



Proyecciones Climáticas Regionales

Cambio Climático y Tortugas Marinas
en el Gran Caribe



Marianne Fish, Alfonso Lombana y Carlos Drews



Proyecciones Climáticas Regionales

**Cambio Climático y Tortugas
Marinas en el Gran Caribe**

**Marianne Fish, Alfonso Lombana y
Carlos Drews**

**Producido por el Departamento de Comunicaciones
WWF Centroamérica
© 2009**

Diseño Gráfico:
Jeffrey Muñoz

Producción:
Zeidy Hidalgo
Marianne Fish
Carlos Drews
Ana Fonseca

Edición:
Marianne Fish
Carlos Drews
Ana Fonseca

Traducción:
James Karkashian

Foto de Portada:
© Jürgen Freund / WWF-Canon

Citar como:
Fish, M.R. Lombana, A.y C. Drews. 2009. Cambio climático y tortugas marinas en el Gran Caribe: proyecciones climáticas regionales. Informe de WWF, San José, 20 p.

ISBN: 978-9968-825-43-6

Tabla de Contenidos

Resumen	6
Introducción	7
Objetivos	7
Cambios climáticos regionales	7
<i>Proyecciones climáticas</i>	7
<i>Escenarios</i>	8
<i>Limitaciones e incertidumbres</i>	8
Proyecciones de clima para el Caribe	9
<i>La región Caribe</i>	9
<i>Proyecciones regionales</i>	10
<i>Playas de anidación de tortugas marinas</i>	12
¿Qué significan las proyecciones climáticas futuras para las poblaciones de tortugas marinas?	13
Conclusiones y pasos siguientes: ¿Qué podemos hacer?	14
Apéndice A: Métodos	15
Apéndice B: Proyecciones climáticas por país	15
Referencias	17

Proyecciones Climáticas Regionales

Resumen

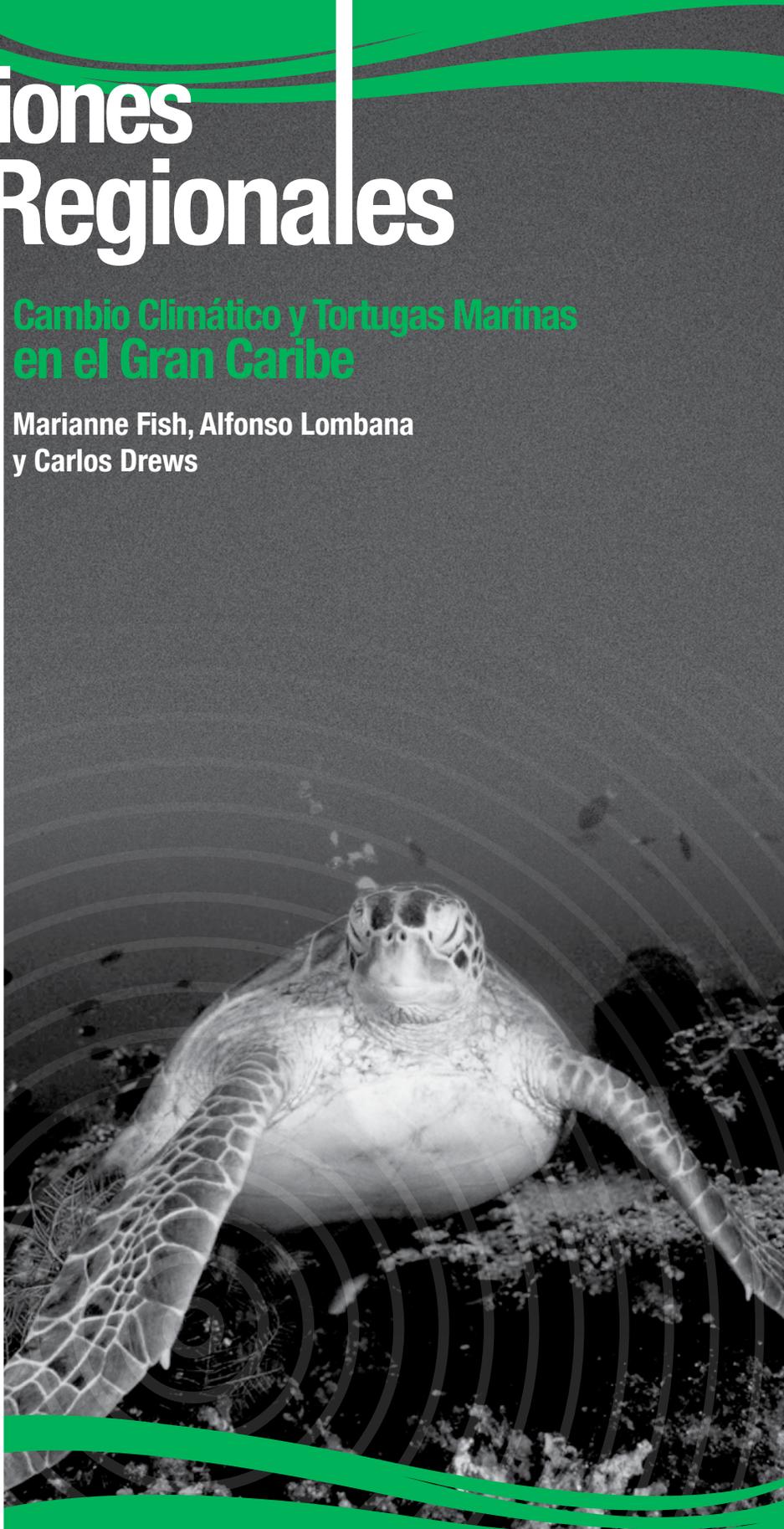
Las condiciones cambiantes en áreas de anidación de tortugas marinas como resultado del cambio climático son potencialmente serias para las poblaciones de tortugas marinas ya bajo presión por sobre-explotación, pesca incidental y modificación de hábitat. Una reproducción exitosa es clave para la supervivencia de la población y es fuertemente influenciada por el ambiente de anidación. Entender cómo los hábitats de anidación pueden ser afectados por el cambio climático, específicamente cambios en temperatura y precipitación, es un paso temprano importante en la valoración de la vulnerabilidad de las poblaciones regionales de tortugas marinas. Los cambios climáticos no serán uniformes a lo largo del globo pues son influenciados por procesos físicos locales. WWF ha utilizado proyecciones regionales para cambios en temperatura y precipitación para investigar los cambios proyectados en las condiciones de anidación en el Gran Caribe. Los principales objetivos de este proyecto son:

- Crear un mapa en línea comprensivo e interactivo que pueda ser usado por grupos de conservación y administradores costeros para examinar los cambios locales en el clima que enfrentarán las tortugas marinas a largo de su ámbito de distribución en el Gran Caribe
- Valorar la vulnerabilidad relativa de diferentes áreas de anidación en la región al cambio climático

Las proyecciones regionales de cambio climático para el Caribe han sido desarrolladas por el proyecto PRE-CIS-Caribe y se analizaron las proyecciones de temperatura y precipitación para 38 países en la región. La región del Gran Caribe está enfrentando condiciones mucho más cálidas y secas en las próximas décadas. En general, las islas pequeñas muestran cambios proyectados menos dramáticos en temperatura y precipitación que los países en tierra firme y como tales, proveen refugios de las condiciones más calientes y secas en otras partes de la región. La variación en cambios locales mostrada aquí, particularmente para precipitación, resalta la importancia de examinar las proyecciones futuras en una escala más fina de la que pueden proveer los modelos climáticos globales.

Cambio Climático y Tortugas Marinas en el Gran Caribe

Marianne Fish, Alfonso Lombana y Carlos Drews



Introducción

Los cambios predichos en el clima como resultado del incremento en las concentraciones atmosféricas de gases con efecto de invernadero incluyen mayores temperaturas en el aire y océano, un aumento en el nivel del mar, incremento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos y patrones alterados de precipitación¹. Estos cambios tendrán efectos iniciadores, trayendo una multitud de cambios físicos a los ecosistemas. Las especies en muchas áreas ya están exhibiendo respuestas a un clima cambiante, y se han observado cambios en la fenología y distribución de plantas y animales en hábitats terrestres, marinos y de agua dulce².

La historia de vida y la biología de las tortugas marinas están finamente sintonizadas a sus condiciones ambientales. Las condiciones cambiantes en áreas de anidación y forrajeo que podrían limitar el potencial de crecimiento y reproductivo son potencialmente serias para poblaciones que ya están bajo presión a nivel mundial debido a una alta mortalidad por pesquería, sobre-explotación y modificación de hábitat³. Una reproducción exitosa es clave para la supervivencia de la población y en consecuencia, un entendimiento de cómo los hábitats de anidación pueden ser afectados por el cambio climático es un paso temprano importante en la valoración de la vulnerabilidad de las poblaciones regionales de tortugas marinas. Las condiciones de anidación probablemente serán diferentes en el futuro, dados los cambios proyectados en temperatura, precipitación, nivel del mar y eventos climáticos extremos.

Desde el tiempo de arribada a los sitios de anidación hasta la construcción de nidos y eclosión de neonatos, la temperatura y la humedad juegan un papel crítico. Para la mayoría de las poblaciones de tortugas marinas, la anidación ocurre en una temporada determinada, usualmente en los meses más cálidos⁴. La temperatura superficial del mar juega un papel en la determinación del inicio de la anidación y también se ha demostrado que tiene un efecto significativo en los intervalos de remigración⁵. Una vez que se han puesto los huevos, las condiciones ambientales en el nido, específicamente temperatura y humedad, son críticas para una incubación exitosa y juegan un papel crucial en cómo se desarrollan los embriones. En la playa, la arena y las temperaturas correspondientes del nido influyen el período de incubación, crecimiento de neonatos, proporciones sexuales y finalmente el éxito de eclosión⁶. Una incubación exitosa de los huevos sucede dentro de un ámbito limitado de temperatura de aproximadamente 25 °C a 35 °C, aunque el ámbito exacto difiere entre especies⁷. El tiempo de incubación de los huevos varía con la temperatura, con los nidos más cálidos incubándose más rápidamente⁸. La temperatura de incubación también influye el fenotipo de los neonatos, con mayores temperaturas produciendo neonatos más

pequeños^{9,10}. Estos neonatos pueden estar expuestos a mayor riesgo por depredación fuera del nido por depredadores con limitación de apertura bucal que no pueden cazar neonatos de mayor tamaño, pero los neonatos más pequeños también pueden nadar más rápido y tienen mayores tasas de crecimiento^{11,12}. La temperatura también determina el sexo de los neonatos: mayores temperaturas durante el tercio medio del período de incubación producen más hembras y temperaturas más bajas producen más machos. A una 'temperatura pivotal' de entre 28 y 31 °C para la mayoría de las especies, se produce una proporción de 50:50 y alrededor de esta hay un ámbito de transición que resulta en una mezcla de sexos¹³.

