

Revista mensual sobre la actualidad ambiental ISSN 1409 214X N° 165 JUNIO 2007

# AMBIENTICO

*cambio climático  
ecosistemas  
y gente*

EDICIÓN HECHA EN  
COLABORACIÓN CON  
INISEFOR

## SUMARIO

- 3 Daniel Ballestero  
[PAPEL DEL OCÉANO EN EL CICLO GLOBAL DEL CARBONO. EL CASO DEL PACÍFICO CENTROAMERICANO](#)
- 6 Eric Alfaro  
[PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL AIRE EN CENTROAMÉRICA](#)
- 11 Jonathan Castro  
[FIJACIÓN DE CARBONO Y AGRICULTURA ORGÁNICA](#)
- 15 Mary Moreno y Eric Alfaro  
[VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN COSTA RICA](#)
- 19 Laura Benegas  
[METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA ADAPTACIÓN DE LOS PRODUCTORES A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN CUENCAS](#)
- 22 Carlos Pérez, B. Locatelli, R. Vignola y P. Imbach  
[INTEGRAR LOS BOSQUES TROPICALES EN LAS POLÍTICAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO](#)
- 25 Efraín Leguía, B. Locatelli, P. Imbach, F. Alpízar, R. Vignola y C. Pérez  
[IDENTIFICACIÓN DE BOSQUES PROVEEDORES DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PARA HIDROELECTRICIDAD EN NICARAGUA](#)
- 28 Edwin Alpízar  
[VULNERABILIDAD DE BOSQUES ANTE CAMBIO CLIMÁTICO PUEDE SIMULARSE CON SISTEMA DE ZONAS DE VIDA](#)
- 31 Lilliana Piedra y Kattia Piedra  
[PREVISIBLE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL MANGLAR GUACALILLO, COSTA RICA](#)
- 35 Alejandro Yáñez-Arancibia, J. W. Day, R. R. Twilley y W. J. Mitsch  
[ENFOQUE ECOSISTÉMICO PARA RESTAURAR HUMEDALES COSTEROS ANTE LOS CAMBIOS GLOBALES](#)
- 39 Edwin Alpízar  
[CAMBIO CLIMÁTICO CONTRA TORTUGAS MARINAS](#)
- 41 Roberto Villalobos  
[ADAPTACIÓN DEL SISTEMA HÍDRICO AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL NOROESTE DEL ÁREA METROPOLITANA](#)
- 44 Centro Científico Tropical  
[PROYECTO AMIGABLE CON EL CAMBIO CLIMÁTICO: ACCIONES PARA COMPENSAR EMISIONES DE CO<sub>2</sub>](#)

Foto portada: Hiro

## La ira de la naturaleza se ve hoy en el clima

Como ya todo prójimo sabe, el cambio climático que padece ahora el planeta está caracterizado por el calentamiento global, que es generado por el llamado efecto invernadero. Éste es un fenómeno natural que ocurre en la Tierra por la presencia en la atmósfera de gases como el dióxido de carbono y el vapor de agua (y varios más), que dejan pasar hacia la superficie terrestre la radiación solar, porque ante ella son transparentes, pero dificultan que la radiación terrestre resultante sea liberada, porque ante ella son absorbentes, obteniéndose como saldo que el calor producido en la superficie terrestre por el Sol sea capturado (en su calidad de radiación de onda larga) en los niveles inferiores de la atmósfera por una capa de gases que lo reemiten a la superficie terrestre, manteniéndose allí... El efecto invernadero, originalmente un fenómeno natural y benigno de la Tierra, ha empezado a ser un fenómeno de causa antrópica debido a la quema masiva de combustibles fósiles que empezó a fines del siglo XVIII con la revolución industrial. Desde mediados del siglo XIX hasta hoy la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha pasado de 280 a 360 partes por millón. El calentamiento global ha obligado ya a numerosas especies a desplazarse altitudinalmente y a varias las ha extinguido, ha trastocado los ciclos biológicos de otras y ha afectado también la agricultura y muchas más actividades humanas vitales. La galopante deforestación y los incendios forestales han sido otros factores agravantes de tal proceso. Tanta agresión a la naturaleza parece haber desatado su ira, esta vez desarreglando brutalmente el clima.

Los países americanos presentan ventajas comparativas en cuanto a las muy necesarias reducción y mitigación de gases de efecto invernadero, porque aún cuentan con mucho bosque que, inteligente y responsablemente, puede convertirse en redituable sin ser afectado en tanto tal, manteniendo su capacidad de capturar y fijar carbono, y rechazando de paso otros usos del suelo coadyuvantes del cambio climático. Ante este panorama, la red Efecto de los Cambios Globales sobre los Humedales de Iberoamérica, del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Cyted), y el Instituto de Investigación y Servicios Forestales (Inisefor) de la Universidad Nacional convocaron, para la última semana de julio-2007, a un seminario iberoamericano en torno a los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas y a las posibilidades y realidades del secuestro de carbono por diversos tipos de ecosistemas. Esta edición de *Ambientico*, hecha conjuntamente con el Inisefor, recoge materiales que serán presentados en dicho evento.

### AMBIEN

Revista mensual sobre la actualidad ambiental

Director y editor Eduardo Mora

Consejo editor Manuel Argüello, Gustavo Induni, Wilberth Jiménez, Luis Poveda

Fotografía Alfredo Huerta [salvo señalamientos]

Asistencia, administración y diagramación Rebeca Bolaños

Teléfono: 277-3688. Fax: 277-3289

Apartado postal: 86-3000, Costa Rica.



# Papel del océano en el ciclo global del carbono. El caso del Pacífico centroamericano

DANIEL BALLESTERO

El alto contenido de oxígeno y el bajo contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera terrestre son consecuencia, en primer lugar, de la actividad fotosintética de las plantas terrestres y marinas, donde se consume  $\text{CO}_2$  para producir materia orgánica (producción primaria) y oxígeno. Sin embargo, la composición atmosférica no es simplemente el resultado de la actividad biológica de las plantas vivientes, ya que los procesos de degradación de la materia orgánica consumen oxígeno y retornan  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. La acumulación de oxígeno y la disminución de  $\text{CO}_2$  atmosféricos se deben a que, durante decenas de millones de años, una pequeña fracción del carbono ha sido exportada a los sedimentos del fondo marino en forma de carbono orgánico o en las estructuras de carbonato de calcio de organismos marinos, como resultado de la circulación global oceánica y de la actividad biológica. El carbono depositado en las grandes profundidades es así removido del contacto con la atmósfera por largos intervalos de tiempo. La tabla 1, derivada de datos de McCarthy *et al.* (1987) y de IPCC (2001), describe la distribución de reservas de carbono del planeta entre sus principales compartimientos. Se observa que la mayor reserva está sepultada en los sedimentos marinos, la cantidad total de carbono contenida en el agua oceánica es 50 veces mayor que en la atmósfera, y la cantidad almacenada en combustibles fósiles, de los que se ha estado inyectando una pequeña fracción en la atmósfera, principalmente desde comienzos de la era industrial, es unas siete veces mayor que el carbono atmosférico. El registro geológico está dominado por la productividad biológica marina: las plantas terrestres han dejado una reserva de carbón de solo  $3\text{-}7 \times 10^3$  Gt C, cuatro órdenes de magnitud menor a las rocas de carbonatos derivadas de la vida marina.

**Tabla 1: Principales reservas de carbono**

Reservas de carbono	Cantidad (GT C)
Atmósfera	730
Total inorgánico (océanos)	38000
Orgánico (océanos)	3
Sedimentos marinos (orgánico)	10 000 000
Sedimentos marinos (Carbonato de Calcio)	50 000 000
Biomasa terrestre	600
Humus	1500
Combustibles fósiles	5000
GT C = $10^9$ toneladas de carbono	

Claramente, el océano es el gran depósito de carbono planetario y ha sido determinante en la regulación del clima. Más aun, la capacidad del océano para almacenar  $\text{CO}_2$  podría jugar un papel importante para atenuar la perturbación antropogénica de la composición atmosférica. Cubriendo el 70 por ciento de la superficie del planeta y con 3,8 km de profundidad promedio, se calcula que el océano tiene capacidad para almacenar entre el 70 y el 80 por ciento del  $\text{CO}_2$  antropogénico introducido en la atmósfera, aunque se requerirían varios siglos para llegar a esa situación (IPCC 2001). Efectivamente, el océano ha absorbido una buena parte de las emisiones antropogénicas de  $\text{CO}_2$  desde tiempos preindustriales, que se ha reflejado en un aumento del carbono inorgánico disuelto en el mar de 118 Gt entre 1750 y 1994 y de 53 Gt entre 1980 y 2005 (Bindoff *et al.* 2007). Estas cantidades representan un 42 por ciento y un 37 por ciento, respectivamente, de las emisiones antropogénicas de cada período.

La capacidad del océano para absorber y almacenar  $\text{CO}_2$  está cambiando como consecuencia del aumento de  $\text{CO}_2$  atmosférico y del calentamiento planetario. Por ejemplo, la absorción oceánica neta de  $\text{CO}_2$  atmosférico ha disminuido de 1,9 Gt por año en los años ochenta a 1,7 Gt por año en los años noventa (Bindoff *et al.* 2007). La absorción oceánica de  $\text{CO}_2$  antropogénico es un proceso controlado física y químicamente, superpuesto a un ciclo

del carbón impulsado biológicamente, aproximadamente en estado estacionario. Los posibles cambios futuros en la capacidad oceánica de absorción y almacenamiento de CO<sub>2</sub> han sido clasificados por IPCC (2001) en cambios físico-químicos y cambios asociados al ciclo biológico del carbono.

Más de la mitad del carbono antropogénico capturado por el mar desde 1750 se encuentra en los 400 metros superiores de la columna de agua y es casi indetectable en aguas profundas, debido a que el transporte de carbono desde la superficie hacia el fondo del océano requiere desde decenas de años hasta varios siglos. La notable alteración de la química del carbono al aumentar la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en la capa superior del mar reduce la capacidad de absorción oceánica de CO<sub>2</sub> atmosférico.

Como consecuencia de la estratificación natural del océano, la proporción de CO<sub>2</sub> antropogénico que puede ser absorbido disminuye con el aumento de la rapidez de las emisiones debido a la limitada capacidad de exposición del agua profunda al CO<sub>2</sub> del aire.

Como consecuencia del calentamiento del océano, la absorción de CO<sub>2</sub> atmosférico disminuirá debido a que la solubilidad del CO<sub>2</sub> disminuye con el aumento de la temperatura del agua. Además, el calentamiento aumenta la estratificación del mar, con lo que el volumen efectivo de agua en contacto con el aire disminuirá, reduciéndose entonces la absorción de CO<sub>2</sub>.

Las regiones del océano conocidas como de *alto contenido de nutrientes y baja clorofila (hnlc* por sus siglas en inglés), donde el contenido de los principales macro nutrientes (particularmente nitrato) es suficientemente alto para sostener una población de fitoplancton mayor a la existente, tienen el potencial para modificar la magnitud del almacenamiento de carbono y la producción exportada (la fracción de la producción primaria que no es respirada en la capa superior y se exporta hacia la profundidad del océano). En zonas *hnlc* la productividad primaria está usualmente limitada por hierro (Fe), necesario en el proceso de fotosíntesis, y los eventuales cambios podrían estar asociados a cambios en las regiones donde se exporta Fe hacia el océano: aumentos en la erosión podrían resultar en aumentos en el aporte eólico de Fe al océano, en tanto que un ciclo hidrológico aumentado lo podría disminuir.

El aumento en la estratificación oceánica debida al calentamiento podría reducir la introducción de nutrientes de las capas profundas hacia la capa superficial donde ocurre la fotosíntesis. El impacto de este cambio dependerá del factor limitante de la productividad primaria: en zonas limitadas por el aporte de nutrientes la estratificación disminuirá la productividad primaria y la magnitud del carbono exportado, mientras que en las zonas limitadas por la disponibilidad de luz, el aumento de la estratificación aumentará la exposición a la radiación solar y consecuentemente la productividad primaria. Recientes observaciones muestran que la producción primaria neta en el océano global en bajas latitudes, donde la temperatura media anual de la superficie del mar es mayor a 15 ° C, ha disminuido en forma sostenida desde 1999 (Behrenfeld *et al.* 2006), coincidiendo con el aumento en la temperatura y la estratificación de la capa superior del mar resultante de condiciones ambientales más cálidas.

Cambios en el aporte de los principales nutrientes limitantes (N, P, Fe, Si) desde los ríos, la atmósfera o fuentes sedimentarias, o cambios en la intensidad de la remoción (por ejemplo desnitrificación) pueden modificar el contenido total de nutrientes del océano y la cantidad de carbono exportado.

Cambios en la temperatura, cobertura nubosa, disponibilidad de nutrientes, dinámica de la capa superior del mar y extensión del hielo marino pueden modificar la estructura y biogeoquímica de los ecosistemas marinos. Modificaciones en la composición de especies del fitoplancton marino pueden alterar la distribución de carbono entre el océano y la atmósfera.

**E**l flujo de CO<sub>2</sub> entre el océano y la atmósfera en el Pacífico centroamericano, al este de 120 °O y entre las latitudes 0 °N y 20 °N, está modulado principalmente por la presencia del domo de Costa Rica y el efecto de los *jets* de viento de Panamá, Papagayo en Costa Rica y Nicaragua y Tehuantepec en México.

