *Journal Experimental Zoology, Supplement*, 1:151-164.
- Ar, A., A. Belinsky, R. Dmiel, R.A. Ackerman. 2004. Energy provision and utilization. *En: Deeming, D.C. (Ed.) Reptilian Incubation: Environment, Evolution, and Behaviour*. Nottingham University Press, UK, 143-185 p.
- Asrar, F.F. 1999. Decline of marine turtle nesting populations in Pakistan. *Marine Turtle Newsletter*, 83:13-14.
- Baillie, J. & B. Groombridge. 1996. *Lepidochelys olivacea*. *En: IUCN 2007. IUCN Red List of Threatened Species*. <www.iucnredlist.org>. Consultado el 20 Abril 2008.
- Bhupathy, S. & S. Saravanan. 2002. Status survey of sea turtles along the Tamilnadu coast. *Kachhapa*, 7:7-13.
- Bjorndal, K.A. 1995. Biology and Conservation of Sea Turtles. *Smithsonian Institution Press*. USA, 615 p.
- Booth D. & K. Astill. 2001. Temperature variation within and between nest of the green sea turtle, *Chelonia mydas* (Chelonia: Cheloniidae) on Heron Island, Great Barrier Reef. *Australian Journal of Zoology*, 49:71-84.
- Boulon, R. 2000. Reducción de las amenazas a los huevos y a las crías: protección *in situ*: 192-198 p. *En: Eckert, K. & K. Bjorndal, F. Abreu-Grobois & M. Donnelly (Ed.) Técnicas de investigación y manejo para la conservación de las tortugas marinas* (traducción en español). Grupo especialistas en tortugas marinas UICN/SCE. Publicación No 4, Estados Unidos, 278 p.

- Broderick A.C., B.J. Godley. & G.C Hays. 2001. Metabolic heating and the prediction of sea ratios for green turtles (*Chelonia mydas*). *Physiological and Biochemical Zoology*, 74(2):161-170.
- Bustard H.R. & P. Greenham. 1968. Physical and chemical factors affecting hatching success in the green sea turtle, *Chelonia mydas*. *Ecology*, 49(2):269-276.
- Carr, A. 1952. *Handbook of Turtles. The Turtles of the United States, Canada & Baja California*. Cornell Univ. Press. Nueva York. 542 p.
- Cervantes, J. 2004. *Difusión de calor*. Facultad de Ingeniería, UNAM. 120 p.
- Cliffon, K., D. Cornejo & R. Felger. 1982. Sea turtles of the Pacific coast of Mexico. *En: Bjorndal, K.A. (Ed.) Biology and Conservation of Sea Turtles*. Smithsonian Inst. Press, Washington DC, 199-209 p.
- Crews, D., J.M. Bergeron., J.J. Bull., D. Flores., A. Tousignant., J.K. Skipper. & T. Wibbels. 1994. Temperature-dependent sex determination in reptiles: proximate mechanisms, ultimate outcomes, and practical applications. *Developmental Genetics*, 15:297-312.
- Dalrymple, J.H., J.C. Hampp & D.J. Wellins. 1985. Male-biased sex ratio in a cold nest of a hawksbill sea turtle *Eretmochelys imbricata*. *Journal of Herpetology*, 19(1):158-159.
- Drake D.L. & J.R. Spotila. 2002. Thermal tolerances and the timing of sea turtle hatchling emergence. *Journal of Thermal Biology*, 27(1):71-81.
- Ehrenfeld, D. 1995. Options and limitations in the conservation of sea turtles. *En: K. Bjorndal. (Ed.) Biology and Conservation of Sea Turtles*, revised ed. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 457-463 p.
- Finkler, M.S. & D.L. Claussen. 1997. Within and among clutch variation in the composition of *Chelydra serpentina* eggs with initial egg mass. *Journal of Herpetology*, 31(4):620-624.
- Frazer, N.B. 1992. Sea-turtle conservation and halfway technology. *Conservation Biology*, 2:179-184.
- Frazier, J.G. 1975. Marine turtles of the Western Indian Ocean. *Oryx*. 13(2):164-175.
- Gallo, J. 1981. La tortuga golfina, especie en Peligro. *Comunidad Conacyt*, Octubre-Noviembre. No. 130-131. México, 192-194 p.
- Girondot, M., H. Fouillet & C. Pieau. 1998. Feminizing turtle embryos as a conservation tool. *Conservation Biology*, 12(2):353-362.