Junto con la temperatura, la precipitación también juega un papel en el éxito reproductivo. En algunas áreas, las épocas de anidación corresponden a la época de más lluvias¹⁴⁻¹⁸, mientras en otras, el pico de anidación ocurre en la temporada seca¹⁹ o se alterna entre períodos lluviosos y secos²⁰. La precipitación puede tener un ámbito de efectos en los nidos de tortugas marinas al incrementar el contenido de humedad de la arena. La lluvia puede ayudar a consolidar el sustrato, facilitando la excavación del nido^{21,22}. La cantidad de humedad en la arena a su vez afecta el transporte de oxígeno, intercambio de gases, salinidad y movilización de calcio^{7,23-25}. Varios estudios han encontrado relaciones entre humedad y éxito de neonatos. McGehee²⁶ determinó que el éxito de los neonatos era el mayor a 25% de humedad y significativamente menor a menores (0%) y mayores (50, 75, 100%) niveles. Resultados similares fueron reportados por Ozdemir and Turkozan²⁷, Ozdemir *et al.*²⁸ y Yalcin-Ozdilek *et al.*²⁹. La humedad también influye las condiciones térmicas en la arena y la arena retraída tiene un marcado efecto refrescante en los nidos^{30,31}, al punto que puede influir en las proporciones sexuales^{31,32}. Se ha visto que el tiempo de incubación es más largo a niveles mayores de humedad²⁶.

Dado que existen numerosas maneras en las que la temperatura y la humedad pueden afectar la reproducción de las tortugas marinas, existe la preocupación de que los rápidos cambios en estas variables que se esperan en el próximo siglo podrían tener un impacto considerable en las poblaciones de tortugas marinas. Por lo tanto, la determinación de cómo cambiarán las condiciones en las áreas costeras de la región del Gran Caribe representa un paso temprano importante en la valoración de panorama completo de las poblaciones de tortugas marinas. Las manifestaciones de cambio climático no serán uniformes a lo largo del globo pues son influenciadas fuertemente por procesos físicos locales. Similarmente, es poco probable que sean homogéneas dentro de la región de análisis. Aunque no existen los métodos para proyectar exactamente las temperaturas de anidación en playas individuales, los modelos climáticos regionales nos permiten examinar proyecciones a un nivel que es más significativo para propósitos de manejo, que las proyecciones globales a mayor

escala. Es importante entender cómo pueden cambiar las condiciones en el futuro y de acuerdo con esto planear los programas de conservación. El objetivo de este proyecto es facilitar este proceso para grupos de conservación y administradores costeros en el Gran Caribe.

Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es proveer una herramienta para conservacionistas y administradores para investigar las condiciones que probablemente enfrentarán las poblaciones anidantes de tortugas marinas en las próximas décadas. Este análisis se enfoca en escenarios futuros de temperatura y precipitación en el Gran Caribe. Presentamos una exploración inicial de esas proyecciones para la región en relación con los sitios de anidación de tortugas marinas. Específicamente, el proyecto:

- Creará un mapa interactivo en línea, que pueda ser usado por grupos de conservación y administradores costeros para examinar los cambios locales en clima que puedan enfrentar las tortugas en el Caribe
- Examinará las proyecciones de temperatura y precipitación para el Gran Caribe para el siguiente siglo y relacionará estos cambios con las áreas de anidación actual. También discutiremos las implicaciones de las condiciones alteradas de anidación para la vulnerabilidad de las poblaciones regionales de tortugas marinas al cambio climático.

Cambios climáticos regionales

Proyecciones climáticas

Nuestro clima es el resultado de interacciones complejas entre la energía solar entrante y la atmósfera, océanos (hidrosfera), tierra (litosfera), hielo (criosfera) y vida (biosfera)³³. Es posible modelar cómo es probable que cambie el clima en el futuro, utilizando modelos de circulación general atmósfera-océano (AOGCMs), que consideran estas relaciones e interacciones físicas y químicas. Los modelos de circulación global (GCMs) integran tantos procesos físicos como sean posibles para proyectar cambios en variables climáticas con emisiones de gases de efecto invernadero crecientes.

Mientras que los GCMs son adecuados para cuadrículas de más de cien kilómetros, no dan el nivel de detalle necesario para valoraciones a nivel de países. En el Caribe, una región de unas 7,000 islas, isletas y callos, muchos países no están representados del todo en modelos globales y se necesitan datos con mayor resolución. Existe un número de maneras para mejorar los GCMs, incluyen-

do GCMs atmosféricos de más alta resolución, técnicas estadísticas que unen los GCMs con la información climática de alta resolución y el modelaje climático regional. Los modelos climáticos regionales (RCMs) son modelos climáticos físicamente basados, a escala total, que incorporan los procesos e interacciones de los modelos globales pero añaden una escala espacial más fina. Aparte de proporcionar mayor detalle, algunas ventajas adicionales de usar el modelo regional son: proyecciones más realistas para áreas en las que el terreno no es plano, mejor predicción de cambios en climas extremos y tal vez más importante para el Caribe, representación de islas pequeñas³⁴.

PRECIS ("Proporcionando Climas Regionales para Estudios de Impacto") es un modelo climático regional basado en PC desarrollado por el "Hadley Centre", Reino Unido, que puede ser aplicado a cualquier área en el globo para generar proyecciones detalladas de cambio climático. El proyecto PRECIS-CARIBE es un esfuerzo de varios institutos para suministrar proyecciones de clima para la región del Gran Caribe usando modelos PRECIS. El Instituto de Meteorología de la República de Cuba (INSMET) provee acceso público a los resultados de este proyecto y los datos de precipitación, temperatura superficial y humedad, entre otras variables, pueden ser accedidos en línea y bajados del sitio web del proyecto (<http://precis.insmet.cu/Precis-Caribe.htm>). Estos datos proveen la base de nuestro análisis (ver métodos en el Apéndice A).

Escenarios

Las proyecciones de clima dependen de los cambios futuros en la emisiones de gases con efecto de invernadero, cuya variación es representado por diferentes escenarios climáticos. Es difícil predecir con exactitud cómo reaccionará la sociedad a la amenaza del cambio climático y hasta qué punto tendrá la disposición o capacidad para reducir las emisiones. Conforme miramos más adelante en el futuro, nuestra habilidad para predecir con exactitud las emisiones de gases con efecto de invernadero disminuye. Para tomar esta incertidumbre en cuenta, las proyecciones climáticas se basan en un número de diferentes escenarios futuros, *i.e.* posibles situaciones futuras con niveles variables de crecimiento poblacional, desarrollo socio-económico y progreso tecnológico³⁵. La Caja 1 resume los diferentes escenarios climáticos, como se detallan en el Informe Especial de IPCC sobre Escenarios de Emisiones (SRES)³⁶. Actualmente, PRECIS-CARIBE ha corrido modelos para los escenarios A2 y B1. Para más información sobre el proyecto PRECIS-CARIBE vea Taylor *et al.*³⁷.

Los datos disponibles en sitio web de PRECIS-CARIBE fueron generados a partir de simulaciones desarrolladas para dos "períodos de tiempo", 1961-90 y 2071-2100 (usando el escenario SRES A2). Los resultados se presentan como la diferencia entre el período control de línea basal (1961-1990) y el período simulado (2071-2100).

Las proyecciones para el período entre 2010 y 2070 y para el escenario de emisiones B1 también están disponibles, estimadas utilizando factores de escalamiento para modelos climáticos globales. Para los propósitos de este estudio, los datos PRECIS-CARIBE fueron utilizados para examinar patrones regionales en proyecciones de temperatura y precipitación para dos meses (enero y julio, que corresponden en general a las épocas seca y húmeda) en tres años (2020, 2050 y 2099³⁸). Los datos fueron bajados y utilizados para desarrollar capas de GIS (Sistema de Información Geográfica) para cada variable, que fueron superpuestas en un mapa costero regional. En el Apéndice A se muestran los métodos detallados de cómo se extrajeron y analizaron estos datos.

Limitaciones e incertidumbres

El modelaje climático es una ciencia en evolución y por esta razón cualquier interpretación de los resultados a partir de los modelos climáticos actuales debería reconocer plenamente las limitaciones inherentes. Es crítico entender las incertidumbres asociadas con estos modelos y no tomar los valores producidos como absolutos.

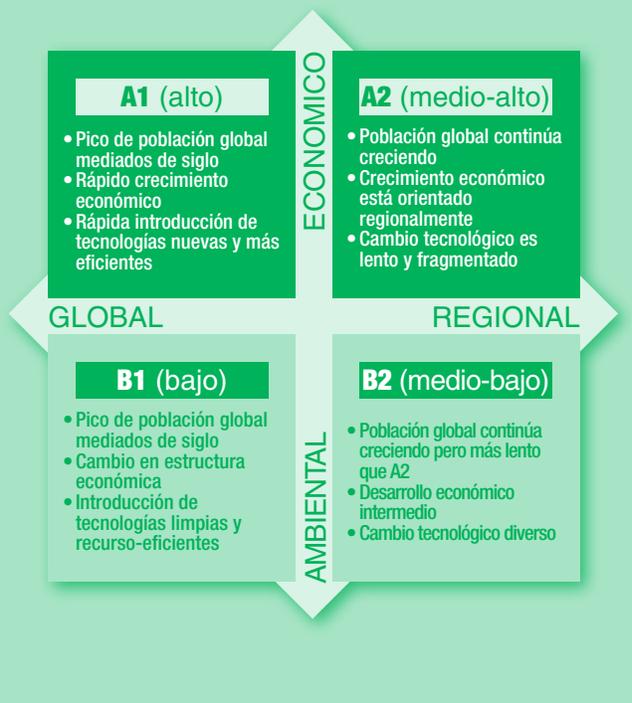
La incertidumbre surge de varias fuentes:

- Incertidumbre sobre emisiones futuras y concentraciones de gases con efecto de invernadero. Es posible explicar alguna incertidumbre alrededor de las emisiones futuras al considerar proyecciones para escenarios de emisiones altas y bajas. Sin embargo, el entendimiento de algunos procesos en el ciclo de carbono es imperfecto, lo cual crea incertidumbre cuando se convierten emisiones a concentraciones. Además los modelos no toman en cuenta la retroalimentación entre el clima, ciclo de carbono y química atmosférica.
- Incertidumbre sobre las respuestas del clima. El conocimiento del sistema climático es incompleto y puede que ciertos procesos y retroalimentaciones no estén bien representados. Una forma de enfrentar esta incertidumbre es utilizar diferentes proyecciones GSM en los modelos regionales y presentar los resultados como un ámbito de valores posibles. Las proyecciones PRECIS-CARIBE actuales se desarrollaron usando el GSM del Hadley Centre. Sin embargo, el trabajo futuro del proyecto incorporará proyecciones GSM alternativas.
- Variabilidad natural. El cambio climático antropogénico está ocurriendo al mismo tiempo que el cambio climático natural. El clima varía en escalas de tiempo por año hasta escalas por décadas como resultado de las interacciones naturales entre atmósfera, océano y tierra, y esta variabilidad natural podría servir para sumar o restar de los cambios que resultan de la actividad

Figura 1

Escenarios de emisiones

Hay cuarenta escenarios diferentes divididos en cuatro familias de escenarios dependiendo de las emisiones que generan: A1 (Altas emisiones), A2 (Medianas a altas), B1 (Bajas), B2 (Bajas a medianas). Cada familia representa diferentes desarrollos demográficos, sociales, económicos, tecnológicos y ambientales.



humana³⁸. Esta variabilidad climática natural puede ser tratada corriendo ensambles de proyecciones climáticas futuras, donde cada modelo en el ensamble es idéntico excepto que se empieza a partir de un punto diferente de inicio. Estas corridas proporcionarán un ámbito de proyecciones futuras que deberían cubrir la evolución actual del sistema climático³⁷.

- Incertidumbre alrededor de la técnica de regionalización. Como se mencionó anteriormente, existe un número de maneras de obtener resultados con mayor resolución a partir de GCMs de menor resolución. Idealmente, cualquier proyección debería compararse con otras producidas por diferentes técnicas.

Pareciera sabio, enfrentar la interpretación de los resultados del modelaje climático, cubriendo una gama de escenarios. Los límites más bajos pueden indicar el mínimo para el cual la sociedad debería estar preparada para enfrentar. Los límites más altos son los escenarios en el peor de los casos, cuyas consecuencias deberían ser parte de las evaluaciones de riesgo y diseño de respuesta con una perspectiva de precaución. Las tendencias generales probablemente son una buena indicación del desarrollo probable en el clima regional.

Proyecciones de clima para el Caribe

La región Caribe

El Gran Caribe consiste de 29 países en tierra firme e islas (13 estados soberanos, 14 territorios dependientes y dos departamentos en ultramar) que se encuentran alrededor y en el Mar Caribe y el Golfo de México. La región está bordeada por los países en tierra firme de América del Sur (Colombia, Venezuela y las Guyanas) hacia el sur y de América Central (Panamá, Costa Rica, Nicaragua, Guatemala, Belice y Honduras) hacia el oeste. Las islas de las Indias Occidentales forman un arco que bordea el mar hacia el este, y hacia el norte está el sur de los Estados Unidos, las Bahamas y las islas Turcas y Caicos (Fig. 2).

La región puede ser dividida en varias áreas distintas geográficamente: América del Norte (EUA y México), las Islas "Bahamianas" (Las Islas Bahamas y las Islas Turcas y Caicos), las Antillas Mayores (Cuba, Jamaica, Haití, República Dominicana y Puerto Rico), las Antillas Menores (Islas Leeward e Islas Windward Islands, el Caribe del Sur (incluyendo países en tierra firme de América del Sur y las Antillas Leeward), América Central y las Islas Caimán. La Figura 2 muestra los países incluidos en el análisis. Surinam y la Guyana Francesa son parte de la región pero nuestro análisis está limitado a la cobertura de los datos de PRECIS CARIBE, que actualmente no se extiende a esos países.

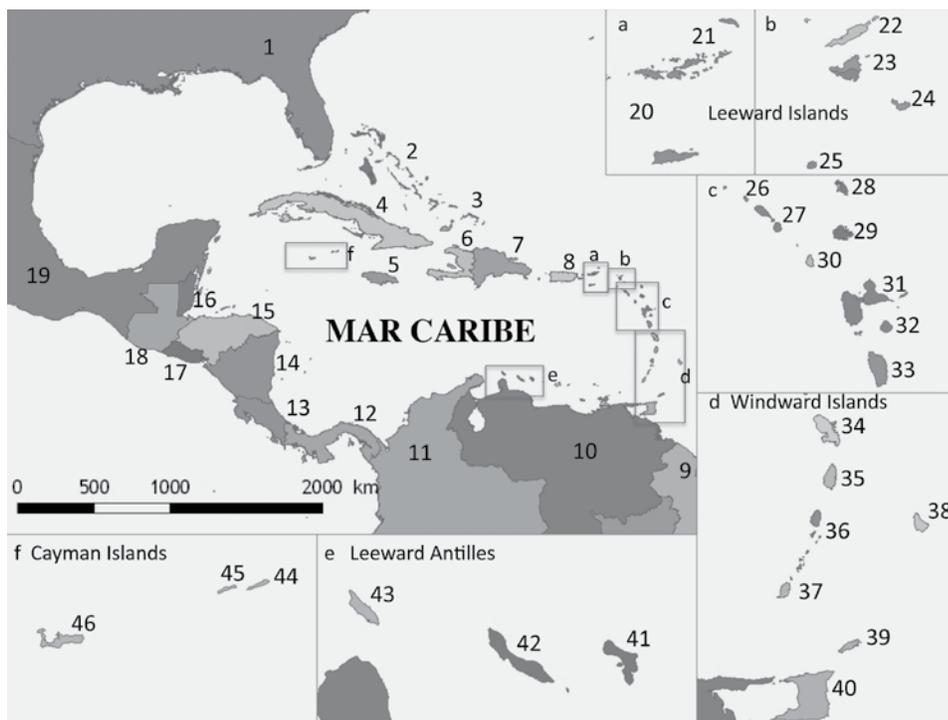


Figura 2. Países e islas del Gran Caribe

1	EUA	13	Costa Rica	25	Saba	37	Grenada
2	Bahamas	14	Nicaragua	26	St Eustatius	38	Barbados
3	Turks y Caicos	15	Honduras	27	St Kitts y Nevis	39	Tobago
4	Cuba	16	Belice	28	Barbuda	40	Trinidad
5	Jamaica	17	El Salvador	29	Antigua	41	Bonaire
6	Haití	18	Guatemala	30	Montserrat	42	Curaçao
7	República Dominicana	19	México	31	Guadeloupe	43	Aruba
8	Puerto Rico	20	Islas Vírgenes de EUA (USVI)	32	Marie-Galante	44	Cayman Brac
9	Guyana	21	Islas Vírgenes Británicas (BVI)	33	Dominica	45	Little Cayman
10	Venezuela	22	Anguilla	34	Martinique	46	Grand Cayman
11	Colombia	23	St Maarten/St Martin	35	St Lucia		
12	Panamá	24	St Barthélemy	36	St Vincent y Grenadines		

Cuadro 1 Diferencia promedio (\pm desviación estándar) en temperatura y precipitación entre 1961-1990 y 2020, 2050 y 2099 en el Gran Caribe por dos meses y para dos escenarios de emisiones. N= 38 grupos de estados e islas.

		TEMPERATURA		PRECIPITACIÓN	
		A2	B1	A2	B1
2020	Enero	0.69 (0.15)	0.62 (0.13)	-0.41 (0.48)	-0.37 (0.43)
	Julio	0.69 (0.24)	0.62 (0.22)	-0.73 (0.71)	-0.66 (0.64)
2050	Enero	1.46 (0.31)	1.10 (0.23)	-0.87 (1.02)	-0.65 (0.77)
	Julio	1.46 (0.51)	1.10 (0.39)	-1.56 (1.51)	-0.18 (1.14)
2099	Enero	3.32 (0.54)	2.02 (0.33)	0.32 (1.18)	0.19 (0.72)
	Julio	3.47 (1.23)	2.11 (0.75)	-2.55 (1.48)	-1.55 (0.90)

Fuente: calculado a partir de resultados de PRECIS-CARIBE (<http://precis.insmet.cu/eng/Precis-Caribe.htm>)

Proyecciones regionales

Todas las proyecciones de temperatura y precipitación se presentan como la diferencia entre un período control de línea basal (1961-1990) y el año de interés. El cuadro 1 muestra las tendencias generales de toda la región (no sólo costas) para tres años: 2020, 2050 y 2099. En general, la región Caribe probablemente será más cálida y seca, pero con mucha variación regional. Todos los patrones observados son más pronunciados bajo el escenario A2 (emisiones altas) que para el B1. El calentamiento promedio es similar en enero y julio en 2020 y 2050, pero para el 2099, julio muestra un incremento mayor en temperatura que enero para ambos escenarios. Hay una disminución promedio en precipitación para ambos meses en el 2020 y 2050, y para julio del 2099. Enero del

2099 muestra un ligero aumento en precipitación. Las proyecciones climáticas por país se muestran en el Apéndice B.

1) Temperatura

Patrones regionales generales

Las figuras 3a y 3b muestran los patrones regionales en el cambio de temperatura, bajo los escenarios de emisión B1 y A2 respectivamente. Se proyecta que los aumentos de temperatura sean mayores sobre tierra que sobre mar y por lo tanto los países en tierra firme muestran un cambio mayor en temperatura que las islas (Fig. 3a). Los cambios de temperatura dentro de la región serán muy variables, particularmente sobre

áreas terrestres; el calentamiento es más pronunciado en áreas terrestres en julio que en enero para todos los años. En el 2050, aparece un parche relativamente más fresco en el suroeste del Caribe, cerca de la costa de Nicaragua y Costa Rica. Se proyecta que las temperaturas superficiales sobre el mar abierto aumenten más en el Caribe norte que en el sur.

Por área

Debido a las diferencias en geografía entre partes del Caribe, comparamos los cambios proyectados en temperatura para cada una de estas áreas (Fig. 4). Las pequeñas islas de las Antillas Menores y las Islas Caimán muestran un incremento menor en temperatura que las Antillas Mayores y los países en tierra firme (Fig. 4) y esta diferencia es más prominente en julio que en enero.