El domo de Costa Rica es un centro de afloramiento (levantamiento de agua profunda hacia la superficie) oceánico permanente, centrado en 9 °N, 90 °O (a unos 500 km al oeste del golfo de Papagayo), donde agua profunda, fría y rica en CO<sub>2</sub> y macro nutrientes (nitrato, fosfato y silicato) asciende hacia la capa superior del mar donde hay suficiente radiación solar para el proceso de fotosíntesis. Durante el verano, entre junio y agosto, el domo de Costa Rica está claramente definido como un centro oceánico de alta productividad primaria separado de la costa centroamericana.

En el invierno, durante la estación seca, con la intensificación de los vientos alisios y la incursión de sistemas de alta presión provenientes de Norteamérica en el Caribe, soplan intensos vientos hacia el interior del Pacífico a través de las interrupciones de la cordillera centroamericana de Tehuantepec (México), Papagayo (Costa Rica-Nicaragua) y Panamá. El efecto de esos vientos sobre el mar es introducir agua profunda fría, rica en nutrientes y CO<sub>2</sub> en la capa superior, a lo largo del eje del chorro, por afloramiento y mezcla vertical turbulenta, estimulando la productividad primaria. El viento de Papagayo se extiende sobre el domo de Costa Rica, deprimiéndolo en su flanco norte y reforzándolo en su flanco sur, con lo cual la zona de alta productividad primaria del domo de Costa Rica aparece unida a la costa de Centroamérica durante esa parte del año.

El flujo de CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y el océano en esta región es aproximadamente neutro en el balance anual y está controlado por los siguientes procesos: (1) afloramiento de agua fría con alto contenido de CO<sub>2</sub>, (2) calentamiento del agua aflorada en la superficie del mar, (3) el viento y (4) la absorción biológica de CO<sub>2</sub> por el fitoplancton. Donde el agua fría cargada de CO<sub>2</sub> aflora, la presión parcial de CO<sub>2</sub> del agua aumenta sobre el valor atmosférico y el gas se difunde desde el mar hacia el aire. El calentamiento del agua reduce la solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua y el flujo hacia la atmósfera aumenta, en tanto que el viento incrementa el flujo del intercambio de CO<sub>2</sub> entre el mar y el aire. Por otro lado, donde el CO<sub>2</sub> es utilizado por el fitoplancton en la fotosíntesis, la presión parcial de CO<sub>2</sub> en el agua puede disminuir por debajo del valor atmosférico y el flujo de CO<sub>2</sub> se dirige desde el aire hacia el mar.

El Pacífico centroamericano es una zona *hnlc* donde la producción fotosintética impulsada por los nutrientes introducidos en la capa superior desde la profundidad no agota los nutrientes disponibles. La distribución media climatológica de nitratos (NO<sub>3</sub>) a 20 m de profundidad en la zona de interés (figura 1.a) ilustra claramente esta situación. Nótese que la concentración de NO<sub>3</sub> a 20 m cerca de la costa centroamericana, particularmente en la zona bajo la influencia del viento de Papagayo y, en menor medida, más al norte en Tehuantepec, es notablemente mayor que en la zona ecuatorial, donde hay afloramiento permanente forzado por el régimen sinóptico de vientos. Por otro lado, la distribución de NO<sub>3</sub> en la superficie (mostrado en la figura 1.b) revela que, en la zona bajo la influencia directa del viento, la concentración de NO<sub>3</sub> es menor que en la zona ecuatorial. Evidentemente, la productividad fotosintética utiliza los nutrientes más exhaustivamente donde el viento de Papagayo y Tehuantepec depositan hierro sobre la superficie del mar, el elemento que limita la productividad en esta región del océano.

La importancia del aporte eólico de Fe como regulador de la magnitud de la productividad primaria en esta región sugiere que, potencialmente, podría alterarse el balance neutro de intercambio de CO<sub>2</sub> océano-atmósfera actual, probablemente transformando la región en sumidero de CO<sub>2</sub> atmosférico.

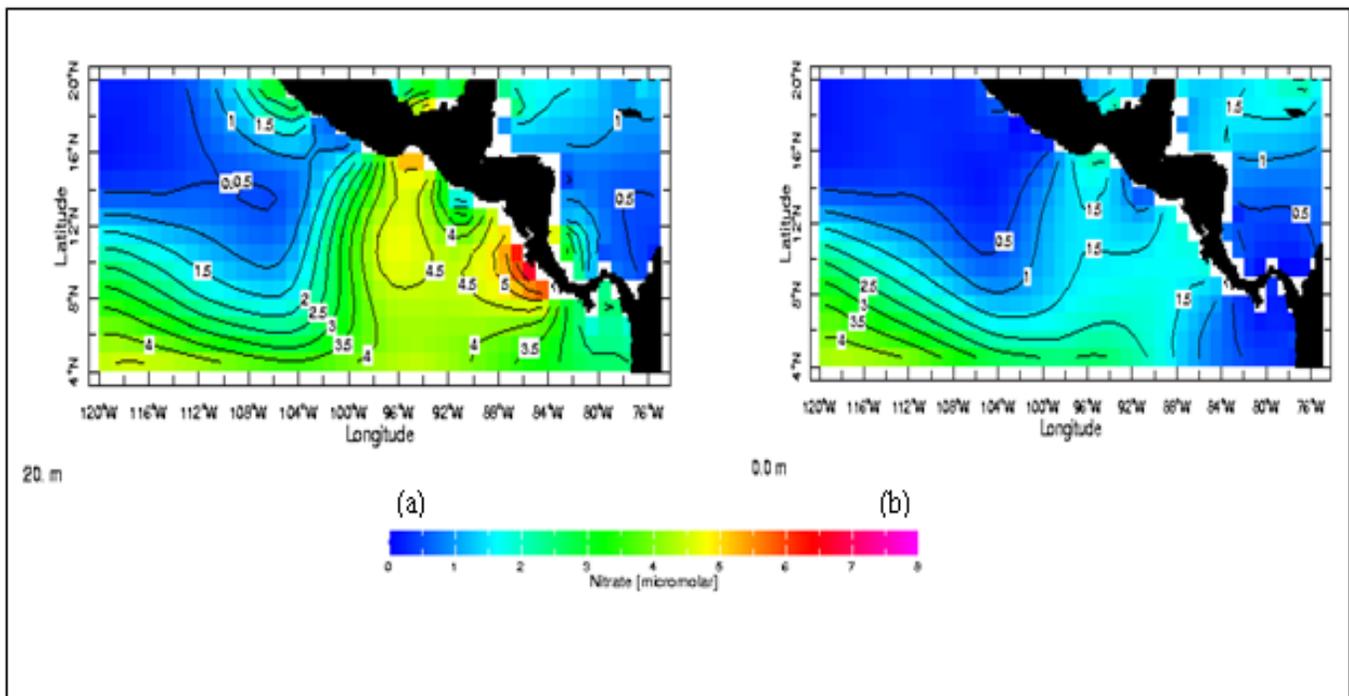


Figura 1: Valor medio climatológico de concentración de NO<sub>3</sub> 20 m (a) y 0 m (b) (datos de NOAA 2001)

#### Referencias bibliográficas

- Behrenfel, M. J. *et al.* "Climate-driven trends in contemporary ocean productivity", en *Nature* 444, 2006.
- Bindoff, N. L. *et al.* "Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level", en Solomon, S. *et al.* (eds.). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. United Kingdom - New York.
- IPCC. 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. United Kingdom - New York.
- McCarthy, J., P. Brewer y G. Feldman. 1987. *Global Ocean Flux*.
- NOAA 2001. NODC WOA01. *World Ocean Atlas 2001*.





# Predicción climática de la temperatura superficial del aire en Centroamérica

ERIC J. ALFARO

El sistema climático es un recurso natural fundamental para la Tierra integrado por cinco componentes: la atmósfera terrestre, los océanos, la biosfera terrestre y marina, la criosfera y la superficie terrestre (Barry y Carleton 2001). Atención particular recibe la interacción del océano con el otro componente donde vive el hombre, la atmósfera, por lo que se le estudia sistemáticamente para mejorar las predicciones del clima y mitigar desastres naturales como inundaciones y olas de calor (Chase y Barry 2003). La variabilidad climática, inherente al sistema climático, es la variación entre un número de estados climáticos de la misma clase; en otras palabras, fluctuaciones en las propiedades estadísticas sobre períodos de días, semanas, meses o años. Los eventos fuera de estos límites pueden ser vistos como anómalos a un cierto nivel de significación. Cuando los cambios en la variabilidad del sistema se mantienen a lo largo de centurias es que hablamos de cambio climático (Barry y Chorley 2003).

Lo anterior es muy importante debido a que el clima no siempre se mantiene dentro de los límites que las instituciones sociales esperan. Un evento climático extremo de baja probabilidad puede ocurrir con inusitada frecuencia e incluso repetirse en pocos años. Es entonces que estamos ante un posible desastre climático. Cuando el conocimiento sobre el clima es pobre, la preparación ante posibles eventos puede ser baja y los mecanismos de enfrentamiento inadecuados, lo que puede provocar severos costos de orden ambiental, económico y social (Naranjo 2000, Hobbs 2005).

En el trabajo cuyos resultados aquí se exponen se usó un modelo basado en el análisis de correlación canónica (Soley y Alfaro 1999, Alfaro *et al.* 2006) para explorar las asociaciones climáticas y la predictibilidad de marzo-abril-mayo como el trimestre correspondiente al máximo del ciclo anual de la temperatura superficial del aire de 337 series de tiempo en Centroamérica (Alfaro 2000, Taylor y Alfaro 2005). Se usó como variables predictoras las temperaturas superficiales del mar en los océanos Atlántico y Pacífico de 1958 a 1998 (41 años). Alfaro (2000) señala que el ciclo anual de la temperatura superficial del mar en Centroamérica se puede clasificar como tropical y predominantemente marítimo, con cambios anuales pequeños y dependiente de la cobertura nubosa y la altitud.

Para la predicción de la temperatura superficial del mar de marzo-abril-mayo se consideraron los trimestres previos de temperatura superficial del mar: desde agosto-septiembre-octubre hasta febrero-marzo-abril, junto con el trimestre simultáneo ya descrito de marzo-abril-mayo (véase la habilidad estadística promedio de estos modelos en figura 1).

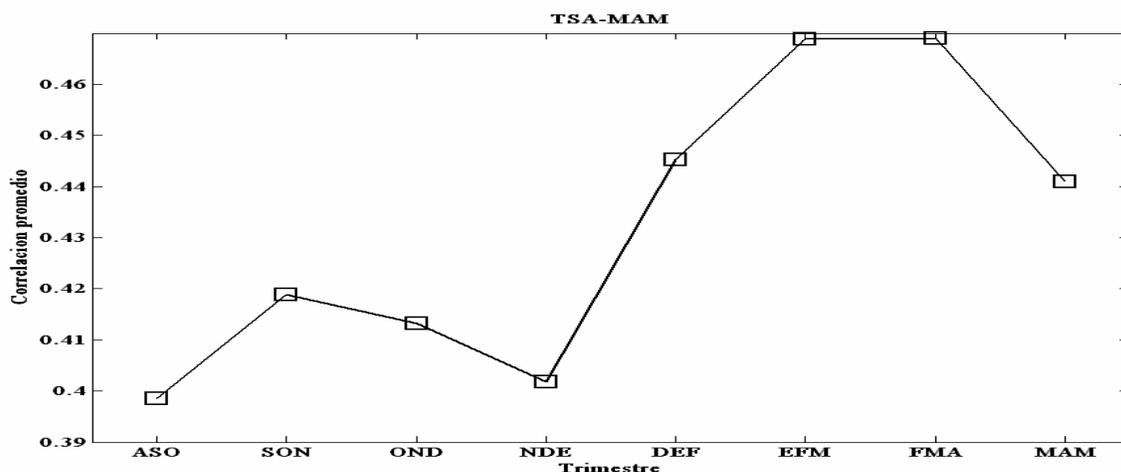


Figura 1. Habilidad estadística predictiva promedio del campo de precipitación en Centroamérica para la predicción de mar-abr-may (línea sólida con cuadros). Para la predicción de la temperatura superficial del mar de mar-abr-may, se consideraron los trimestres previos de temperatura superficial del mar desde ago-sept-oct hasta feb-mar-abr, junto con el trimestre simultáneo de mar-abr-may.

El valor más bajo de habilidad para la predicción de marzo-abril-mayo fue de 0,40, mientras que el más alto fue de 0,47, usando los trimestres de agosto-septiembre-octubre y febrero-marzo-abril como predictores, respectivamente. Se observó que la predictibilidad de marzo-abril-mayo está asociada principalmente con la variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico, siendo las temperaturas superficiales del mar del Atlántico una fuente de variabilidad secundaria (figura 2). Para este trimestre se notó que anomalías positivas (negativas) de las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico Ecuatorial Este (figura 2b) están asociadas con anomalías positivas (negativas) de la temperatura superficial sobre prácticamente todo el istmo centroamericano (figura 2c). En esta región la variabilidad climática de la temperatura superficial del mar está dominada por *El Niño-Oscilación del sur*.

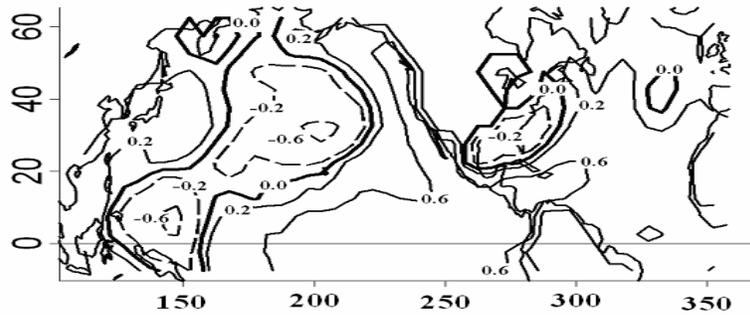


Figura 2b. Patrón espacial de correlaciones para el primer modo de la temperatura superficial del mar. El contorno más grueso es el de cero correlación. Las líneas sólidas son correlaciones positivas y las líneas a trazos son correlaciones negativas.