- Godfrey M.H., A. D'Amato, M. Marcovaldi & N. Mrosovsky. 1999. Pivotal temperature and predicted sex ratios for hatchling hawksbill turtles from Brazil. *Canadian Journal of Zoology*, 77:1465-1473.
- Godfrey, M.H., R. Barreto, & N. Mrosovsky. 1996. Sex ratios of sea turtles in Suriname: past and present. *En: J. Keinath, D. Barnard, J. Musik & B. Bell (Ed.) Proceeding of the Fifteenth Annual Workshop on Sea Turtle Biology and Conservation*. NOAA Technical Memorandum, 100 p.
- Godfrey, M.H., R. Barreto & N. Mrosovsky. 1997. Metabolically generated heat in sea turtles nests and its potential effect on the sex ratio of hatchlings. *Journal of Herpetology*, 31(4):616-619.
- Godley, B.J., A.C. Broderick & N. Mrosovsky. 2001. Estimating hatchling sex ratios of loggerhead turtles in Cyprus from incubation durations. *Marine Ecology Progress Series*, 210:195-201.
- Godley, B.J., A.C. Broderick., J.R. Downie., F. Glen., J.D. Houghton., I. Kirkwood., S. Reece & G.C. Hays. 2001b. Thermal conditions in nests of loggerhead turtles: further evidence suggesting female skewed sex ratios of hatchling production in the Mediterranean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 263:45-63.
- Godley, B.J., A.C. Broderick, F. Glen & G.C. Hays. 2002. Temperature-dependent sex determination of Ascension Island green turtles. *Marine Ecology Progress Series*, 226:115-124.
- H. Ayuntamiento de Los Cabos, Sala de Cabildos, Secretaría General. 2001. *Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Baja California Sur*. Enciclopedia de los Municipios de México.
- Hewavisenthi, S. & C.J. Parmenter. 2002. Egg components and utilization of yolk lipids during development of the flatback turtle *Natator depressus*. *Journal of Herpetology*, 36:43-50.
- Ingersoll, L. & O. Zobel. 1966. *An introduction to the mathematical theory of heat conduction: with engineering and geological applications*. Ginn and Company. 169 p.
- INP (Instituto Nacional de la Pesca), 1990. XXV años de investigación, conservación y protección de la tortuga marina. Instituto Nacional de Pesca, Secretaria de Pesca, México, 49 p.

- Iverson, J.B. 1991. Life history and demography of the yellow mud turtle. Patterns of survivorship in turtles (order Testudines). *Canadian Journal Zoology*, 69(2):385-391.
- Kar, C.S., S. Bhaskar. 1982. The status of sea turtles in the Eastern Indian Ocean. *En: Bjorndal, K.A. (Ed.) Biology and Conservation of Sea Turtles*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 365-372 p.
- Kaska, Y., R. Downie, R. Tippet & R. Furness. 1998. Natural temperature regimes for loggerhead and green turtle nests in the Eastern Mediterranean. *Canadian Journal Zoology*, 76(4):723-729.
- Kilma, E.F. & J.P. McVey. 1995. Headstarting the Kemp's ridley turtle, *Lepidochelys Kempi*. *En: Bjorndal, K. (Ed.) Biology and Conservation of Sea Turtles*, revised ed. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 481-487 p.
- Limpus, C.J. 1995. Global overview of the status of marine turtles: a 1995 viewpoint. *En: Bjorndal, K.A. (Ed.) Biology and Conservation of Sea Turtles: Revised Edition*. Smithsonian Institution Press, Washington DC, 605-609 p.
- Lovich, J.E. 1996. Possible demographic and ecologic consequences of sex ratio manipulation in turtles. *Chelonian Conservation and Biology*, 2(1):114-117.
- Madsen T. & R. Shine. 1999. Life history consequences of nest site variation in tropical pythons (*Liasis fuscus*). *Ecology*, 80:989-997.
- Marcovaldi M.A., M. Godfrey & N. Mrosovsky. 1997. Estimating sex ratios of loggerhead turtles in Brazil from pivotal incubation temperatures, *Canadian Journal Zoology*, 75(5):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, *FAO Fisheries Synopsis*, Roma, 11(125):81.
- Márquez, R. 1996. *Las tortugas y nuestro tiempo*. Ed. Fondo de Cultura Económica. México, 197 p.
- Márquez, R., C. Penaflores, J.C. Vasconcelos. 1996. Olive ridley turtles (*Lepidochelys olivacea*) show signs of recovery at La Escobilla, Oaxaca. *Martin Turtle Newsletter*, 73:5-7.
- McCoy, C.J., R.C. Vogh & E.J. Censky. 1983. Temperature controlled sex determination in sea turtle *Lepidochelys olivacea*. *Journal of Herpetology*, 17(4):404- 406.