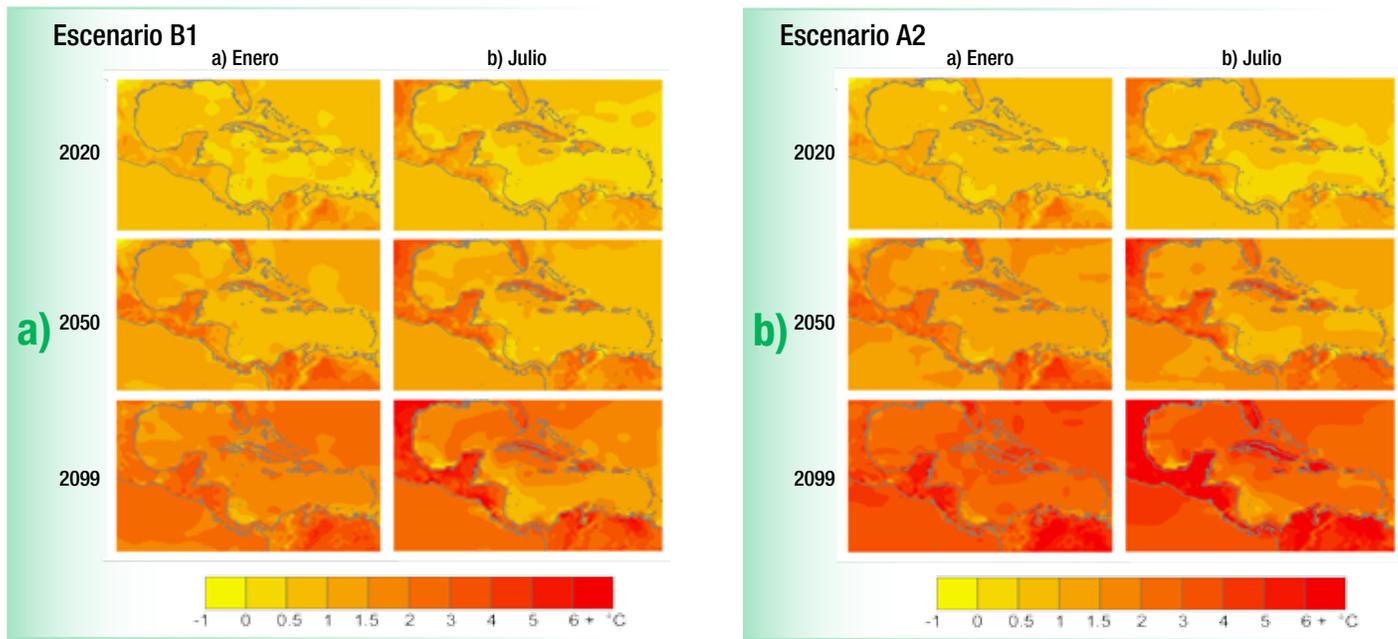


Figura 3: Cambios proyectados en temperatura para la región del Gran Caribe, para dos meses en el 2020, 2050 y 2099, y para dos diferentes escenarios de emisiones a) B1 y b) A2.

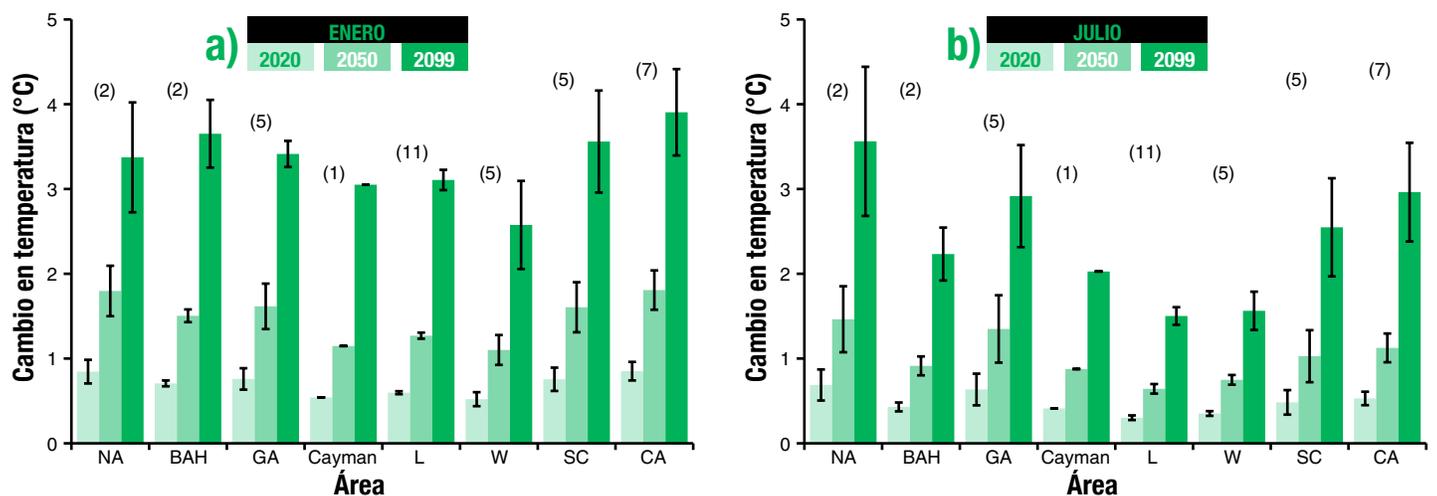


Figura 4. Cambio promedio proyectado (\pm desviación estándar) en la temperatura del promedio de línea basal 1961 – 1990 para a) enero y b) julio 2020, 2050 y 2099. Las áreas representadas son América del Norte (NA), Islas "Bahamianas" (BAH), las Antillas Mayores (GA), las Islas Caimán, las Islas Leeward (L), las Islas Windward (W), el Caribe sur (SC) y América Central (CA). El número de países en cada área (N) se muestra entre paréntesis.

2) Precipitación

Patrones regionales generales

Existe una disminución general promedio en la precipitación bajo ambos escenarios, con la excepción de un aumento promedio en enero del 2099 (Cuadro 1) impulsado por condiciones mucho más húmedas en la parte norte de la región y en Colombia (Fig. 5). La disminución en precipitación proyectada es mayor para julio que para enero en general, pero en enero hay un gran parche de descenso en precipitación en el Caribe occidental (Fig. 5), al sur de las Antillas Mayores (incluyendo a las Islas Caimán). En el 2020, hay un pequeño parche de mayor precipitación en la costa de Costa Rica. Este parche anómalo alejado de la costa Caribe de la parte sur de América Central, se expande en años subsecuentes para

incluir las costas de Costa Rica, Panamá y Nicaragua. En julio, el norte es generalmente más seco que el sur, con un parche grande de mayor precipitación en el Caribe suroeste y en el Pacífico tropical oriental, entre Panamá y Colombia (Fig. 5).

Las proyecciones para el 2099 muestran una gran cantidad de variabilidad regional. En enero del 2099 el patrón general de desecación cambia (Cuadro 1), con 14 países mostrando condiciones más húmedas (ver Apéndice B). En enero hay un incremento en la precipitación sobre el mar que cambia a una disminución en julio. El parche en el suroeste del Caribe fluctúa dramáticamente entre temporadas, con cambios proyectados en precipitación de alrededor de -10 mm día^{-1} en enero hasta $+20 \text{ mm día}^{-1}$ en julio.

Por área

En enero, las Islas Caimán muestran la disminución más pronunciada en precipitación para todos los escenarios, excepto enero del 2099 cuando se proyecta un aumento (Fig. 6). Las islas de las Antillas Mayores y Menores muestran cambios menores en promedio. La gran variación en las proyecciones para América Central es impulsada por el parche altamente variable cerca de Costa Rica (Fig. 5). Para el 2099, las áreas más al norte (Bahamas, Antillas Mayores, Isla Leeward y las Islas Caimán) muestran un cambio en la tendencia general de condiciones más secas en enero (Fig. 6). En julio, hay un patrón general de disminución en la precipitación en el tiempo, con la excepción de América Central (Fig. 6), que de nuevo muestra una gran variación impulsada por el parche de aumento en precipitación frente a la costa de Nicaragua, Costa Rica y Panamá. Los cambios en la precipitación por país se presentan en el Apéndice B.

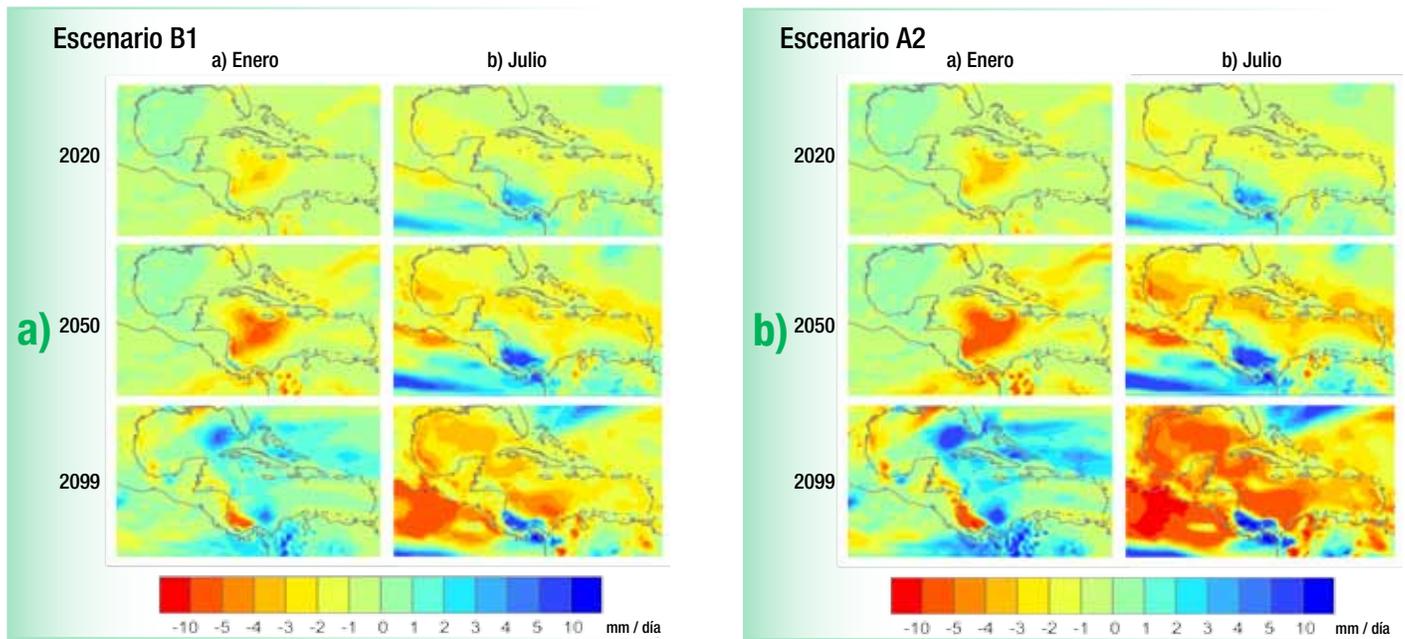


Figura 5. Cambios en precipitación proyectados para la región del Gran Caribe, por dos meses en el 2020, 2050 y 2099, para dos diferentes escenarios de emisiones a) B1 y b) A2.