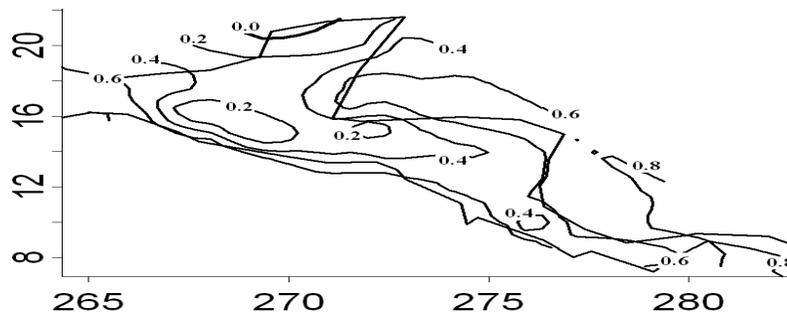


Figura 2c. Patrón espacial de correlaciones para el primer modo de la temperatura superficial del aire. El contorno más grueso es el de cero correlación.

El segundo modo del análisis de correlación canónica (figura 3) parece estar asociado con el cambio de fase de la *Oscilación decadal del Pacífico* alrededor de 1977, pero la evidencia estadística no fue lo suficientemente fuerte para sustentar esta hipótesis, por lo que se considera que capturó la tendencia presente en el sistema, que es una fuente importante de variabilidad (Alfaro *et al.* 2006).

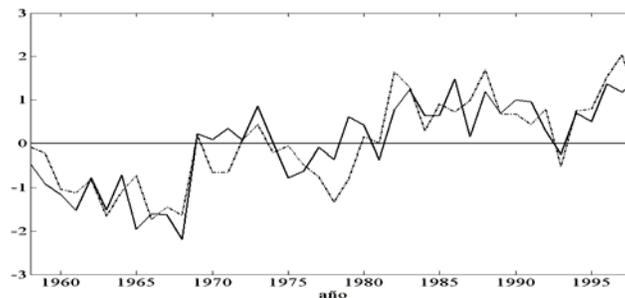


Figura 3. Series de tiempo normalizadas para los segundos modos del análisis de correlación canónica, con mar-abr-may para la temperatura superficial del aire usando la temperatura superficial del mar de dic-ene-feb. Las líneas sólidas corresponden a las series anuales de temperatura superficial del mar y las punteadas a las de temperatura superficial del aire. La correlación entre los modos es de 0,84, significativa al 95 por ciento de acuerdo con Davis (1976).

Por último, el tercer modo del análisis de correlación canónica (figura 4) estuvo influenciado más fuertemente por una especie de dipolo a través del istmo de las temperaturas superficiales del mar. Para este modo, signos opuestos de las anomalías en los océanos Atlántico y Pacífico, que circundan Centroamérica, estuvieron asociados con una notoria respuesta del campo de temperatura superficial del aire, donde anomalías positivas y negativas (negativas y positivas) de las temperaturas superficiales del mar en los océanos Pacífico y Atlántico Tropical, respectivamente, tienden a estar asociadas con lóbulos de anomalías positivas (negativas) de la temperatura superficial del aire, principalmente en Guatemala, Honduras, Nicaragua y Costa Rica (figuras 4b y 4c).

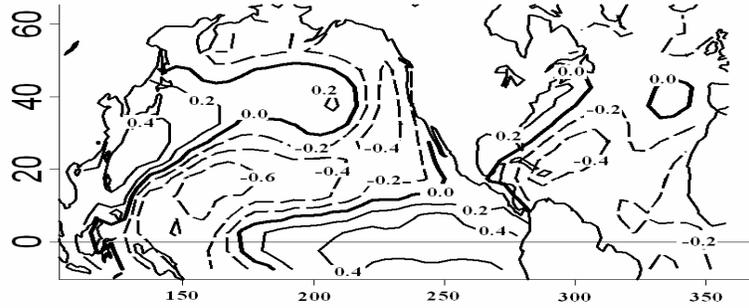


Figura 4b. Patrón espacial de correlaciones para el tercer modo de la temperatura superficial del mar. El contorno más grueso es el de cero correlación. Las líneas sólidas son correlaciones positivas y las líneas a trazos son correlaciones negativas.

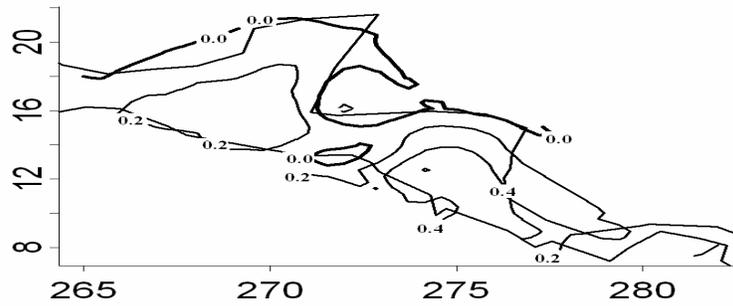


Figura 4c. Patrón espacial de correlaciones para el tercer modo de la temperatura superficial del aire. El contorno más grueso es el de cero correlación.

El primer modo (véase tabla y figura 2a, línea sólida), mostró una correlación, significativa al 99 por ciento, con el índice *El Niño 3*, mientras que el segundo modo (figura 3, línea sólida) no mostró ninguna correlación significativa con estos índices. La mejor correlación encontrada para el tercer modo (figura 4a, línea sólida) fue con la diferencia normalizada de los índices de *El Niño 3* y la *Oscilación decadal del Atlántico*, significativa al 99 por ciento. Cabe destacar que los modos superiores van mostrando patrones espaciales más desorganizados, relacionados con fuentes de variación más locales, por lo que los mismos no se muestran.

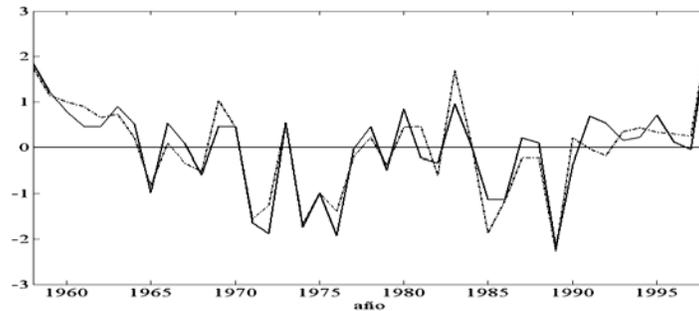


Figura 2a. Series de tiempo normalizadas para los primeros modos del análisis de correlación canónica, con mar-abr-may para la temperatura superficial del aire usando la temperatura superficial del mar de dic-ene-feb. Las líneas sólidas corresponden a las series anuales de temperatura superficial del mar y las de temperatura superficial del aire. La correlación entre los modos es de 0,93, significativa al 99 por ciento de acuerdo con Davis (1976).

Tabla 1. Correlaciones entre los tres primeros modos de temperatura superficial del mar y diferentes índices oceánicos. Las correlaciones son para las series de tiempo anuales del trimestre dic-ene-feb. La operación de suma o resta de los índices oceánicos se realiza sobre las series normalizadas para hacer comparables la variabilidad entre ellas. Se resaltan con negrita los valores máximos de cada columna. Los valores con uno y dos asteriscos son significativos al 95 y 99 por ciento de acuerdo con Davis (1976). Nomenclatura de los índices: odp = Oscilación decadal del Pacífico (Mantua et al. 1997); oma, Oscilación multidecadal del Atlántico (Enfield et al. 2001). El índice El Niño 3 corresponde a la región de 5 °S-5 °N y de 90-150 °W.

	Modos	Temp. sup. mar	Dic-ene-feb
Índices, dic-ene-feb	1	2	3
<i>ODP</i>	0,3812	<b>-0,272</b>	0,2497
<i>Oma</i>	0,6628(**)	0,0618	0,3252
<i>El Niño3</i>	<b>0,7511(**)</b>	-0,27(*)	-0,4895(**)
<i>El Niño3-oma</i>	0,0721	-0,2711	<b>-0,6656(**)</b>

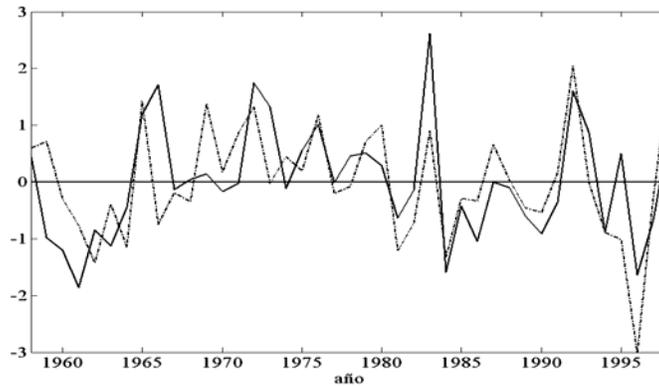


Figura 4a. Series de tiempo normalizadas para los terceros modos del análisis de correlación canónica, con mar-abr-may para la temperatura superficial del aire usando la temperatura superficial del mar de dic-ene-feb. Las líneas sólidas corresponden a las series anuales de temperatura superficial del mar y las punteadas a las de temperatura superficial del aire. La correlación entre los modos es de 0,63, significativa al 99 por ciento de acuerdo con Davis (1976).

Se realizó la validación cruzada de los resultados del modelo mostrando una habilidad predictiva estadísticamente significativa sobre un área importante de la región en estudio, exceptuando la península de Yucatán (figura 5). Por último, y como una forma de comparar los resultados obtenidos para marzo-abril-mayo con otras épocas de año, el ACC se empleó para calcular el ciclo anual de la habilidad estadística promedio en la predicción de la temperatura del aire de los modelos, usando en forma simultánea los campos de la temperatura superficial del mar y de la temperatura superficial del aire para los diferentes trimestres del año (figura 6). El valor menor fue para diciembre-enero-febrero con 0,32 y el mayor para julio-agosto-septiembre con 0,60, siendo el promedio de este ciclo anual de 0,53. Vale la pena destacar que estos valores de habilidad predictiva de la figura 6 representan el promedio sobre toda la región del predictante y que al estudiar su patrón espacial se puede encontrar regiones con habilidades predictivas mayores tal y como se observa en la figura 5.

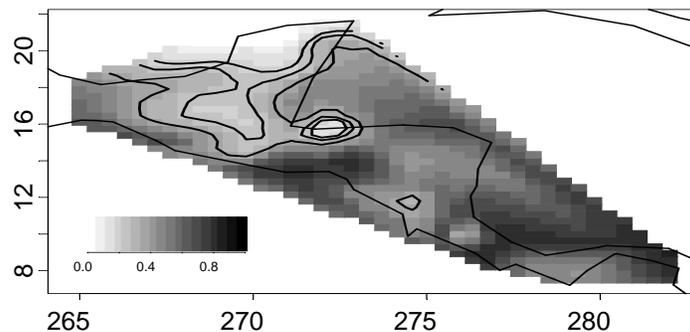


Figura 5. Patrón espacial de la habilidad estadística predictiva del campo de la temperatura superficial del aire en Centroamérica para la predicción del trimestre de mar-abr-may usando la temperatura superficial del mar en dic-ene-feb como predictor. Los valores se calcularon como la correlación entre las series de tiempo observadas y las predichas por el modelo del análisis de correlación canónica usando validación cruzada. Los contornos representan los niveles de confianza del 90, 95 y 99 por ciento en orden creciente.

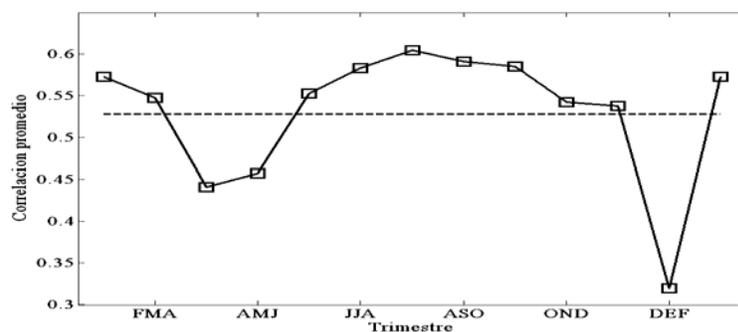


Figura 6. Ciclo anual de la habilidad estadística predictiva promedio del campo de temperatura superficial del aire en Centroamérica. Los trimestres usados en el análisis de correlación canónica para el campo de los predictores (temperatura superficial del mar) son los mismos que se consideran para el campo del predictando (temperatura superficial del aire). La línea a trazos horizontal representa el promedio de este ciclo anual (0,53).

Los resultados de este estudio son importantes dado que, según señala Alfaro (2000), muchas de las variaciones climáticas en Centroamérica, y sus impactos sobre la población humana, son producto de las variaciones no estacionales que acompañan los cambios interanuales y decadales en los océanos Atlántico y Pacífico Tropical y sus interacciones con la atmósfera suprayacente, donde eventos anómalos en la temperatura superficial del aire, principalmente los más calientes de lo normal, pueden afectar la disponibilidad del agua para su uso en agricultura, producción de energía, consumo humano y recreación. Como señaló el cuarto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, las temperaturas aumentarán entre 1,8 y 4 grados en el año 2100 (Alley *et al.* 2007), cuando se espera que la frecuencia de días cálidos y olas de calor aumenten (Adger *et al.* 2007), lo que resalta la importancia de contar con herramientas para el pronóstico climático de la temperatura superficial del aire.