- McGehee M.A. 1990. Effects of moisture on eggs and hatchlings of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). *Herpetologica*, 46(3):251-258.
- McGehee, M.A. 1979. *Factors affecting the hatching success of loggerhead sea turtle egg (Caretta caretta)* Thesis. B.S., Presbyterian College. U.S.A., 256 p.
- Merchant-Larios, H. 2000. Determinación del Sexo en Crías, Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas. *Grupo Especialista en Tortugas Marinas UICN/CSE*, 4:8-13.
- Miller, J.D. & C.J. Limpus. 1981. Incubation period and sexual differentiation in the green turtle, *Chelonia mydas* L. En: C.B. Banks & A.A. Martin (Ed.) *Proceedings of the Melbourne Herpetological Symposium*, Melbourne. The Zoological Board of Victoria, 66-73 p.
- Miller, J.D. 1997. Reproduction in sea turtles. En: P.L. Lutz, J.A. Musick (Ed.) *The Biology of Sea Turtles*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 51-82 p.
- Mittermeier, R. & C. Goettsch. 1992. La importancia de la diversidad biológica de México. En: Sarukhán, J. y R. Dirzo (comps.). *México ante los retos de la biodiversidad*. CONABIO. México. 57-62 p.
- Modi W.S. & D. Crews. 2005. Sex chromosomes and sex determination in reptiles. *Current Opinion in Genetics & Development*, 15(6):660-665.
- Mohsenin, N. 1980. *Thermal properties of foods and Agricultural materials*. New York, Gordon & Breach, 407 p.
- Montenegro B., C. Bernal & A. Martinez. 1986. Estudio del contenido estomacal de la tortuga marina *Lepidochelys olivácea*, en la costa de Oaxaca, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. Universidad Nacional Autónoma de México, 13(2):121-132.
- Morreale, S.J., G.J. Ruiz, J.R. Spotila & E.A. Standora. 1982. Temperature dependent sex determination: current practices threaten conservation of sea turtles. *Science*, 216:1245-1247.
- Mortimer J.A. 1990. The influence of beach sand characteristics on the nesting behaviour and clutch survival of green turtles (*Chelonia mydas*). *Copeia*, 1990(3):802-817.
- Mrosovsky, N. & C. Pieau. 1991. Transitional range of temperature, pivotal temperatures and thermo-sensitive stages for sex determination in reptiles. *Amphibia-Reptilia*, 12(2):169-179.

- Mrosovsky, N. & C.L. Yntema. 1980. Temperature dependence of sexual differentiation in sea turtles: implications for conservation practices. *Biological Conservation*, 18:271-280.
- Mrosovsky, N. & J. Provancha. 1992. Sex ratio of hatchling loggerhead sea turtles: data and estimates from a 5-year study. *Canadian Journal of Zoology*, 70(3):530-38.
- Mrosovsky, N. & C.L. Yntema. 1980. Temperature dependence of sexual differentiation in sea turtles: implications for conservation practices. *Biological Conservation*, 18:271-280.
- Nichols, W.J. 2003. *Biology and conservation of sea turtles in Baja California, México*. Tesis de Doctorado, University of Arizona, Tucson. 474 p.
- Packard G.C. & M.J. Packard. 1988. The physiological ecology of reptilian eggs and embryos. En: Gans C. & R.B. Huey. (Ed.) *Biology of the Reptilia*, New York. Pennsylvania, Estados Unidos, 16:(4)278 p.
- Palmer, B.D. & L.J. Guillette. 1991. Oviductal proteins and their influence on embryonic development in birds and reptiles. En: D.C. Deeming, M.J. Ferguson (Ed.) *Egg Incubation: Its Effects on Embryonic Development in Birds and Reptiles*. Cambridge University Press, Cambridge, 29-46 p.
- Pandav, B., B.C. Choudhury & K. Shanker. 1998. The Oliver Ridley sea turtle (*Lepidochelys olivacea*) in Orissa: an urgent call for an intensive and integrated conservation programme. *Current Science*, 75:1323-1328.
- Pritchard, P. 1995. Recovered sea turtle populations and U.S. recovery team efforts. En: K. Bjorndal (Ed.) *Biology and Conservation of Sea Turtles*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 503-511 p.
- Pritchard, P., P. Bacon, F. Berry, A. Carr, J. Fletmeyer, R. Gallagher, S. Hopkins, R. Lankford, R. Márquez, M.L. Ogren, W. Pringle, H. Reichart & R. Witham. 1993. *Manual sobre técnicas de investigación y conservación de las tortugas marinas*, (Ed.) Segunda edición. Center for the Environmental Education, Washington, DC, 134 p.
- Pritchard, P.C. 1979. *Encyclopedia of turtles*, T.F.H. Publications, Neptune City, N. J., 896 p.
- Raj, U. 1976. Incubation and hatching success in artificially incubated eggs of the hawksbill turtle, *Eretmochelys imbricata*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 22(1):91-99.