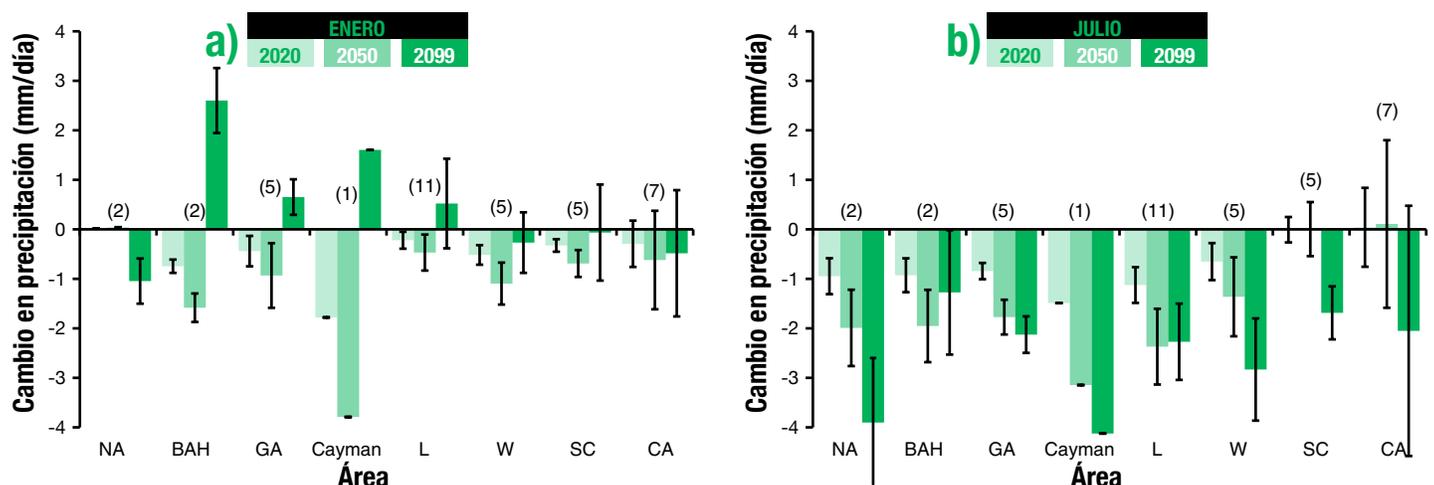


Figura 6. Cambio promedio proyectado para precipitación (\pm desviación estándar) desde el promedio de línea basal de 1961 – 1990 para a) enero y b) julio 2020, 2050 y 2099. Las áreas representadas son América del Norte (NA), Islas "Bahamianas" (BAH), las Antillas Mayores (GA), las Islas Caimán, las Islas Leeward (L), las Islas Windward (W), el Caribe sur (SC) y América Central (CA). El número de países en cada área (N) se muestra entre paréntesis.

Playas de anidación de tortugas marinas

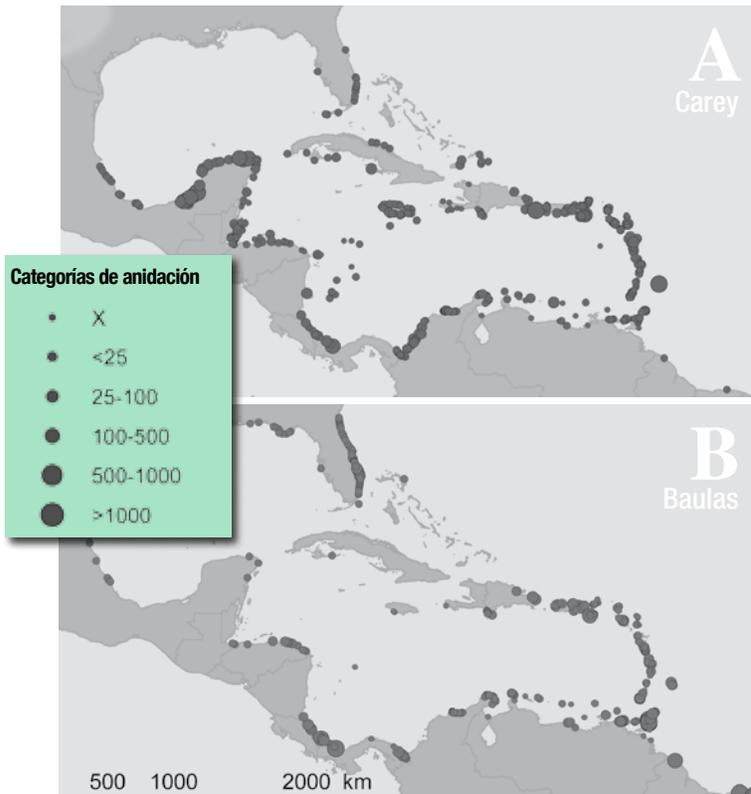


Figura 7. Distribución de nidos de carey (a) y baula (b) en la región Caribe (adaptado de 39). Las playas de anidación se dividen en categorías basadas en los números de arrastres por año: X = rastros de anidación, <25, 25-100, 100-500, 500-1000, >1000.

Seis especies de tortugas marinas anidan en el Caribe y las playas de anidación están dispersas a través de la región. Aquí nos enfocamos en los sitios de anidación las especies críticamente amenazadas, tortugas carey (*Eretmochelys imbricata*) y baula (*Dermochelys coriacea*) (Fig. 7).

La anidación es estacional y varía por país con algunos patrones regionales. Los meses con mayor anidación para las carey en el Caribe son entre julio y octubre, y entre abril y junio para las baulas (Fuente: WIDECAS T Planes de Acción para Recuperación de Tortugas Marinas <http://www.widecast.org/Resour ces/STRAPs.html>). Los sitios de anidación y estación se utilizaron para examinar la vulnerabilidad relativa de las playas de anidación a los cambios en temperatura para el 2020, pues este año está dentro del tiempo de vida factible de los proyectos de conservación actuales. Los datos de anidación fueron obtenidos de la base de datos espaciales de la Red de Tortugas Marinas del Gran Caribe (WIDECAS T), disponible en línea por OBIS-SEAMAP⁴⁰ (N.B. algunas playas regionales pueden no estar representadas por caer fuera de los límites del modelo PRECIS). El ámbito de temperaturas en los sitios de anidación para cada especie fue obtenido para 2020 y se ordenaron las playas de acuerdo al cambio proyectado en la temperatura, de 1 (cambio menor) a 4 (mayor), basado en los ámbitos en cuartiles de los aumentos de temperatura esperados (Fig. 8). Para las carey y las baulas, las islas de las Antillas Menores y otras islas pequeñas dentro de la región, muestran un aumento menor en la temperatura en la temporada de

mayor anidación, que las áreas de tierra firme y por lo tanto pueden exhibir el menor cambio en las condiciones de anidación en el futuro.

Bajo el escenario A2, el aumento promedio en la temperatura para las áreas costeras para mayo del 2020 (mes de mayor anidación para las baulas) es de 0.67 °C (\pm 0.17 SD) y para agosto 2020 (mes de mayor anidación para las carey) es de 0.66 °C (\pm 0.23 SD). Estas no son marcadamente diferentes de los aumentos proyectados cuando sólo se consideran sitios de anidación para cada especie (sitios de

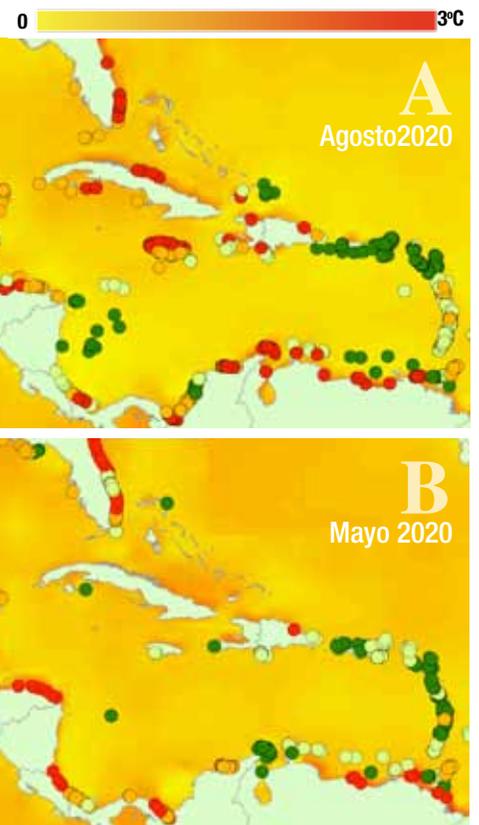


Figura 8. Cambios proyectados en la temperatura durante el mes de mayor anidación para a) agosto 2020 y b) mayo 2020, y ordenamiento de sitios de anidación en la región Caribe por cambio de temperatura proyectado (basado en la temporada de anidación actual) para tortugas a) carey y b) baula.

anidación para baula: 0.69 °C \pm 0.25; sitios de anidación para carey: 0.65 °C \pm 0.32).

Un aumento en la temperatura está proyectado para todos los meses, aunque la magnitud del aumento varía con el mes. La figura 9 muestra el promedio de temperatura por mes para 1994-2006 y el aumento en temperatura proyectado para cada mes en el 2020. No hubo correlación significativa entre la temperatura actual y el aumento proyectado ($R=0.48$, $p=0.14$) pero el mes más caliente (abril) también muestra el mayor aumento.