#### Referencias bibliográficas

- Adger, N. et al. 2007. *Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Suiza.
- Alfaro, E. "Response of Air Surface Temperatures over Central America to Oceanic Climate Variability Indices", en *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 7(2), 2000.
- Alfaro, E., A. Gershunov y D. Cayan. "Prediction of Summer Maximum and Minimum Temperature over the Central and Western United States: The Roles of Soil Moisture and Sea Surface Temperature", en *J. Climate* 19(8), 2006.
- Alley, R. et al. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Suiza.
- Barry, R. y A. Carleton. 2001. *Synoptic and dynamic climatology.* Routledge. New York.
- Barry, R. y R. Chorley. 2003. *Atmosphere, weather and climate.* Routledge. New York.
- Chase, T. y R. Barry. "Numerical models of the general circulation, climate and weather prediction", en Barry, R. y R. Chorley (eds.). 2003. *Atmosphere, weather and climate.* Routledge. New York.
- Davis, R. E. "Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean", en *Journal of Physical Oceanography* 6, 1976.
- Enfield, D. B., A. M. Mestas-Núñez y P. J. Trimble. "The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S.", en *Geophysical Research Letters* 28, 2001.
- Hobbs, J. "Climate hazards", en Oliver, John (ed.). 2005. *Encyclopedia of World Climatology.* Netherlands.
- Mantua, N. et al. "A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production", en *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 1997.
- Naranjo, L. "Variabilidad interanual de los campos meteorológicos en el Caribe", en *Memorias de la VI Jornada Meteorológica. Perspectivas ante la incidencia de los fenómenos meteorológicos adversos y el impacto del cambio climático en Panamá. Escuela de Meteorología, Universidad de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá, 2000.*
- Soley, F. y E. Alfaro. "Aplicación de análisis multivariado al campo de anomalías de precipitación en Centroamérica", en *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 6(2), 1999.
- Taylor, M. y E. Alfaro. "Climate of Central America and the Caribbean", en Oliver, John (ed.). 2005. *Encyclopedia of World Climatology.* Netherlands.





# Fijación de carbono y agricultura orgánica

JONATHAN CASTRO

Evidencias científicas señalan una insostenibilidad en el mediano y largo plazos de las actuales formas de uso de los recursos naturales. Ya en 1996, el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) concluyó que “el balance de evidencias sugiere que hay una influencia humana perceptible en el clima global”. El calentamiento global se ha convertido en inagotable tema de discusión en los ámbitos político, científico y económico, pero aun desarticulado.

La investigación que se ha generado alrededor del tema del calentamiento global ha sido basta y abarca una amplia diversidad de temas, a pesar de lo cual aún quedan inexploradas áreas clave. La sociedad civil no ha definido claramente sus responsabilidades respecto del cambio climático, y el desarrollo de la investigación de éste, la asignación de responsabilidades y las estrategias de mitigación no profundizan en el rol fundamental que puede jugar la sociedad en colectivo frente al cambio global. Ante tal panorama resulta necesaria la profundización en el análisis y definición de alternativas integrales capaces de generar propuestas de solución en el mediano y el largo plazos a los desafíos planteados.

En 2003, la Corporación Educativa para el Desarrollo Costarricense (Cedeco), con el apoyo del Instituto Humanista de Cooperación con Países en Desarrollo de los Países Bajos (Hivos), emprendió una investigación novedosa sobre el papel que juegan las fincas orgánicas en la emisión de gases con efecto invernadero y la fijación de carbono. En ese momento, la complejidad del tema y la casi inexistente información sobre él obligaron a generar un enfoque propio ([www.cedeco.or.cr/investigacion.htm](http://www.cedeco.or.cr/investigacion.htm)). La investigación desarrollada incluye el análisis de aspectos físicos, químicos y biológicos directamente vinculados con la dinámica de gases, así como los criterios sociales y económicos que determinan el manejo de las fincas orgánicas. Se intentó, mediante un modelo de análisis socioeconómico, validar el papel de las fincas orgánicas en la generación de servicios ambientales de menor emisión de gases, mayor fijación de carbono, conservación de biodiversidad y generación de beneficios sociales y económicos para las familias campesinas vinculadas con la producción orgánica.

Con base en criterios de diversidad natural, social y económica en regiones de trabajo de Cedeco -en tanto promotora de la agricultura orgánica en el país-, se realizó una selección estratégica de fincas a incluir en la investigación, escogiéndose fincas de producción de café, de caña de azúcar, de hortalizas, de productos pecuarios y fincas orgánicas integrales como unidades representativas que, a la vez, contribuyen a la metodología que se construye.

La investigación buscó construir una metodología de análisis integral del rol de la agricultura orgánica (basándose en estudios en fincas) en la dinámica de gases de efecto invernadero y la producción de alimentos sanos: un análisis integral del aporte de las fincas orgánicas de pequeños productores en la solución de un problema global, incorporando los aspectos sociales y económicos que interactúan con los resultados biológicos.

Uno de los aportes más importantes de la investigación es la evaluación de variables sociales y económicas. Se reconoce que el tránsito de un productor hacia la agricultura orgánica no es un evento fortuito, y que tal tránsito se ve influenciado por condiciones del contexto que promueven o limitan la adopción de un manejo orgánico. Asimismo, los beneficios ambientales investigados se ven influenciados por estas variables.

Mediante un modelo de análisis estadístico se trata de identificar, categorizar y cuantificar el peso de variables fisicoquímicas, biológicas y socioeconómicas en las que están inmersos los sistemas de producción. Así, del modelo, con el insumo del estudio directo en fincas, se derivará elementos sobre las condiciones que ejercen su influencia sobre las fincas agroecológicas y su transformación en beneficios ambientales (menor emisión de gases, fijación de carbono y producción de alimentos sanos).

*Emisión de gases con efecto invernadero desde el suelo:* El óxido di nitroso ( $N_2O$ ) es un potente gas de efecto invernadero, y los suelos, y en especial los dedicados a labores agrícolas, se comportan como fuente de este gas. Las actividades agrícolas influyen el proceso de emisión de óxido di nitroso a la atmósfera desde el suelo, principalmente por la adición de nitrógeno por medio de fertilización y abonamiento. Técnicas de la agricultura

---

El autor, ingeniero agrónomo, es coordinador nacional de la investigación Gases de Invernadero y Agricultura Orgánica de Cedeco (Corporación Educativa para el Desarrollo Costarricense).

orgánica como la cobertura vegetal, el abonamiento orgánico y la labranza de conservación alteran las condiciones físicas y químicas del substrato edáfico y cambian los flujos de gases hacia la atmósfera. La investigación ha basado su estudio en el seguimiento de las actividades productivas y la adaptación de metodologías reconocidas internacionalmente para determinar indirectamente diferencias en emisión de óxido di nitroso desde el suelo.

De las evaluaciones realizadas en la investigación es posible observar los siguientes resultados:

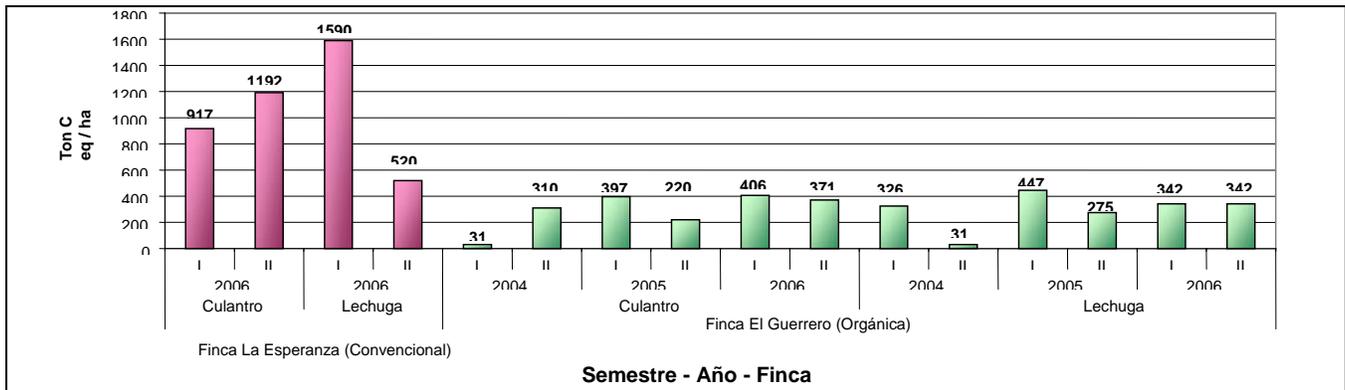


Figura 1. Emisión de carbono equivalente a partir de fertilización nitrogenada en producción de hortalizas de dos sistemas de producción (orgánico y convencional) en Zarcero, Costa Rica.

La emisión de gases desde el suelo confirma las tendencias esperadas. Las fincas orgánicas de producción de hortalizas (El Guerrero) mantienen niveles de emisión de carbono equivalente en el orden de las 500 toneladas por hectárea por ciclo. Por su lado, una finca convencional (La Esperanza) se encuentra con emisiones de hasta 1.500 toneladas de carbono equivalente por ciclo.

**Eficiencia energética de cultivos orgánicos y fincas integrales:** En la agricultura se usa energía directamente, por ejemplo utilizando máquinas, e indirectamente, aplicando productos industriales que requieren energía durante la producción y el transporte. La utilización de energía está muy relacionada con la quema de combustible fósil y otras actividades que emiten gases de efecto invernadero. Subsecuentemente, los sistemas de alimentación modernos enfrentan dos problemas mayores desde el punto de vista energético: primero, un aumento de la dependencia de combustible fósil y, segundo, la decreciente eficiencia energética de la producción. El proyecto de investigación ha rescatado las prácticas de producción orgánica que buscan disminuir dependencias externas de insumos y potencian el ciclaje interno de la energía. Se ha valorado en equivalentes energéticos las dinámicas de producción y su eficiencia en los cultivos. Esta información es el punto de partida para el análisis mediante el programa informático conocido como *sistema para el análisis de la eficiencia energética en fincas integrales* desarrollado por el Instituto de Investigación de Pastos y Forrajes de Cuba.

Los datos de eficiencia energética demuestran una tendencia similar entre las fincas. Las fincas de producción La Loma y Los Bobos (orgánicas) demuestran una baja demanda energética externa en su totalidad, en un rango de 200 a 4.000 megacalorías. Contrastando con la demanda de sistemas convencionales (como la finca Bernardo Naranjo) que, en promedio, demandan 12.800 megacalorías para su desempeño y producción.

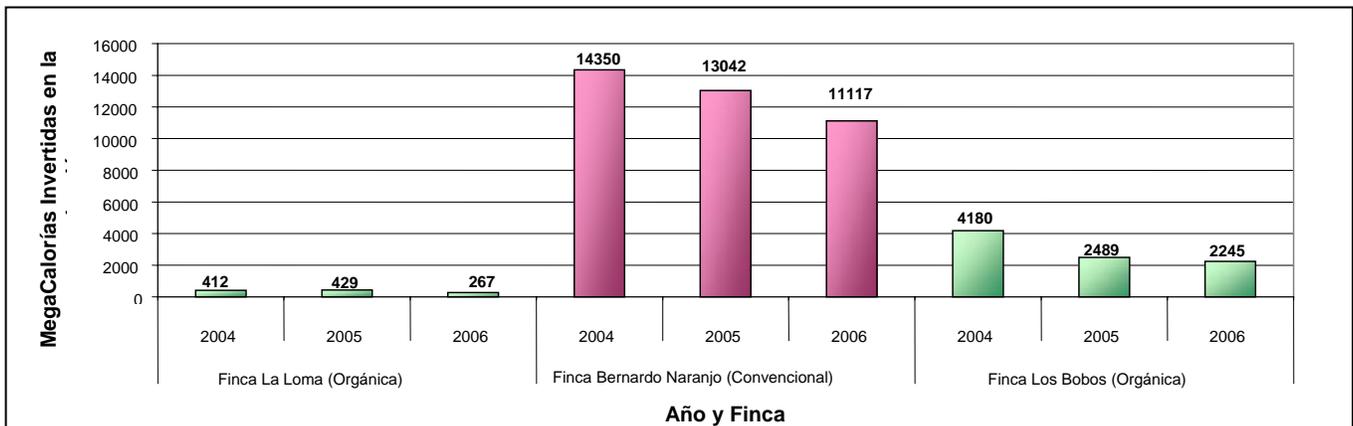


Figura 2. Inversión energética de la producción de café en sistemas orgánicos y convencionales en Caraigres, Costa Rica.

**Fijación de carbono en suelos:** El suelo también juega un papel fundamental como reservorio de carbono. Parte de la materia orgánica (sinónimo de carbono) que se acumula en la superficie del suelo se descompone y se incorpora a las capas profundas e intermedias del suelo. La intensidad de cultivo y las prácticas agronómicas (como el manejo de vegetación acompañante, la adición de materiales y abonos orgánicos y otras) influyen en el contenido de carbono del suelo. La agricultura orgánica basa muchos de sus fundamentos en un buen manejo del suelo que contribuye a la acumulación de carbono. La investigación ha podido determinar el contenido de carbono existente en diferentes sistemas de producción a través de una evaluación exhaustiva de los suelos.

La acumulación de carbono en sistemas de producción hortícola no muestra una tendencia determinada, lo que se explica en gran parte por la diversidad de suelos que se presentan entre las fincas analizadas. Sin embargo, es interesante el contraste en la distribución del carbono almacenado en el suelo. En la finca orgánica J&B se demuestra que un 37 por ciento de su carbono está acumulado a más de 50 cm de profundidad, contrastando con la finca La Esperanza, donde tan solo un 17 por ciento está a más de 50 cm, situación que había sido descrita también en las evaluaciones de las fincas de café. Esto orienta al almacenamiento de ese carbono a un mayor plazo.