- Rimblot, F., J. Fretey, N. Mrosovsky, J. Lescure & C. Pieau. 1985. Sexual differentiation as function of the incubation temperature of eggs in the sea-turtle *Dermochelys coriacea* (Vandelli, 1761). *Amphibia- Reptilia*, 6(1):83-92.
- Romijn C. & W. Lokhorst. 1960. Producción de calor en el feto de ave. I. *Journal of Physiology*, 150:239-249.
- Seminoff, J.A., T.T. Jones, A. Resendiz, W.J. Nichols & M.Y. Chaloupka. 2003. Monitoring green turtles (*Chelonia mydas*) at a coastal foraging area in Baja California, Mexico: multiple indices describe population status. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 83:1355-1362.
- SEPESCA (Secretaría de Pesca). 1991. *Decreto que establece la veda total en la captura de las tortugas marinas*. Diario Oficial de la Federación, 28 de mayo, México DF.
- Shaver, D.J., D.W. Owens, A.H. Chaney, C.W. Caillouet, P. Burchfield Jr. & R. Márquez. 1988. Styrofoam box and beach temperatures in relation to incubation and sex ratios of Kemp's ridley sea turtles, 103-108. *En: B.A. Schroeder (Ed.) Proceedings of the Eighth Annual Workshop on Sea Turtle Conservation and Biology*. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFC-214. U.S. Dept. Commerce 89:48-64.
- Simkiss, K. 1962. The source of calcium for the ossification of the embryos of the giant leathery turtle. *Comp. Biochem. Physiol.*, 7:71-79.
- Spotila J.R., E.A. Standora, S.J. Morreale, & G.J. Ruiz. 1987. Temperature-dependent sex determination in the green turtle (*Chelonia mydas*): effects on the sex ratio on a natural beach. *Herpetologica*, 43:74-81.
- Spotila, J.R., R.D Reina, A.C. Steyermark, P.T. Plotkin & F.V. Paladino. 2000. Pacific leatherback face extinction. *Nature*, 405:529-530.
- Tow, S.K. & E.O. Moll. 1995. Status and conservation of estuarine and sea turtles in western Malaysian waters. *En: Bjorndal, K. (Ed.) Biology and Conservation of Sea Turtles, revised ed. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 339-345 p.*
- Valenzuela, N. & L. Lance. 2004. *Temperature-Dependent Sex Determination in Vertebrates*. Smithsonian Books; Washington DC, 194 p.
- Van Buskirk, J. & L. Crowder. 1994. Life-history variation in marine turtles. *Copeia*, 66-81 p.

- Wallace, B.P., P.R. Sotherland, J.R. Spotila, R.D. Reina, B.R. Franks & F.V. Paladino. 2004. Biotic and abiotic factors affect the nest environment of embryonic leatherback turtles, *Dermochelys coriacea*. *Physiological and Biochemical Zoology*, 77(3):423-432.
- Wallace, B.P., S.S. Kilham, F.V. Paladino & J.R. Spotila. 2006. Energy budget calculations indicate resource limitation for eastern Pacific leatherback turtles. *Marine Ecology, Progress Series*, 318:263-270.
- Witherington, B. 2000. Reducción de las amenazas al hábitat de anidación: 204-210. *En: K. Eckert; K. Bjorndal; F. Abreu-Grobois y M. Donnelly (Ed.) Técnicas de investigación y manejo para la conservación de las tortugas marinas* (traducción en español). Grupo especialistas en tortugas marinas UICN/SCE. Publicación No 4. Pennsylvania, Estados Unidos, 278 p.
- Yntema, C.L. & N. Mrosovsky. 1980. Sexual differentiation in hatchling loggerhead (*Caretta caretta*) incubated at different controlled temperatures. *Herpetologica*, 36: 33-36.
- Zbinden, J.A., D. Margaritoulis & R. Arlettaz. 2006. Metabolic heating in Mediterranean loggerhead sea turtle clutches. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 334:151-157.

Apéndice

CÁLCULO DEL CALOR METABÓLICO GENERADO A LO LARGO DEL PERIODO DE INCUBACIÓN

Las siguientes gráficas muestran el cálculo del calor metabólico óptimo con los datos de temperatura medidos experimentalmente (línea verde), los datos obtenidos por el modelo (línea roja), temperatura de la arena 10 cm (línea negra), temperatura de la arena 20 cm (línea negra discontinua).