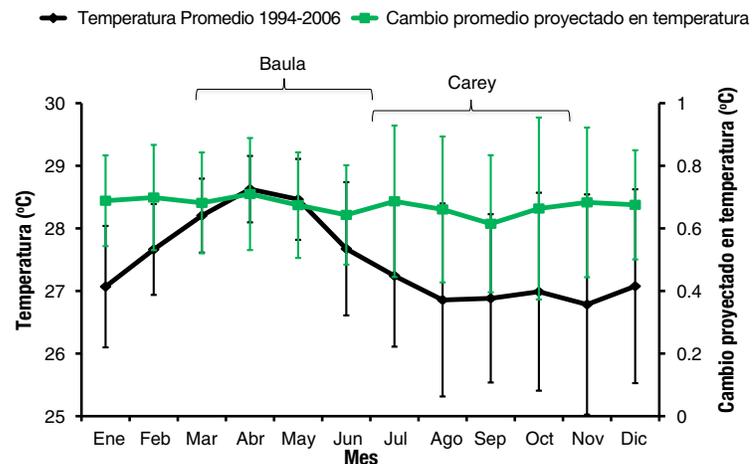


Figura 9. Temperatura (1994-2006) promedio (\pm desviación estándar) para cada mes y cambio proyectado en temperatura para cada mes del 2020 comparado con el promedio de línea basal de 1961-1990, bajo un escenario A2. Se muestran los meses de mayor anidación actuales para tortugas baula y carey en el Caribe.

¿Qué significan las proyecciones climáticas futuras para las poblaciones de tortugas marinas?

La región del Caribe se enfrenta a condiciones mucho más calientes y secas en las próximas décadas. La variación en los cambios locales vistos aquí, particularmente para precipitación, realza la importancia de examinar proyecciones futuras a una escala más fina que la que pueden proporcionar los modelos de clima global. En general, las islas pequeñas muestran cambios proyectados menos dramáticos en temperatura y precipitación que los países en tierra firme y por lo tanto proveen refugio de las condiciones más calientes y secas en otras partes de la región.

1) ¿Cómo afectarán los cambios en la temperatura del aire superficial a las condiciones de anidación?

Las temperaturas representadas aquí son cambios en temperatura del aire superficial pero las temperaturas de la arena experimentadas por las tortugas dependerán de factores más localizados. Se observan grandes diferencias térmicas entre playas y dentro de ellas, dependiendo de las características físicas del sustrato de la playa, incluyendo el tamaño de los granos de arena, color de la arena y contenido de humedad^{41, 42}. Playas de color más claro son generalmente más frescas y las playas más oscuras son más cálidas⁴¹, y en cualquier playa en particular, las temperaturas de la arena generalmente aumentan tierra adentro de la marca más alta del agua, lo que se atribuye al menor contenido de humedad en la arena. Sumado a la naturaleza del sustrato, muchos factores como los cielos nublados, la lluvia, mares pesados, la posición de la capa freática, la vegetación y el desarrollo humano cerca de la playa, pueden afectar la temperatura de la playa^{24, 43-45}.

La temperatura también varía con la profundidad y las temperaturas de los nidos en la misma playa pueden variar dependiendo de su profundidad^{10, 46, 47}. La relación entre temperatura del aire y temperatura a la profundidad del nido es determinada por el intercambio de energía térmica en la superficie y por la transmisión de calor dentro de la arena⁴⁸. En general, se observa un descenso en la temperatura a mayor profundidad. Las fluctuaciones diarias de temperatura se reflejan bajo la superficie de la arena, pero la amplitud de estas, disminuye exponencialmente a mayor profundidad. Estas variaciones en temperatura con la profundidad dan como resultado que los nidos menos profundos alcanzan temperaturas diarias mayores por períodos más largos de tiempo, que los nidos más profundos^{49, 50} y los nidos más profundos pueden evitar fluctuaciones excesivas de temperatura. Aún en un mismo nido, los huevos están expuestos a diferentes temperaturas, con dos partes del nido variando hasta por 1° C¹². En corto, las temperaturas de la arena y del nido probablemente aumentarán conforme aumenten las

temperaturas del aire^{48, 51}, con una relación más fuerte entre las temperaturas a profundidades menores⁵², pero esta relación probablemente será dependiente de la localización.

Los modelos de clima regional sugieren que el enfriamiento es muy poco probable en un futuro cercano en cualquier lugar del Caribe. No obstante la variabilidad y variedad de determinantes en la temperatura de incubación, si la temperatura del aire superficial aumenta, también lo hará en algún grado la temperatura de incubación. Sin embargo, dada la relación variable entre la temperatura superficial y las temperaturas potenciales de anidación, resulta útil examinar las relaciones entre la temperatura del aire y las temperaturas de la arena y/o nido en playas individuales. El establecimiento de estas relaciones es necesario para determinar cómo estas proyecciones regionales de temperatura se traducirán en condiciones de anidación alteradas (para más información ver el "Manual de Monitoreo de Temperatura" por separado). Si estas relaciones pudieran ser determinadas a una escala regional, esto podría permitirnos resaltar las áreas de preocupación y/o aquellos lugares que podrían servir como refugios de temperatura.

2) ¿Cómo afectarán los cambios en precipitación a las condiciones de anidación?

Los cambios en la precipitación en cualquier dirección podrían influenciar la conveniencia de las playas para la anidación. La precipitación, junto con la influencia del agua proveniente de la tierra y los procesos de mareas, determinan la cantidad de humedad en la arena⁵³. El agua de lluvia puede percolar a través de la arena desde la superficie, y altos niveles de precipitación, particularmente por un período corto de tiempo, pueden causar que suban los mantos freáticos, aumentando el contenido de agua de la arena. Como con la temperatura, las características de la arena pueden influenciar las condiciones de humedad de la arena. Arenas más gruesas son mucho más permeables que las arenas finas y pueden secarse más pronto⁵³.

Los huevos de las tortugas marinas están acoplados a su ambiente de anidación a través de la transferencia de agua, oxígeno, dióxido de carbono y calor por la membrana del huevo⁷ y todos estos procesos están influenciados por el contenido de humedad de la arena circundante. El contenido de humedad de la arena afecta la cohesión, conductividad térmica y propiedades respiratorias de la playa. En arena mojada, los granos se sostienen juntos por la tensión superficial dándole cohesión a la arena, lo que facilita la construcción del nido. La presencia de agua también afecta la tasa a la cual el calor se transfiere por la arena⁵⁴. La conducción térmica es mucho mayor en películas de agua que en poros llenos de aire, así que las arenas con mayor contenido de aire exhiben mayor conductividad térmica⁵⁴. El contenido de agua también influencia la permeabilidad de la arena a los gases. La arena completamente seca consiste de granos de arena y aire, y cuando hay agua

presente, esta llena los espacios entre los granos de arena, desplazando el aire y limitando el movimiento de gases.

3) ¿Cuáles pueden ser los impactos sobre las tortugas marinas?

Aunque la relación entre aire superficial y temperaturas de nidos no es necesariamente directa, los cambios de precipitación y temperatura proyectados tienen el potencial de afectar a las tortugas marinas de varias formas. Si asumimos que las tortugas pueden ajustarse y así lo harán, en términos tanto de comportamiento como genéticos, al paso del cambio climático (pero vea la siguiente sección abajo), entonces las temperaturas más cálidas del agua podrían impulsar anidaciones más tempranas o tardías⁵⁵, una disminución en el intervalo entre anidaciones y cambios temporales en los picos de anidación. Además el apareamiento en las tortugas marinas es dependiente de los recursos y si la disponibilidad de presas es influenciada por cambios en la temperatura, entonces la decisión de aparearse, el tiempo de remigración y la frecuencia de los grupos de huevos podrían verse afectados⁶. Junto con los cambios temporales, un aumento en el hábitat adecuado para la anidación podría llevar a una expansión en la distribución actual.

Un punto de preocupación es la influencia del aumento de las temperaturas de las playas en las proporciones sexuales y la fecundidad subsecuente de la población^{52, 55-57}. La mayoría de los estudios que examinan las proporciones sexuales primarias, directa o indirectamente, han demostrado un sesgo hacia las hembras. Esta proporción puede ser natural, o ser potencialmente el resultado de cambios en la temperatura durante las últimas pocas décadas^{48, 52}. Sin embargo, el aumento en las temperaturas de incubación puede llevar a un sesgo más extremo en la proporción de sexos hacia neonatos hembras y en algunos casos a mortalidad embrionaria⁵⁵. Como resultado, la fecundidad de la población puede dañarse por dos mecanismos. Primero, si no hay suficientes machos para fertilizar a todas las hembras, las poblaciones se volverían dependientes de esperma. Alternativamente, aún si todas las hembras pueden ser fertilizadas por unos pocos machos, la falta de machos puede llevar a la endogamia, que puede asociarse a declives en la adaptabilidad (depresión por endogamia)⁵⁸. Los impactos a nivel de población de los sesgos en proporciones sexuales mediados por temperatura, son por lo tanto complejos y pueden depender de la ecología reproductiva como el sistemas de apareamiento y las tasas de encuentro de parejas⁵⁹.

Los patrones alterados de precipitación en cualquier dirección pueden causar problemas para la anidación de las tortugas marinas y sus neonatos. Las condiciones más secas potencialmente pueden entorpecer la construcción del nido si la arena carece de cohesión y colapsa durante la excavación (Ackerman 1997)⁷. También, la baja humedad puede llevar a un éxito reducido del nido pues el de-

sarrollo exitoso del huevo es dependiente de la absorción de humedad del substrato circundante ²⁶. Por otro lado, aumentos de precipitación, particularmente un alza en la frecuencia de eventos extremos de lluvia, podría resultar en ahogamiento de los neonatos inducido por lluvias, sea por influjo directo de agua desde la superficie o por levantamiento de la capa freática que inundan los nidos desde abajo ^{43,45}, particularmente en áreas planas, con mal drenaje. Además, la lluvia puede causar endurecimiento de la arena produciendo cortezas superficiales resistentes ⁶⁰, aumentando el costo energético de emerger del nido ^{61,62}.

3) ¿Pueden las tortugas marinas adaptarse al cambio climático?

La severidad del riesgo para las poblaciones regionales de tortugas marinas por el cambio climático dependerá en gran medida de su habilidad para adaptarse a las condiciones cambiantes. Las tortugas marinas pueden responder de tres maneras a la presión selectiva de las condiciones ambientales cambiantes: dispersarse a hábitats adecuados en otros sitios, permanecer y ajustarse por mecanismos de plasticidad fenotípica o adaptarse durante el tiempo por medio de cambios genéticos por selección natural ⁶³. Una combinación de estas respuestas también es posible.

Es probable que la plasticidad fenotípica, i.e la habilidad de los individuos de modificar su comportamiento, morfología o fisiología en respuesta al cambio ⁶⁴, sea clave en cualquier respuesta adaptativa al cambio climático pues proporciona el potencial para los organismos de responder rápida y efectivamente a las condiciones cambiantes ⁶⁵. Muchas de las respuestas de las especies al cambio climático ya han sido atribuidas a plasticidad fenotípica ⁶⁶.