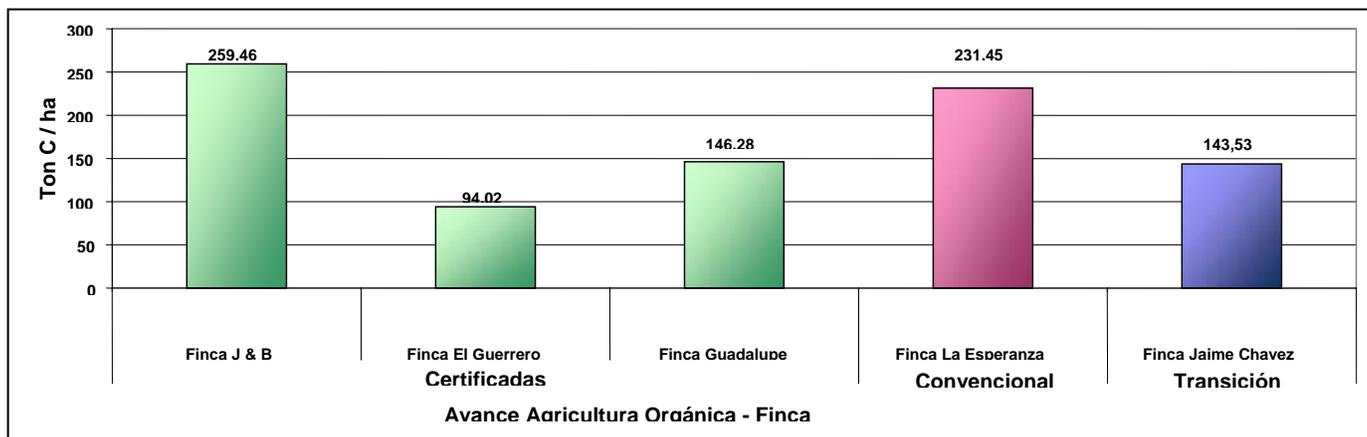


Figura 3. Toneladas de carbono orgánico por hectárea a un metro de profundidad en sistemas de producción de hortalizas según avance en producción orgánica y finca.

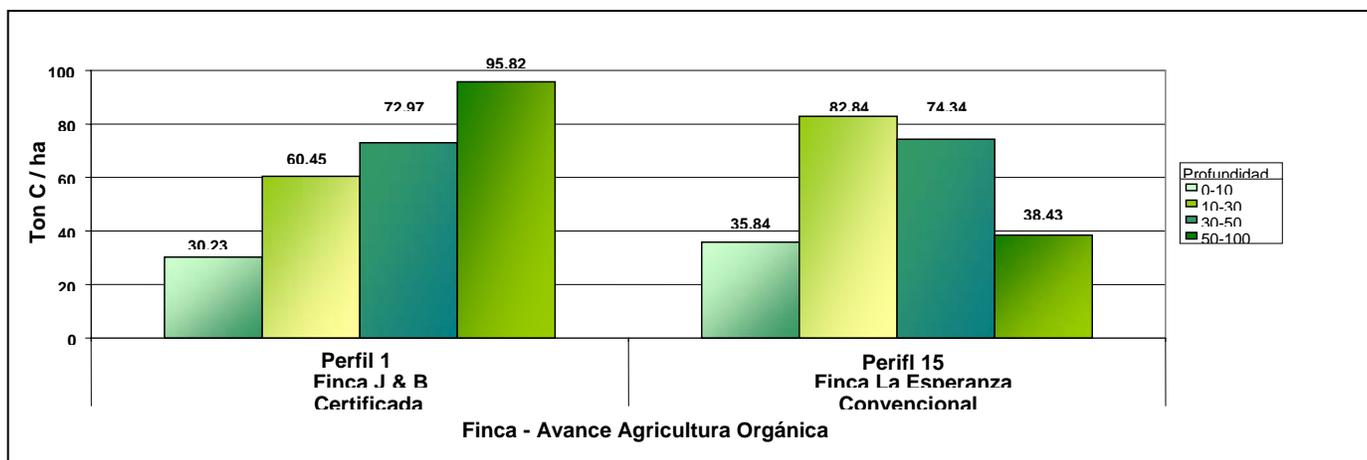


Figura 4. Distribución del carbono orgánico en toneladas por hectárea a través del perfil del suelo hasta un metro de profundidad en dos sistemas de producción de hortalizas en Zarcero, Costa Rica.

**Análisis biológico de suelos:** La composición biológica del suelo, su diversidad y su calidad están directamente relacionadas con procesos de emisión y fijación de gases de invernadero (i.e. emisión de  $N_2O$  y fijación de carbono) y en las decisiones de manejo del sistema. La investigación incorpora, recientemente, la evaluación de la población biológica de suelos agrícolas y en ambientes indisturbados (bosques) en términos de cantidad, calidad y especificidad de organismos. La investigación evalúa el impacto de las prácticas agrícolas en la biología del suelo y su relación con la lógica de manejo de los sistemas agrícolas y su aporte a la mitigación de gases de invernadero.

**Análisis socioeconómico:** El proyecto hace una selección estratégica de fincas en diferentes condiciones ambientales, sociales y económicas, y las agrupa según grados de avance hacia la producción orgánica. Ya se ha avanzado en

la determinación de variables que influyen el manejo orgánico de las fincas, las cuales se integran en un modelo de análisis matemático que permitirá la ubicación de elementos clave que influyen la transición de una finca orgánica respecto de la emisión de gases y fijación de carbono, fundamentales para brindar criterios políticos que permitan apoyar la transformación de las finca.

Con base en las orientaciones determinadas por la investigación y el avance en cada una de las áreas de medición, se ha podido generar una concepción acerca del modelo de análisis ideal que sería la base para el estudio de cada una de las variables dependientes (Y): emisión de gases a la atmósfera (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>), rescate de carbono, uso eficiente de la energía. El uso de este modelo matemático ideal depende de que se cuente con la información precisa (en cuanto a cantidad y calidad) de todos los niveles de los factores en estudio.

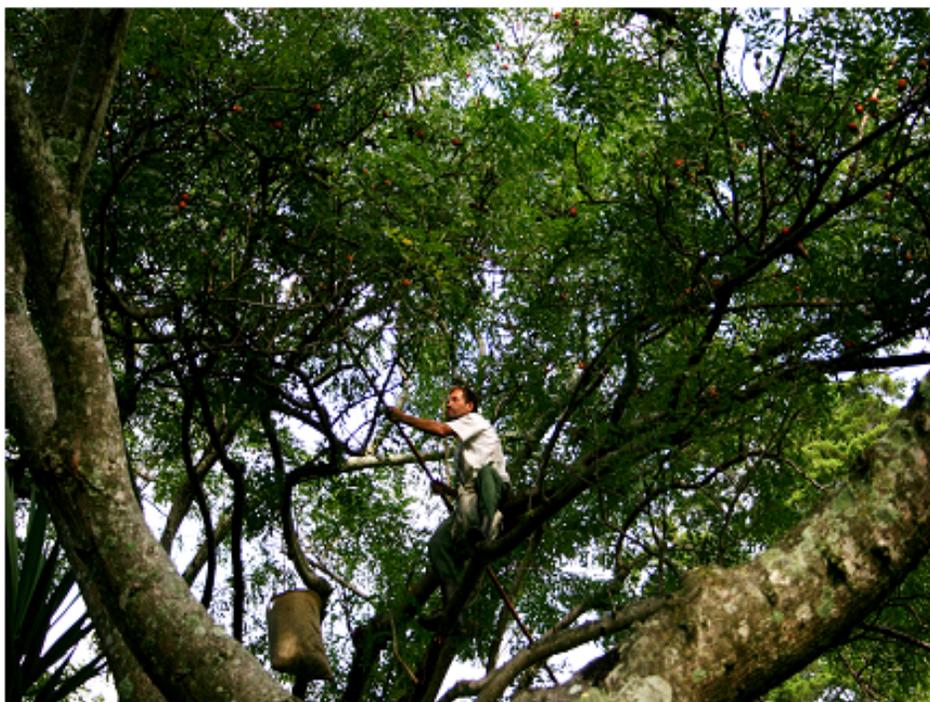
$$Y_{ijklmno} = \mu + P_i + E_j + S_k + F_l + Q_m + B_n + D_o + C_{ijklmno}$$

[Y<sub>ijklmno</sub>: valor de cada variable dependiente en los niveles ijklmno de cada factor fijo del estudio. M: media poblacional. Pi: efecto debido al nivel de sistema de producción en estudio, donde se contempla orgánicos, transición y convencionales. Ej: efecto debido al nivel económico en estudio. Sk: efecto debido al nivel social en estudio. Fl: efecto debido al nivel de variables físicas en estudio. Qm: efecto debido al nivel de variables químicas en estudio. Bn: efecto debido al nivel de variables biológicas en estudio. Do: efecto debido al nivel biodiversidad en estudio. C<sub>ijklmno</sub>: error aleatorio.]

Se mantendrá un monitoreo y una actualización constantes de las metodologías de medición según las orientaciones de los organismos internacionales acreditados (IPCC, UNFCCC-MDL-EB y otros) en áreas afines a las propuestas de evaluación de investigación de Cedeco. Sistemáticamente, se incorporará métodos y técnicas internacionalmente reconocidas a las generadas desde esta investigación.

A raíz de la escasa información y referencias para enriquecer y seleccionar variables adecuadas, se ha contactado otras organizaciones: el Centro Ecológico de Brasil y el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas de Cuba, con las que se pretende desarrollar procesos paralelos de investigación que incorporen, para el caso de Brasil, otras actividades orgánicas, arroz, banano y cítricos, y, para el caso de Cuba, fincas orgánicas integrales y producción animal, con el propósito de desarrollar un intercambio metodológico entre los tres procesos.

La base de la investigación realizada hasta el momento permite asegurar que hay posibilidad de comprobación del impacto de la agricultura orgánica en el calentamiento global, pero se requiere de seguimiento y de más observaciones para validar variables, hacer recomendaciones e incorporar las fincas orgánicas al reconocimiento de servicios ambientales.



Finca orgánica Los Bobos, Aserri



# Variabilidad climática y producción de caña de azúcar en Costa Rica

MARY L. MORENO y ERIC J. ALFARO

Uno de los primeros estudios que relacionaron variabilidad climática con agricultura fue el de Cane *et al.* (1994), que, por medio de teleconexiones, determinó una correlación positiva entre producción de maíz, en Zimbabwe, y *El Niño-Oscilación del sur (Enos)* en el Pacífico Ecuatorial. Específicamente para nuestro cultivo de interés, la caña de azúcar, Kuhnel (1994 y 1996) relacionó la variabilidad de *Enos* con ese cultivo en Australia, encontrando también correlaciones positivas. En la región del Caribe, esa relación fue estudiada por Pulwarty *et al.* (1997), obteniendo correlaciones negativas entre la variabilidad de *Enos* y la producción de caña, principalmente en Trinidad y Tobago, lo que significa que la producción de caña en el Caribe se ve más bien beneficiada por la ocurrencia de los eventos de *La Niña*.

En Costa Rica, el Instituto Meteorológico Nacional ha realizado algunos estudios que analizan los impactos de la variabilidad climática de *Enos* sobre diferentes variables: la producción de arroz y frijoles (Villalobos 2001), la producción bovina de carne en la región Chorotega (Retana y Rosales 2001), los incendios forestales (Villalobos *et al.* 2000), la fluctuación poblacional de la rata cañera en Cañas (Retana *et al.* 1999) y, también, como posible fuente de predicción de potencialidad de plaga de langosta (Retana 2000 y 2003). Por otro lado, Enfield y Alfaro (1999) han mostrado que la variabilidad climática en Centroamérica está influenciada por la variabilidad de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Ecuatorial del Este asociada con *Enos*, y también por la variabilidad de la temperatura superficial del mar del Atlántico Tropical.

El incremento en la producción de caña de azúcar está determinado por el componente varietal, las condiciones del suelo, el manejo agronómico y, por supuesto, el clima, por lo que en el proceso de madurez de la caña aquél es un factor determinante para alcanzar o no el máximo potencial productivo (Oviedo *et al.* 2003). Debido a ello, el estudio del que a continuación se da cuenta se planteó dos objetivos: determinar las relaciones entre la variabilidad climática observada en la temperatura superficial del mar de los océanos Atlántico y Pacífico Tropical, circundantes de Centroamérica, y la productividad de las plantaciones de caña de azúcar en Costa Rica; y estimar el efecto de la variabilidad climática sobre los ingresos económicos provenientes de dicha actividad agrícola, ya que si los productores pueden conocer con anterioridad los cambios climáticos también pueden prevenir las pérdidas relacionadas con tal variabilidad y mejorar la planificación de sus cultivos.

Para cumplir con los objetivos de investigación recién expuestos se trabajó con las series temporales de rendimiento (ton/ha) de la caña de azúcar desde la zafra de 1969/1970 hasta la de 2002/2003, para 34 datos anuales en total, obtenidos de la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (Laica). A fin de minimizar el impacto de factores no climáticos, como el cambio tecnológico y las variaciones en precios, así como también el de un posible cambio climático (Alley *et al.* 2007) sobre la producción de caña, se calculó y eliminó la tendencia lineal en la serie de la producción (figura 1), por lo que los resultados se obtuvieron para la serie con esta tendencia removida.

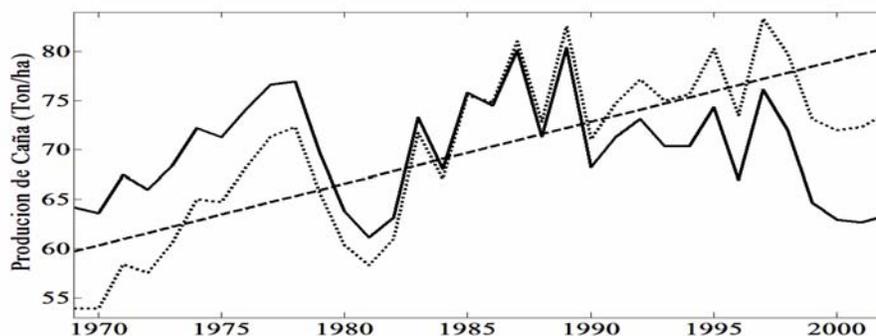


Figura 1. Serie de tiempo para la producción de caña en Costa Rica (línea punteada). La tendencia lineal de esta serie (línea a trazos) es de 0,62 ton/año, significativa al 99%. La línea continua es la serie de tiempo con la tendencia removida.

Las variables climáticas empleadas fueron los índices de temperatura superficial del mar de *El Niño 3* y del Atlántico Tropical Norte, ambos obtenidos de la Agencia Nacional para la Atmósfera y el Océano, referentes a los mismos años mencionados. Los resultados que relacionan los índices anteriores con la producción de caña se obtuvieron usando el análisis de correlación y de tabla de contingencia (Alfaro *et al.* 2003).

Luego de identificar los cambios en la productividad de la caña ocasionados por la variabilidad climática, y como una forma de ejemplificar cómo podrían ser usadas estas relaciones clima-productividad, se procedió a calcular la variación en los ingresos obtenidos por los agricultores para algunos años -datos obtenidos también de Laica. Al relacionar la variable producción de caña con el índice *El Niño 3*, no se encontró ninguna relación significativa. Caso contrario ocurrió al relacionar los datos de producción de caña con el índice Atlántico Tropical Norte (ATN) (ver figura 2): las anomalías positivas (negativas) en la temperatura superficial del mar durante el trimestre noviembre-diciembre-enero tienden a estar relacionadas con anomalías negativas (positivas) de la producción de caña durante la zafra (ver figura 3). Esta relación, mencionada anteriormente, se confirmó al usar un análisis de tabla de contingencia. En el cuadro 1 se muestra la probabilidad condicional de los escenarios bajo lo normal, neutro y arriba de lo normal (BN, N, AN) en la producción de caña dado un escenario BN, N y AN en el ATN durante noviembre-diciembre-enero. Éstos sugieren que cuando las anomalías en la temperatura superficial del mar del ATN es BN (AN), el escenario más probable es una temporada con una producción de caña AN (BN) con un 82 por ciento (64 por ciento) de probabilidades. Nótese también que las probabilidades para las condiciones (BN, BN) y (AN, AN) son muy bajas.

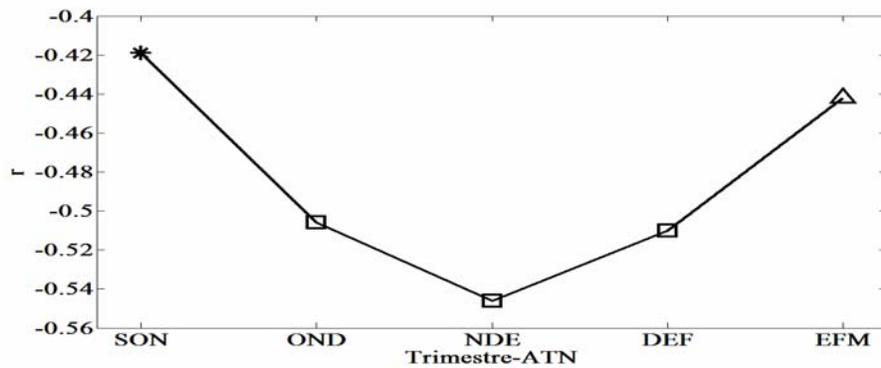


Figura 2. Correlaciones entre distintos trimestres del ATN y la producción de caña para el periodo 1969-2002. Los cuadrados representan una significación estadística mayor al 95%, los triángulos entre 95 y 99% y los asteriscos menor al 90%. La significación estadística de los valores se calculó de acuerdo a Davis (1976).

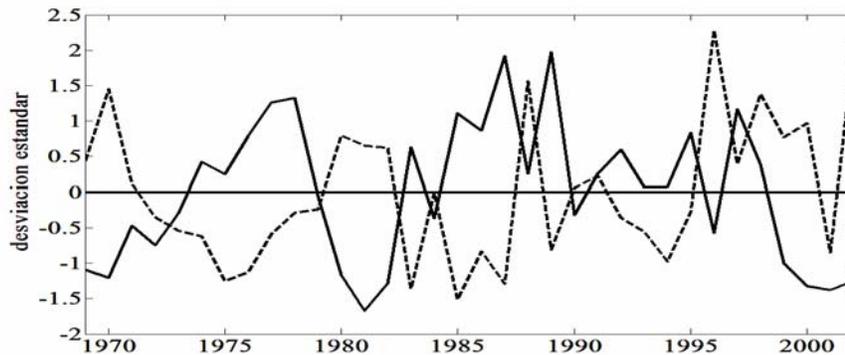


Figura 3. Serie de tiempo normalizada para la producción de caña en Costa Rica sin tendencia (línea continua) y para el índice ATN durante el trimestre nov-dic-ene (línea a trazos). La correlación entre las series es de -0,55, significativa al 95%.

Los años identificados en que el ATN estuvo arriba de lo normal en noviembre-diciembre-enero, y los rendimientos de caña bajo lo normal, fueron: 1969, 1970, 1980, 1981, 1982, 1999, 2000 y 2002 (ver cuadro 1). Por otro lado, los años en los que el ATN estuvo por debajo de lo normal y el rendimiento de caña arriba de lo normal fueron 1974, 1975, 1976, 1977, 1983, 1985, 1986, 1987 y 1989.

**Cuadro 1. Probabilidades condicionales -expresadas como porcentajes- entre la producción anual de caña y el índice ATN durante el trimestre nov-dic-ene en el periodo 1969-2002 ( $\chi^2 = 22,1^{***}$ , donde  $\alpha = 0,01 \Rightarrow ***$ ,  $0,05 \Rightarrow **$ ,  $0,10 \Rightarrow *$ ).**

		Producción de caña (ton/ha)			
		BN	N	AN	
		BN	9***	27	64***
ATN, nov-dic-ene	N	9***	55**	36	
	AN	82***	18**	0***	

Con el fin de encontrar alguna explicación física que justifique los resultados expuestos en el cuadro 1 se realizó el análisis de tabla de contingencia entre las series anuales de ATN-noviembre-diciembre-enero con un índice de precipitación del trimestre febrero-marzo-abril en Costa Rica entre 1965 y 1998, usando los datos compilados por Magaña *et al.* (1999). Así, cuando el ATN-noviembre-diciembre-enero se encuentra bajo lo normal, existe un 55 por ciento de probabilidades de que la precipitación de febrero-marzo-abril se encuentre bajo lo normal; y cuando el ATN-noviembre-diciembre-enero se encuentra arriba de lo normal existe un 64 por ciento de probabilidades de que la precipitación en febrero-marzo-abril esté arriba de lo normal (ver cuadro 2). Lo anterior podría interpretarse de la siguiente manera: anomalías positivas (negativas) en el ATN están relacionadas con una mayor (menor) cantidad de precipitación en Costa Rica, lo que se relaciona a su vez con una menor (mayor) producción de caña, ya que hubo una mayor (menor) cobertura nubosa sobre la región.

**Cuadro 2. Probabilidades condicionales, expresadas como porcentajes, entre el índice de precipitación para Costa Rica durante el trimestre feb-mar-abr en el período 1965-1998 y el índice ATN durante el trimestre nov-dic-ene en el periodo 1964-1997 ( $\chi^2 = 11,9^{**}$ , donde  $\alpha = 0,01 \Rightarrow ***$ ,  $0,05 \Rightarrow **$ ,  $0,10 \Rightarrow *$ ).**

		Precipitación (milímetros/día)			
		BN	N	AN	
		BN	55**	36	9***
ATN, NDE	N	18**	55**	27	
	AN	27	9***	64***	

**Cuadro 3. Ingresos obtenidos por los productores de caña. 1995-2003. Los valores en cursivas de la séptima columna representan la disminución en los ingresos que coinciden con los análisis realizados del ATN y la disminución en los rendimientos de caña.**

Por último, con los datos de productividad se procedió a realizar un cálculo de los ingresos obtenidos por los productores de azúcar en las zafras que van desde la de 1995-1996 hasta la de 2002-2003 (ver cuadro 3): en los años 1999 y 2002, en que el ATN se comporta arriba de lo normal y los rendimientos de la caña debajo de lo normal, los ingresos de los productores de azúcar disminuyeron en relación con el año anterior.

Año/item	Rendimiento de azúcar por tn métrica de caña. Kg/T.M.C. Tel Quel	Precio por kilo de azúcar (colones/kilo)*	Ingreso por tonelada (colones)	Toneladas de azúcar por ha de caña	Ingresos por ha (colones corrientes)	% variación en los ingresos
1995-1996	96,75	79	7.643,25	8,25	63.056,81	-
1996-1997	99,56	91	9.059,96	7,76	70.305,29	11,50
1997-1998	97,26	99	9.628,74	8,65	83.288,60	18,47
1998-1999	96,26	101	9.722,26	8,16	79.333,64	-4,75
1999-2000	102,36	111	11.361,96	7,96	90.441,20	14,00
2000-2001	105,37	122	12.855,14	8,05	103.483,88	14,42
2001-2002	101,84	136	13.850,24	7,84	108.585,88	4,93
2002-2003	102,03	146	14.896,38	7,75	115.446,95	6,32

\* Este dato se obtuvo promediando el precio de liquidación del azúcar blanco y crudo por kilo en cada una de las zafras.  
Fuente: Elaboración propia con base en datos de Laica.

Quedó, pues, comprobado que se puede establecer relaciones significativas entre las variables climáticas y la productividad del cultivo de caña, y los ingresos derivados, en Costa Rica. Los productores de caña de azúcar en particular, y otros productores en general, pueden emplear la información climática para planificar sus cultivos y así mejorar los rendimientos y sus ingresos.



Amenaza de lluvia, Nicaragua

#### Referencias bibliográficas

- Alfaro, E., J. Soley y D. Enfield. 2003. *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas*. Espol y Fundespol. Guayaquil.
- Alley, R. et al. 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Suiza. (<http://www.ipcc.ch>).
- Cane M., G. Eshel y R. Auckland. "Forecasting Zimbabwean maize yield using eastern equatorial Pacific sea surface temperature", en *Nature* 370, 1994.
- Davis, R. "Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean", en *Journal of Physical Oceanography* 6, 1976.
- Enfield, D. y E. Alfaro. "The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans", en *Journal of Climate* 12, 1999.
- Kuhnel, I. "Relationships of Australian sugarcane yields to various climatic variables", en *Theoretical and Applied Climatology* 54, 1996.
- Kuhnel, I. "Relationship between the southern oscillation index and Australian sugarcane yields", en *Australian Journal of Agricultural Research* 45(7), 1994.
- Liga Agrícola e Industrial de la Caña de Azúcar. [www.laica.co.cr](http://www.laica.co.cr)
- Magaña, V. O., J. A. Amador y S. Medina. "The mid-summer drought over Mexico and Central America", en *J. Climate* 12, 1999.
- Oviedo, M., J. Durán y G. Calderón, 2003. *Determinación de la curva de madurez de siete variedades de caña de azúcar en Turrialba, Costa Rica. Serie: Tecnología de caña de azúcar. Documento Técnico. Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA-LAICA)*.
- Pulwarty, R., J. Eischeid y H. Pulwarty, "Climate, climate forecasting and sugar production in Trinidad and Tobago: a preliminary analysis", en NOAA. 1997. *Environment, Science and Development (ESD), Helping Society Adapt to Climate Through the Use of Science and Technology, Sectoral Applications Research Program*. Climate Program Office, NOAA. EU.
- Retana, J. "Relación entre la temperatura superficial del mar (TSM) y anomalías de temperatura del aire en el Pacífico norte de Costa Rica durante años ENOS como posible predictor de potencialidad de plaga de langosta", en *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 10(1), 2003.
- Retana, J. "Relación entre algunos aspectos climatológicos y el desarrollo de la langosta centroamericana *Schistocerca piceifrons piceifrons* en el Pacífico Norte de Costa Rica durante la fase cálida del fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS)", en *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 7(2), 2000.
- Retana, J. y R. Rosales. "Efecto de la variabilidad climática sobre la producción bovina de carne en la región Chorotega de Costa Rica", en *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 8(1), 2001.
- Retana, J. et al. "Efecto de la variabilidad climática sobre la fluctuación poblacional de la rata cañera (*Sigmon hispidus*) en Cañas, Guanacaste", en *Boletín Meteorológico* (Instituto Meteorológico Nacional) 22(8), 1999.
- Villalobos, R. "Impacto del fenómeno "El Niño" sobre la producción de arroz y frijol en dos regiones agrícolas de Costa Rica", en *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 8(1), 2001.
- Villalobos, R., J. Retana y A. Acuña. "El Niño y los incendios forestales en Costa Rica", en *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 7(1), 2000.





# Metodología para evaluar la adaptación de los productores a la variabilidad climática en cuencas

LAURA BENEGAS

En la región centroamericana hay 8,6 millones de personas expuestas a desastres naturales y escasez periódica de alimentos (World Food Programme 2002) por vivir en las áreas rurales de un *corredor de sequía*, definido éste -por el Programa Mundial de Alimentos- como un área seca continua, con una estación seca de seis meses o más, situada en la costa pacífica de América Central.