Las tortugas marinas pueden exhibir cambios espaciales al utilizar diferentes áreas en playas de anidación actuales, escogiendo diferentes playas de anidación o expandiendo su ámbito para incluir playas en límites térmicos más bajos de su distribución actual. Los cambios temporales también son posibles. Las tortugas marinas pueden compensar por temperaturas cambiantes anidando más temprano o más tarde, o extendiendo la temporada de anidación en ambas direcciones. Si las hembras pueden cambiar los lugares y/o el tiempo de anidación para compensar por el aumento en temperaturas, los impactos negativos podrían aminorarse. La respuesta puede variar entre especies dependiendo de la fidelidad al sitio de anidación (alto en las Carey, relativamente bajo en las baulas) y flexibilidad de comportamiento. Mientras que los hábitats adicionales adecuados térmicamente podrían promover una dispersión a latitudes más altas y nuevas áreas de anidación o forrajeo, esto asume que los hábitats son adecuados en otras maneras, ya sea que las playas pueden proporcionar substratos adecuados para anidación o, para sitios de forrajeo, que las especies de presas también sean capaces de trasladarse con la temperatura.

Un importante paso siguiente en el entendimiento de cómo responderán las tortugas marinas al cambio climático es definir los límites de la plasticidad fenotípica en las poblaciones de tortugas marinas. Por ejemplo, evaluar el riesgo a las poblaciones de tortugas marinas por temperaturas crecientes puede incluir intentos de determinar cómo las características como la selección de sitios de anidación y temperaturas pivotaes, responden plásticamente a las condiciones ambientales cambiantes, y cómo esta plasticidad influencia la supervivencia y el éxito reproductivo ⁶⁷. La plasticidad en temperatura pivotal es una pregunta central en la determinación de los impactos de la temperatura en las proporciones sexuales, aunque parece que esto está relativamente conservado ⁶. Dado que las tortugas marinas podrían trasladarse a áreas más frescas para compensar por aumentos en temperaturas en las playas usadas actualmente, se necesitan estudios que identifiquen en dónde podrían estar estas áreas para que las tendencias en anidación puedan ser observadas.

Aunque las tortugas marinas han sobrevivido grandes fluctuaciones climáticas durante su historia evolutiva, es poco probable que su plasticidad le proporcione una solución de largo plazo si se alcanza un límite más allá del cual la pérdida adaptativa no puede ser mitigada ⁶⁸. Un número de factores adicionales podrían limitar la habilidad de las tortugas marinas para adaptarse naturalmente; la rápida tasa de cambio climático actual es preocupante, así como el hecho de que hay múltiples estresantes adicionales sobre las tortugas marinas y sus hábitats por actividades humanas y que muchas poblaciones son remanentes de niveles históricos, incluyendo algunas ya a punto de extinción ⁶⁹.

Conclusiones y pasos siguientes: ¿Qué podemos hacer?

La vulnerabilidad de las poblaciones de tortugas marinas al cambio climático en áreas específicas depende no sólo de la respuesta de las tortugas al cambio climático, sino también de la nuestra. Aquí hemos mostrado los aumentos regionales proyectados en temperatura y los cambios en precipitación para la región del Gran Caribe. Mientras que las condiciones exactas y tiempo de los cambios que enfrentamos no son seguras, sabemos que los cambios en temperatura y precipitación ocurrirán y probablemente afectarán las condiciones futuras de anidación, que deberían ser tomadas en consideración en la planificación del manejo. Las medidas de adaptación puestas en marcha ahora para mitigar cualquier impacto negativo de las condiciones cambiantes, pueden ayudar a reducir la vulnerabilidad futura de las poblaciones regionales de tortugas marinas.

La adaptación al cambio climático en este contexto es diferente de la adaptación biológica de las tortugas marinas discutida arriba e involucra la aceptación de que algunos cambios en el clima son inevitables y la toma de acciones para mitigar los impactos negativos de esos cambios. Es-

tas medidas de adaptación no son actividades para reducir emisiones, sino más bien acciones tomadas a un nivel local para proteger especies, hábitats o comunidades de los impactos del cambio climático (vea el informe 'Adaptación al cambio climático: opciones para las tortugas marinas'). Poner en acción respuestas de adaptación pronto, nos comprará algún tiempo y pondrá a las tortugas marinas y sus hábitats en una mejor condición para soportar las magnitudes mayores de los cambios anticipados, sin importar en qué momento exacto se alcanzarán ciertos umbrales. Los costos de las medidas de adaptación serán menores cuanto más pronto sean implementadas, al punto que la acción de remedio sea minimizada.

Hay muchas acciones que pueden ser utilizadas para reducir la vulnerabilidad de las tortugas marinas y sus hábitats. Las costas de muchos países del Caribe están bajo intensa presión por el desarrollo costero, que puede reducir condiciones de idoneidad de estas áreas para las tortugas marinas. Las medidas que restrinjan el desarrollo al lado de la playa o que impongan regulaciones de distanciamiento que limitan qué tan cerca están los edificios a la línea de marea alta, pueden ser beneficiosas en el mantenimiento de áreas adecuadas de anidación, en el advenimiento de un aumento en el nivel del mar. Alternativamente, la adaptación al cambio climático puede involucrar el manejo directo de tortugas marinas y sus hábitats, por ejemplo proporcionando áreas sombreadas artificialmente o restaurando la vegetación natural para sombreado, o moviendo nidos a sitios más frescos en la playa o a criaderos. Al final, la decisión de implementar cualquier medida de adaptación en particular dependerá de circunstancias locales y de lo adecuado de esa acción para las condiciones específicas logísticas y de la sociedad. Sin embargo, hay estrategias 'sin arrepentimientos' que pueden ser puestas en marcha ahora para asegurar que se mantenga suficiente hábitat adecuado en el futuro para sostener a las poblaciones de tortugas marinas. Como mínimo, sería prudente maximizar el potencial de las tortugas marinas para adaptarse naturalmente, asegurándose de que haya un ámbito de condiciones de anidación disponibles, en términos de diferentes playas y condiciones adecuadas en las playas utilizadas actualmente, evitando la eliminación de la vegetación natural y manejando playas de manera que se minimice la necesidad de nutrir las playas.

Pasos siguientes

Junto con los cambios en temperatura y precipitación, una amenaza adicional del cambio climático a las áreas de anidación viene del aumento en el nivel del mar, particularmente en áreas desarrolladas. La siguiente fase del proyecto incluirá un análisis del cambio proyectado en el nivel del mar a un nivel regional. Más aún, conforme más datos de las proyecciones climáticas regionales, distribución de infraestructura y otras amenazas, y biología de tortugas se hagan disponibles, éstos se incluirán en la herramienta de análisis de vulnerabilidad en línea.

Referencias

- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Bertensen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T. F., Whetton, P., R.A., W., and Wratt, D. (2007) Technical Summary. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., eds)
- Parmesan, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* **37**, 637-669
- Lutcavage, M. E., Plotkin, P., Witherington, B., and Lutz, P. L. (1997) Human impacts on sea turtle survival. In *The biology of sea turtles*. (Lutz, P. L., and Musick, J. A., eds) pp. 387-410, CRC Marine Science Series, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Miller, J. D. (1997) Reproduction in Sea Turtles. In *The Biology of Sea Turtles*. (Lutz, P. L., and Musick, J. A., eds) pp. 51-82, CRC Marine Science Series, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Solow, A. R., Bjørndal, K. A., and Bolten, A. B. (2002) Annual variation in nesting numbers of marine turtles: the effect of sea surface temperature on re-migration intervals. *Ecology Letters* **5**, 742-746
- Hawkes, L. A., Broderick, A. C., Godfrey, M. H., and Godley, B. J. (2009) Climate change and marine turtles. *Endangered Species Research* **7**, 137-154
- Ackerman, R. A. (1997) The nest environment and the embryonic development of sea turtles. In *The biology of sea turtles* (Lutz, P. L., and Musick, J. A., eds) Vol. 1 pp. 83-106, CRC Press, Boca Raton, FL
- Mrosovsky, N., and Yntema, C. L. (1980) Temperature dependence of sexual differentiation in sea turtles: Implications for conservation practices. *Biological Conservation* **18**, 271-280
- Glen, F., Broderick, A. C., Godley, B. J., and Hays, G. C. (2003) Incubation environment affects phenotype of naturally incubated green turtle hatchlings. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **83**, 1183-1186
- Hewavisenthi, S., and Parmenter, C. J. (2002) Incubation environment and nest success of the flatback turtle (*Natator depressus*) from a natural nesting beach. *Copeia* **2002**, 302-312
- Burgess, E. A., Booth, D. T., and Lanyon, J. M. (2006) Swimming performance of hatchling green turtles is affected by incubation temperature. *Coral Reefs* **25**, 341-349
- Booth, D. T., and Astill, K. (2001) Incubation temperature, energy expenditure and hatchling size in the green turtle (*Chelonia mydas*), a species with temperature-sensitive sex determination. *Australian Journal of Zoology* **49**, 389-396
- Mrosovsky, N. (1988) Pivotal temperatures for loggerhead turtles from northern and southern nesting beaches. *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie* **66**, 661-669
- Mortimer, J. A. (1987) Reproduction and migrations of the Ascension Island green turtle (*Chelonia mydas*). *Copeia* **1987**, 103-113
- Dobbs, K. A., Miller, J. D., Limpus, C. J., and Landry, A. M., Jr. (1999) *Hawksbill turtle, Eretmochelys imbricata, nesting at Milman Island, Northern Great Barrier Reef, Australia*
- Witzell, W. N. (1983) Synopsis of biological data on the hawksbill turtle *Eretmochelys imbricata* (Linnaeus, 1766). *FAO Fisheries Synopsis* **137**, 1-78
- Richard, J. D., and Hughes, D. A. (1972) Some observation of sea turtle nesting activity in Costa Rica. *Marine Biology* **16**, 297-309
- Plotkin, P. (1995) Independent vs. socially facilitated migrations of the olive ridley, *Lepidochelys olivacea*. *Marine Biology* **122**, 137-143
- Chaloupka, M. (2001) Historical trends, seasonality and spatial synchrony in green sea turtle egg production. *Biological Conservation* **101**, 263-279
- Girondot, M., and Fretey, J. (1996) Leatherback turtles, *Dermochelys coriacea*, nesting in French Guiana, 1978-1995. *Chelonian Conservation and Biology* **2**, 204-208
- Frazier, J. (1979) Niche separation in Indian Ocean turtles. *American zoologist* **19**, 955
- Horrocks, J. A., and Vermeer, L. A. (1995) Environmental correlates of nesting and hatching seasonality of hawksbill turtles (*Eretmochelys imbricata*) in Barbados. In *Proceedings of the Twelfth Annual Workshop on Sea Turtle Biology and Conservation; NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-361*, 274 (Richardson, J. I., and Richardson, T. H., eds) pp. 200-202
- Bilinski, J. J., Reina, R. D., Spotlita, J. R., and Paladino, F. V. (2001) The effects of nest environment on calcium mobilization by leatherback turtle embryos (*Dermochelys coriacea*) during development. *Comp. Biochem. Physiol. A* **130**, 151-162
- Ackerman, R. A. (1980) Physiological and ecological aspects of gas exchange by sea turtle eggs. *American zoologist* **20**, 575-583
- Packard, G. C., Tracy, M. J., and Roth, J. J. (1977) The physiological ecology of reptilian eggs and embryos, and the evolution of viviparity within the Class Reptilia. *Biological Reviews* **52**, 71-105
- McGehee, M. A. (1990) Effects of moisture on eggs and hatchlings of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). *Herpetologica* **46**, 251-258
- Ozdemir, B., and Turkozhan, O. (2006) Hatching success of original and hatchery nests of the green turtle, *Chelonia mydas*, in northern Cyprus. *Turkish Journal of Zoology* **30**, 377-381
- Ozdemir, A., Turkozhan, O., and Guclu, O. (2008) Embryonic mortality in loggerhead turtle (*Caretta caretta*) nests: a comparative study on Fethiye and Goksu Delta Beaches *Turkish Journal of Zoology* **32**, 287-292
- Yalcin-Ozdilek, S., Ozdilek, H. G., and Ozaner, F. S. (2007) Possible influence of beach sand characteristics on green turtle nesting activity on Samandag Beach, Turkey. *Journal of Coastal Research* **23**, 1379-1390
- Matsuzawa, Y., Sato, K., Sakamoto, W., and Bjørndal, K. A. (2002) Seasonal fluctuations in sand temperature: effects on the incubation period and mortality of loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*) pre-emergent hatchlings in Minabe, Japan. *Marine Biology* **140**
- Houghton, J. D. R., Myers, A. E., Lloyd, C., King, R. S., Isaacs, C., and Hays, G. C. (2007) Protracted rainfall decreases temperature within leatherback turtle (*Dermochelys coriacea*) clutches in Grenada, West Indies: Ecological implications for a species displaying temperature dependent sex determination. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **345**, 71-77
- LeBlanc, A. M., and Wibbels, T. (2009) Effect of daily water treatment on hatchling sex ratios in a turtle with temperature-dependent sex determination. *Journal of Experimental Zoology Part A-Ecological Genetics and Physiology* **311A**, 68-72
- Stute, M., Clement, A., and Lohmann, G. (2001) Global climate models: Past, present, and future. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **98**, 10529-10530

34. Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioic, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., and Whetton, P. (2007) Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., eds), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
35. Nakićenović, N. (2000) Greenhouse gas emissions scenarios. *Technological forecasting and social change* 65, 149-166
36. Nakićenović, N., and Swart, R. (2000) Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 599 pp. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
37. Taylor, M. A., Centella, A., Charlery, J., Borrajero, I., Bezanilla, A., Campbell, J., Rivero, R., Stephenson, T. S., Whyte, F., and Watson, R. (2007) Glimpses of the Future: A Briefing from the PRECIS Caribbean Climate Change Project, Caribbean Community Climate Change Centre, Belmopan, Belize. 24 pp. .
38. Jones, R. G., Noguer, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S. S., Jenkins, G. J., and Mitchell, J. F. B. (2004) Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. p. 40. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK
39. Dow, W. E., Eckert, K. L., Palmer, M., and Kramer, P. (2007) *An Atlas of Sea Turtle Nesting Habitat for the Wider Caribbean Region*. The Wider Caribbean Sea Turtle Conservation Network and The Nature Conservancy. WIDECAS Technical Report No. 6. Beaufort, North Carolina. p. 267, plus electronic appendices
40. Read, A. J., Halpin, P. N., Crowder, L. B., Best, B. D., and Fujioka, E. (2007) A spatial database of sea turtle nesting habitat for the Wider Caribbean Region. In *OBIS-SEAMAP: mapping marine mammals, birds and turtles. World Wide Web electronic publication*.
41. Hays, G. C., Ashworth, J. S., Barnsley, M. J., Broderick, A. C., Emery, D. R., Godley, B. J., Henwood, A., and Jones, E. L. (2001) The importance of sand albedo for the thermal conditions on sea turtle nesting beaches. *Oikos* 93, 87-94
42. Reece, S. E., Broderick, A. C., Godley, B. J., and West, S. A. (2002) The effects of incubation environment, sex and pedigree on the hatchling phenotype in a natural population of loggerhead turtles. *Evolutionary Ecology Research* 4, 737-748
43. Kraemer, J. E., and Bell, R. (1980) Rain-induced mortality of eggs and hatchlings of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) on the Georgia coast. *Herpetologica* 36, 72-77
44. Prange, H. D., and Ackerman, R. A. (1974) Oxygen consumption and mechanism of gas exchange of green turtle (*Chelonia mydas*) eggs and hatchlings. *Copeia* 1974, 758-763
45. Ragotzkie, R. A. (1959) Mortality of loggerhead turtle eggs from excessive rainfall. *Ecology* 40, 303-305
46. Houghton, J. D. R., and Hays, G. C. (2001) Asynchronous emergence by loggerhead turtle (*Caretta caretta*) hatchlings. *Naturwissenschaften* 88, 133-136
47. Speakman, J. R., Hays, G. C., and Lindblad, E. (1998) Thermal conductivity of sand and its effect on the temperature of loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*) nests. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 78, 1337-1352
48. Hays, G. C., Broderick, A. C., Glen, F., and Godley, B. J. (2003) Climate change and sea turtles: a 150-year reconstruction of incubation temperatures at a major marine turtle rookery. *Global Change Biology* 9, 642-646
49. Hays, G. C., Mackay, A., Adams, C. R., Mortimer, J. A., Speakman, J. R., and Boerema, M. (1995) Nest site selection by sea turtles. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 75, 667-674
50. Wilson, D. (1998) Nest-site selection: microhabitat variation and its effects on the survival of turtle embryos. *Ecology* 79, 1884-1892
51. Rees, A. F., and Margaritoulis, D. (2004) Beach temperatures, incubation durations and estimated hatchling sex ratio for loggerhead sea turtle nests in southern Kyparissia Bay, Greece. *Testudo* 6, 23-36
52. Glen, F., and Mrosovsky, N. (2004) Antigua revisited: the impact of climate change on sand and nest temperatures at a hawksbill turtle (*Eretmochelys imbricata*) nesting beach. *Global Change Biology* 10, 2036-2045
53. McLachlan, A., and Brown, A. C. (2006) *The ecology of sandy shores*. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands
54. Schaetzl, R. J., and Anderson, S. (2005) *Soils: Genesis and Geomorphology*, Cambridge University Press, Cambridge, UK
55. Hawkes, L. A., Broderick, A. C., Godfrey, M. H., and Godley, B. J. (2007) Investigating the potential impacts of climate change on a marine turtle population. *Global Change Biology* 13, 923-932
56. Janzen, F. J. (1994) Climate-change and temperature-dependent sex determination in reptiles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 91, 7487-7490
57. Davenport, J. (1997) Temperature and the life-history strategies of sea turtles. *Journal of Thermal Biology* 22, 479-488
58. Frankham, R. (1995) Conservation genetics. *Annual Review of Genetics* 29, 305-327
59. Coyne, M. S. (2000) Population sex ratio of the Kemp's ridley sea turtle (*Lepidochelys kempii*): problems in population modeling. PhD thesis. p. 136, Texas A&M University
60. Smith, A. W. S., and Trembanis, A. C. (2001) Beach hardness variation - New moisture related phenomenon and a case study from Byron Bay, Australia. *Journal of Coastal Research* 17, 869-876
61. Hendrickson, J. R. (1958) The green sea turtle, *Chelonia mydas* (Linn.) in Malaya and Sarawak. *Proceedings of the Zoological Society London* 130, 455-535
62. Moorhouse, F. W. (1933) Notes on the green turtle (*Chelonia mydas*). *Rep. Great Barrier Reef Comm.* 4, 1-22
63. Gienapp, P., Teplitsky, C., Alho, J. S., Mills, J. A., and Merila, J. (2008) Climate change and evolution: disentangling environmental and genetic responses. *Molecular Ecology* 17, 167-178
64. Bradshaw, W. E., and Holzapfel, C. M. (2008) Genetic response to rapid climate change: it's seasonal timing that matters. *Molecular Ecology* 17, 157-166
65. Charmantier, A. (2008) Adaptive phenotypic plasticity in response to climate change in a wild bird population. *Science* 320, 800-802
66. Bradshaw, W. E., and Holzapfel, C. M. (2009) Evolutionary response to rapid climate change. *Science* 312, 1477-1478
67. Hendry, A. P., Farrugia, T. J., and Kinnison, M. T. (2008) Human influences on rates of phenotypic change in wild animal populations. *Molecular Ecology* 17, 20-29
68. Spotila, J. R., Reina, R. D., Steyermark, A. C., Plotkin, P., and Paladino, F. V. (2000) Pacific leatherback turtles face extinction. *Nature* 405, 529-530

WWF es una de las organizaciones independientes de conservación más grandes y con mayor experiencia en el mundo. WWF nació en 1961 y es conocida por el símbolo del panda. Cerca de 5 millones de personas cooperan con WWF, y cuenta con una red mundial que trabaja en más de 100 países.

WWF trabaja por un planeta vivo y su misión es detener la degradación ambiental de la Tierra y construir un futuro en el que el ser humano viva en armonía con la naturaleza:



- Conservando la diversidad biológica mundial
- Asegurando que el uso de los recursos naturales renovables sea sostenible
- Promoviendo la reducción de la contaminación y del consumo desmedido

WWF Centroamérica

Teléfono: +506 2234 8434

Fax: +506 2253 4927

Correo electrónico:

info@wwfca.org

Apdo. Postal: 629-2350

San Francisco de Dos Ríos,
San José, Costa Rica

**www.
panda.org
/lac/marineturtles**