A pesar de los lineamientos sobre cómo evaluar la capacidad de adaptación a la variabilidad climática a escala global y regional, no existe una delimitación de principios, de criterios, de indicadores ni de posibles verificadores destinados específicamente a evaluar esa capacidad de adaptación que poseen los sistemas. Y tampoco se ha definido una escala de evaluación local -o a nivel de unidad territorial- que permita tomar medidas factibles y obtener resultados visibles a nivel -por ejemplo- de cuenca hidrográfica y su escala espacial. En zonas con limitaciones o con excesos hídricos y alta variabilidad climática, los productores recurren a diferentes estrategias, prácticas y tecnologías: por ejemplo, ajuste de las fechas de siembra, empleo de variedades con ciclos diferenciados, microzonificación de la finca, uso de cultivos resistentes/tolerantes, riego y evitación y manejo de cultivos.

La subcuenca del río Aguas Calientes, en Somoto, Nicaragua, que es una de las subcuencas-laboratorio del programa “Innovación, aprendizaje y comunicación para la co-gestión adaptativa de cuencas” del Catie, presenta la situación y problemática planteadas: hay ocurrencia frecuente de sequías, inundaciones o excesos hídricos y alta variabilidad climática, pero no han sido documentadas las diferentes estrategias, tecnologías y prácticas utilizadas por los agricultores para sobrevivir en este escenario ni, mucho menos, se ha estimado su nivel de adaptación a esta variabilidad climática.

A continuación se da cuenta de un estudio sobre esa subcuenca cuyo objetivo general fue elaborar una propuesta metodológica para evaluar la adaptación de los productores a la variabilidad climática -principalmente a la sequía- en cuencas hidrográficas en América Central; objetivo general que se desagregó en dos objetivos específicos: (1) establecer principios, criterios e indicadores que permitan evaluar el grado de adaptación a la variabilidad climática -principalmente a la sequía- en cuencas hidrográficas en la dicha región, y (2) aplicar la propuesta metodológica utilizando como estudio de caso la subcuenca del río Aguas Calientes.

La subcuenca del río Aguas Calientes se ubica específicamente en la región de Las Segovias, en el departamento de Madriz, Nicaragua. Ella, que drena al río Coco a través de numerosos tributarios, tiene una superficie de 47,4 km<sup>2</sup> (4.737 ha) y es compartida por los municipios de Somoto y San Lucas. Comprende diez comunidades: ocho del municipio de Somoto y dos del municipio de San Lucas (Alcaldía Municipal de Somoto 2001). Corresponde a una de las zonas secas que posee altos niveles de pobreza en Nicaragua. La precipitación en la zona presenta un patrón bien definido de dos periodos: uno lluvioso, en el que cae el 85 por ciento de la precipitación, y otro seco con el 15 por ciento de ésta. Las lluvias son generalmente regulares en la primera parte del periodo lluvioso y luego son interrumpidas por un periodo canicular prolongado con lluvias esporádicas de menos de 5 mm/día. Las temperaturas máximas están en el rango de 27-34 °C, la media es entre 23 y 26 °C y las temperaturas mínimas entre 18 y 21 °C, aproximadamente (Ineter 2006).

Las principales actividades productivas en esta subcuenca son la producción de granos básicos (maíz, frijol, sorgo) para autoconsumo, henequén, hortalizas con riego, café, muy poca ganadería y fabricación de adobes, tejas y artesanía. Los pobladores emigran durante la época de cortes de café (Alcaldía Municipal de Somoto 2001).

Los procedimientos utilizados para alcanzar los objetivos de investigación 1 y 2 atrás mencionados se describen a continuación:

**Cuadro 1. Actividades, información recolectada y método de análisis para alcanzar objetivo 1.**

Objetivo 1	Actividad	Información recolectada	Método de análisis	
Establecer principios, criterios e indicadores que permitan evaluar el grado de adaptación a la variabilidad climática, principalmente a la sequía, en cuencas hidrográficas de América Central	Elaboración de principios y criterios preliminares con base en la revisión de literatura	Ideas generales acerca de principios o criterios a considerar en la metodología planteada.	Frecuencias absolutas para las ideas generales mencionadas.	Principios y criterios preliminares evaluados
		Consultas con expertos de reconocida trayectoria en el tema de adaptación a variabilidad climática y sequía en Centroamérica, Estados Unidos y Canadá	Estadísticas descriptivas (promedios y desviaciones estándar) de los elementos calificados por los expertos.	
			Hoja con principios y criterios preliminares sometidos a evaluación de los expertos consultados.	Sugerencias y críticas para la metodología

**Cuadro 2. Actividades, información recolectada y método de análisis para alcanzar objetivo 2.**

Objetivo 2	Actividad	Información recolectada	Método de análisis	
Aplicar la propuesta metodológica utilizando como estudio de caso la subcuenca del río Aguas Calientes	Taller para dar a conocer la primera propuesta metodológica para evaluar la adaptación de los productores a la variabilidad climática, principalmente a la sequía en cuencas hidrográficas en América Central	Nivel de aceptación de la propuesta metodológica y calificación de la subcuenca en cuanto a la misma	Análisis multicriterio del estándar (propuesta metodológica)	Estadísticas descriptivas (máxima, mínima, promedio y desviación estándar de los datos continuos) y tablas de contingencia (prueba de chi cuadrado) sobre los principales datos cualitativos de las encuestas
		Encuestas a productores agropecuarios de las comunidades escogidas por estrato de la subcuenca Visitas participativas a las fincas para entender la distribución de los recursos y actividades dentro de las mismas	Características de los productores en cuanto a su actividad agropecuaria, estrategias y tecnologías de adaptación a la sequía que emplean, percepción de la variabilidad climática. Identificación de algunos productores con cultivos adaptados a sequía como henequén y pitahaya	

Para la recolección de la información primaria se tomó la finca como unidad principal de análisis, definida por aquellos hogares cuya principal fuente de ingresos es la producción agropecuaria. Para cumplir con el objetivo de investigación 2 se realizó un análisis multicriterio del estándar, que se basó en el procedimiento propuesto por Mendoza y Macoun (1999), con adaptaciones propias (escalas de transformación de valores de posición y valoración o relevancia) de acuerdo con el estándar elaborado. Se asignó una posición o ranking para cada elemento del estándar comparable entre sí (principios, criterios, indicadores y verificadores), de acuerdo con la importancia que estos elementos tenían para la condición particular de la subcuenca y su entorno. Del mismo modo, se asignó un peso basado en una escala fija de relevancia distribuida desde el 0 (“no aplica, el aspecto no se da o no es la aptitud de la cuenca”) hasta el 5 (“extremada relevancia, es vital considerar este aspecto en las condiciones de la cuenca”). Una vez completado el proceso de evaluación, se calculó la suma de votos de los evaluadores, tanto para las posiciones como para los pesos asignados.

La evaluación final para la subcuenca Aguas Calientes se obtuvo a través del promedio de la asignación de puntajes dada por cada evaluador de acuerdo con el cumplimiento o no de cada uno de los principios, criterios, indicadores y verificadores por parte de la subcuenca, representada por las actividades de todos los involucrados en el manejo de ella. Para este proceso cada evaluador recibió una hoja con el estándar completo y un instructivo acerca del llenado. Se utilizó una escala fija de calificaciones también desde el 0 (“principio, criterio, indicador o verificador no aplicable a la subcuenca”) hasta el 5 (“muy alta adaptación, situación ideal”).

En el proceso de calificación de la subcuenca se utilizó la metodología propuesta por Musalem (2005), donde se consideró en primer lugar un valor de aceptación (a) del indicador, que representa el punto de vista y la importancia que le asigna el evaluador. En segundo lugar se consideró la calificación (c) en sí, la cual corresponde a la interpretación que tiene el evaluador sobre las condiciones y situación particular de la subcuenca del río Aguas Calientes. Estos valores son asignados con base en una escala guía. La aceptación (a) y la calificación (c) son multiplicados y ponderados a través de una fórmula simple de promedio ponderado.

Respecto de los resultados del estudio debe anotarse lo siguiente: A partir de la consulta a “expertos” sobre los principios o criterios que consideran fundamentales para incluir en una metodología de evaluación sobre adaptación, se generó un conjunto de ideas que, al ser ordenadas y analizadas, permitieron identificar 24 temas principales que se debería considerar, siendo mencionada con mayor frecuencia una estrategia de “información, capacitación, sensibilización en torno al tema”, referida 30 veces. (Previamente, a fin de proceder a la consulta a

expertos de instituciones y organizaciones con reconocido trabajo en el campo de la adaptación a la variabilidad y cambio climático, este estudio definió la región centroamericana como el entorno principal donde contactar a ellos, y definió a Estados Unidos y Canadá como el entorno complementario para realizar consultas.)

La discusión y análisis con los asesores se constituyó en el filtro final para dejar establecido el estándar que contó con cinco principios generales: (1) las políticas y los procesos de planificación regional (América Central) y nacional abordan la adaptación de los productores a la sequía; (2) la institucionalidad presente en la cuenca toma en cuenta la adaptación de los productores a la sequía; (3) las estrategias y tecnologías agrosilvopecuarias utilizadas en las unidades de producción (finca) en las partes alta, media y baja de la cuenca permiten enfrentar o están adaptadas a la sequía; (4) las alternativas socioeconómicas no agrícolas y agrícolas no tradicionales son una medida de adaptación a la sequía, y (5) existe una estrategia de comunicación y sensibilización de parte de los actores clave sobre el uso racional del agua ante las condiciones de su escasez en la cuenca. Además, se obtuvo 10 criterios, 26 indicadores y 51 verificadores, distribuidos entre los principios.

El nivel de aceptación general para el estándar fue de 3 (aceptación media). Al analizar en particular cada uno de los elementos, se obtuvo para los principios una aceptación promedio de 4 (alta aceptación), y para los criterios, indicadores y verificadores propuestos el nivel de aceptación general fue 3 (aceptación media). Para la subcuenca, el principio número 2 (“La institucionalidad presente en la cuenca toma en cuenta la adaptación de los productores agrosilvopecuarios a la sequía”) fue el de mayor aceptación, con una calificación general de 5.

Se obtuvo como promedio general un nivel de adaptación de 2 (baja adaptación) para la subcuenca del río Aguas Calientes. Se presentaron cuatro elementos puntuados con 1 (muy baja adaptación) y son los que tienen que ver con el racionamiento y uso más eficiente del agua (I5.2.3 y V5.2.3.1), los seguros agrícolas (V1.1.4.3) y el turismo ambientalmente amigable (V4.1.5.2); y dos con calificación 4 (alta adaptación), correspondientes al tema de la institucionalidad presente en la cuenca (P2 y C2.1).

La mayoría de las estrategias y tecnologías empleadas para adaptarse a la condición de variabilidad climática con énfasis en sequía se realizan independientemente del estrato de la cuenca; sin embargo, se encontró algunas estrategias y tecnologías que dependen de la zona de la cuenca, como el empleo de sistemas de riego, de sistemas de captación y almacenamiento de agua, uso de barreras vivas o muertas, empleo de abonos verdes y plantación de frutales.

**E**n cuanto a las conclusiones y recomendaciones del estudio hacemos los siguientes señalamientos: A partir de un conjunto de principios, criterios, indicadores y verificadores fue posible confeccionar una metodología para evaluar el nivel de adaptación de los productores a la variabilidad climática -principalmente a la sequía- en cuencas hidrográficas en América Central.

La calificación general de la subcuenca estudiada en cuanto a su nivel de adaptación a sequía, con base en el estándar de evaluación propuesto, indicó que su adaptación es baja, y al analizar las calificaciones particulares por nivel jerárquico se reconoce los aspectos respecto de los cuales el desempeño de la subcuenca es más deficiente, para, a partir de ellos, diseñar estrategias específicas que conduzcan a mejorar la situación.

La metodología para la elaboración del estándar de evaluación propuesta en esta investigación puede ser perfectamente utilizada en otros campos temáticos (agua potable, turismo y energía, entre otros), por lo que se recomienda retomarla a la hora de diseñar estrategias de adaptación a la variabilidad y cambio climático en esos sectores. Esta metodología, así como las diseñadas para los otros campos temáticos, puede realizarse a escalas diferentes a la de cuenca hidrográfica, por lo que se propone considerarlas como ejemplo de aplicación práctica de la adaptación a la variabilidad climática y flexibilización hacia otras escalas (país, regiones dentro de un país, países de una misma región, etcétera).

#### Referencias bibliográficas

- Alcaldía Municipal de Somoto. 2001. *Plan Rector de Producción y Conservación (PRPC): Subcuenca del Río Aguas Calientes. Somoto, NI.* Alcaldía Municipal de Somoto-Tropisec. Nicaragua.
- Benegas, L. 2006. *Propuesta metodológica para evaluar la adaptación de los productores a la variabilidad climática, principalmente a la sequía, en cuencas hidrográficas en América Central.* Tesis Mag. Sc. Catie. Costa Rica.
- Ineter (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales). 2001. *Amenazas naturales de Nicaragua.* Ineter. Managua.
- Mendoza, G. y P. Macoum. 1999. *Guidelines for applying multicriteria analysis to the assessment of criteria and indicators. The Criteria and Indicators Toolbox Series 9. ID.* Cifor (Center for International Forestry Research).
- Musálem, K. 2005. *Propuesta metodológica para la certificación del manejo integrado de cuencas en América Tropical.* Tesis Mag. Sc. Catie. Costa Rica.
- Prabhu, R., C. Colfer y R. Dudley. 1999. *Guidelines for developing, testing and selecting criteria and indicators for sustainable forest management. The Criteria and Indicators Toolbox. Series 1. IC.* Cifor.
- World Food Programme. 2002. *Standardized food and livelihood assessment in support of the Central American PRRO. Final draft. WFP.*





# Integrar los bosques tropicales en las políticas de adaptación al cambio climático

CARLOS J. PÉREZ, BRUNO LOCATELLI, RAFFAELE VIGNOLA y PABLO IMBACH

**E**l clima está cambiando (IPCC 2001a) y esto influenciará distintos sistemas sociales, naturales y ecológicos. Una de las opciones de mitigación del calentamiento global propuesta por el Protocolo de Kioto es la reforestación y la aforestación para aprovechar el servicio ecosistémico secuestro de carbono que realizan los bosques. Sin embargo, algunos estudios científicos han resaltado la vulnerabilidad de los bosques tropicales a los efectos adversos del cambio y la variabilidad climática (IPCC 2001b, CBD 2003) y a sus funciones o servicios ecosistémicos.

La vulnerabilidad al cambio climático se define como el grado de susceptibilidad o incapacidad de un sistema a enfrentarse a los efectos adversos del cambio climático, y es función de la sensibilidad y de la capacidad de adaptación del sistema (IPCC 2001b). Esta última puede resultar de una respuesta autónoma del sistema, por ejemplo un cambio en su fenología, o puede resultar de actividades planeadas de adaptación, por ejemplo un manejo forestal que busca modificar la composición florística del ecosistema.

Ante los impactos esperados del cambio climático sobre los bosques se ha propuesto algunas tipologías (Dudley 1998). Primero, las perturbaciones por eventos extremos -como las tormentas- y por cambios graduales en los patrones de lluvias o temperaturas pueden tener impactos sobre el funcionamiento, la composición y la estructura del bosque (Condit 1998). Segundo, la simplificación del bosque resulta en una pérdida de biodiversidad. Tercero, los ecosistemas pueden cambiar, como lo demuestran estudios en Costa Rica y Nicaragua (Halpin *et al.* 1995), donde las zonas climáticas asociadas a ciertos tipos de vegetación pueden cambiar -sin embargo, los movimientos reales dependerán de la capacidad de dispersión de las especies y de las barreras a la migración (Pearson 2006). Cuarto, una reducción de la edad del bosque puede resultar en mayor ocurrencia de fuegos, ataques de plagas, migración y otras perturbaciones. Y quinto, la desaparición de algunos bosques tropicales o especies -como se ha reportado en el bosque nuboso tropical de altura en Monteverde (Costa Rica), donde la elevación de las nubes ya ha causado la desaparición de varias especies de ranas (Pounds *et al.* 1999).

**E**l servicio ecosistémico de los bosques más estudiado a escala global ha sido el secuestro de carbono (Bazzaz 1998), que, al igual que otros, puede ser alterado por el cambio climático. Los servicios ecosistémicos vinculados a la biodiversidad, y los servicios hidrológicos, son de particular importancia para la sobrevivencia de la sociedad y las especies. Debido a que los ciclos hidrológicos serán afectados por el cambio y la variabilidad climáticas (Oki & Kanae 2006), los servicios ecosistémicos hidrológicos podrían ser afectados por cambios en las funciones hidrológicas de los bosques, tales como la intercepción de lluvias o la infiltración en el suelo. Por ejemplo, el incremento de los incendios asociados con el aumento de las condiciones secas (como ha sido proyectado para América Central) puede reducir el estrato superficial de sustancias orgánicas, lo que causaría menor infiltración y mayor escorrentía a nivel del bosque y caudales mínimos o máximos más extremos a nivel de la cuenca (Townsend *et al.* 2004).

Aunque se ha avanzado en el conocimiento científico de la función de la cobertura forestal en la regulación del ciclo hidrológico, todavía hace falta más esfuerzos para resolver algunas dudas al respecto (Kaimowitz 2004, Bruijnzeel 2004, Guillemette 2005). Muchos factores influyen sobre la función hidrológica de la cobertura forestal, siendo algunos de ellos casi fijos: por ejemplo las características físicas como la topografía, la profundidad y el tipo de suelo. Hay factores variables, por ejemplo los factores atmosféricos como la distribución, la intensidad y la variabilidad de los eventos de precipitación, la orientación, duración e intensidad de los vientos, la humedad relativa, la temperatura del sitio y su variabilidad intra e interanual. Otros factores variables que influyen sobre el rol de la cobertura forestal en los ciclos hidrológicos están asociados con el uso del suelo. Cambios en la estructura, ubicación y área de la cobertura forestal en una cuenca influyen en la relación entre evapotranspiración e infiltración (Bruijnzeel 2004) y, por ende, en el balance hídrico. Todas esas variables influyen en la regulación de aspectos de cantidad y calidad del recurso hídrico.

---

Los autores son integrantes del Grupo Cambio Global del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie).

La alteración de la capacidad de infiltración de los bosques puede tener el efecto de disminuir la recarga del manto acuífero y, por consiguiente, del periodo de oferta hídrica (reduciendo los caudales mínimos durante el período seco). Por otro lado, la compactación del suelo puede reducir el tiempo de respuesta del flujo pico en las quebradas ante los eventos de precipitación, lo que a su vez puede tener relación directa con la inundación cuenca abajo (Bruijnzeel 2004).

El cambio climático afectará el ciclo hidrológico (van Dam 2003). En América Latina, un aumento de 0,6 ° C podría causar una reducción de la precipitación en las zonas subtropicales y la ocurrencia de *El Niño* con más intensidad (IPCC 2001a). Las proyecciones sobre cambio climático en América Central apuntan hacia una intensificación de las condiciones secas, como consecuencia de un aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación en el litoral del Pacífico, así como a una expansión de ellas hacia el litoral caribeño (Mendoza 2001, Minae 2000). Las proyecciones al año 2025 de estrés hídrico para Centroamérica, y especialmente en el Pacífico, indican un empeoramiento de la disponibilidad del recurso debido al efecto conjunto del cambio climático y a factores demográficos. Según lo concluido por Vorosmarty *et al.* (2000), los factores anteriormente descritos afectarán por igual a los sectores agrícola, doméstico e industrial, y seguramente al sector turístico si estos cuatro sectores convergen en la demanda del recurso hídrico en la misma zona.

**E**xiste una alta probabilidad de impacto combinado del clima (a corto, mediano y largo plazos) y de las decisiones de manejo de los bosques tropicales (en el corto y mediano plazos) sobre los ciclos hidrológicos. Se debe identificar las áreas donde se requiere priorizar acciones de fortalecimiento del manejo forestal para la protección de su capacidad reguladora del ciclo hidrológico.

El conjunto de medidas de adaptación deben salvaguardar, en cuanto sea posible, la función de los bosques en la regulación del ciclo hidrológico. Una estrategia adaptativa puede comenzar, por ejemplo, con el fomento de la conservación de bosques en las zonas de recarga, investigando la distribución óptima de los elementos del paisaje que contribuyen a la regulación hidrológica y la reducción en el uso de prácticas de manejo del suelo que contaminan los recursos hídricos.

En conclusión, un deterioro de los ecosistemas forestales incrementará la vulnerabilidad de los recursos hídricos al cambio climático y, con ello, aumentará también la vulnerabilidad de los sectores socioeconómicos que dependen del recurso. Una conclusión similar se aplicaría a otros sectores que dependen, por ejemplo, de la biodiversidad o el paisaje.

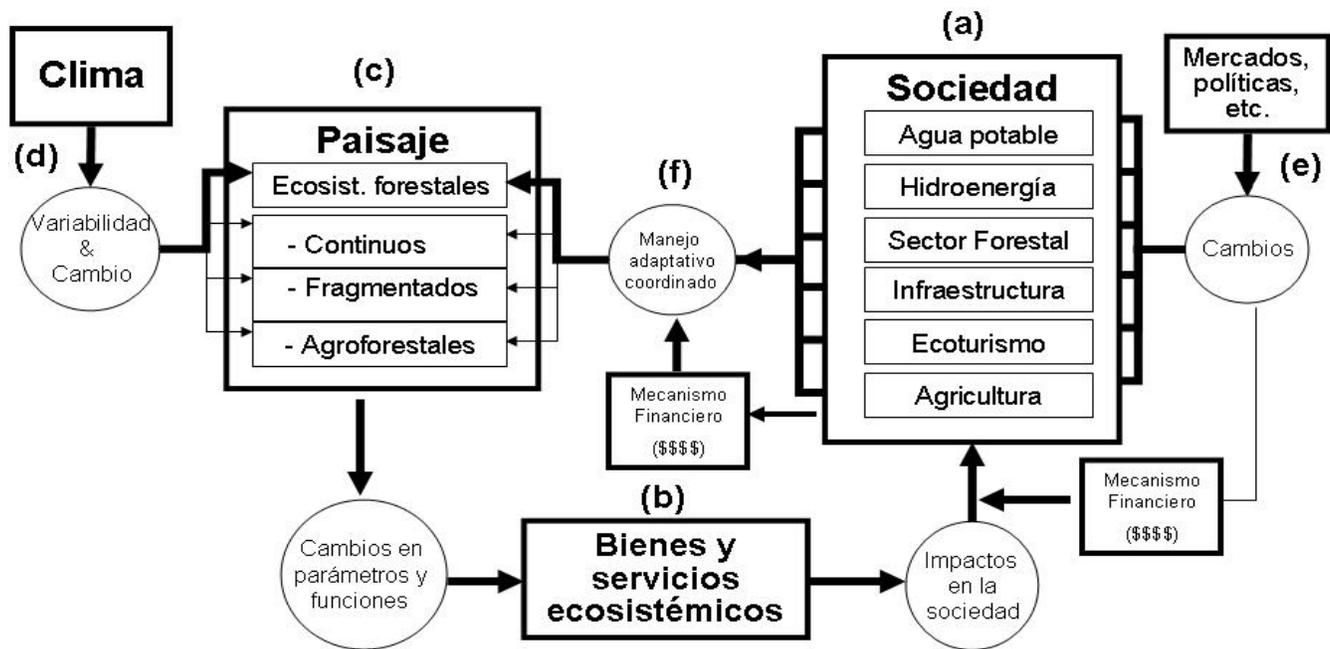
Para lograr que los bosques sean de interés para la sociedad y los formuladores de políticas, uno de los retos será vincularlos con otros sectores socioeconómicos y demostrar el grado de interdependencia. Por ejemplo, la promoción de mayores fuentes de generación de energía hidroeléctrica depende de los bienes y servicios ecosistémicos de los ecosistemas forestales. Esto significa que para aprovechar el potencial de los países centroamericanos (Naciones Unidas 2004) se requiere de los servicios hidrológicos de los bosques tropicales, que generalmente están ubicados en zonas de montaña o laderas. Entonces, una política energética que contemple la generación hidroeléctrica debería incorporar el manejo adaptativo de los bosques tropicales que brindan bienes y servicios ecosistémicos al sector. Lo mismo se puede decir para el agua potable, el ecoturismo, etcétera.

Un enfoque propuesto por el proyecto Bosques tropicales y adaptación al cambio climático (Trofcca<sup>1</sup>) busca contribuir al desarrollo de una propuesta de integración de los ecosistemas forestales en las políticas de adaptación al cambio climático. Tal enfoque intenta integrar la sociedad, los bienes y servicios ecosistémicos de los bosques tropicales y el impacto del cambio climático sobre las funciones ecosistémicas de éstos. Como parte de esta integración considera los mecanismos financieros que pueden hacer posible el manejo adaptativo de los bosques tropicales (figura 1).

La agenda de investigación de Trofcca incluye el desarrollo y validación de una metodología para identificar los ecosistemas forestales importantes para sectores socioeconómicos vulnerables al cambio y la variabilidad climática, como el agua potable y la hidroelectricidad. Además, contribuirá a entender mejor la dinámica de algunas perturbaciones de los bosques, como los incendios y las plagas forestales, bajo escenarios de cambio climático. Una de las áreas de estudio al nivel regional serán los servicios hidrológicos de los ecosistemas forestales, intentando estudiar los distintos ecosistemas existentes y cómo estos influyen en las funciones hidrológicas. Las condiciones edafoclimáticas y su variación serán de importancia para algunas especies forestales de interés comercial, para lo que Trofcca contribuirá con la identificación de zonas óptimas, actuales y futuras para algunas especies forestales.

---

<sup>1</sup> Trofcca es un proyecto ejecutado conjuntamente por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie) y el Centro Internacional de Investigaciones Forestales (Cifor) con apoyo financiero de la Unión Europea. Más información: [www.catie.ac.cr/cambiolglobal](http://www.catie.ac.cr/cambiolglobal) y [www.cifor.cgiar.org/trofcca](http://www.cifor.cgiar.org/trofcca)



**Figura 1. Interacción entre sociedad y ecosistema forestal a través de las funciones, bienes y servicios ambientales que éste brinda.**

**Referencias bibliográficas**

Bazzaz, F. "Tropical Forests in a Future Climate: Changes in Biological Diversity and Impact on the Global Carbon Cycle", en *Climatic Change* 39(2-3), 1998.

Bruijnzeel, L. A. "Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?", en *Agriculture, Ecosystems and the Environment* 104, 2004.

CBD (Convention on Biological Diversity). 2003. *Interlinkages between biological diversity and climate change: advice on the integration of biodiversity considerations into the implementation of the United Nations framework convention on climate change and its Kyoto Protocol. Technical Series no. 10.*

Condit, R. "Ecological implications of changes in drought patterns: shifts in forest composition in Panama", en *Climatic Change* 39, 1998.

Dudley, N. 1998. *Forests and climate change. A report for WWF Internacional, Forest Innovations, IUCN, GTZ, WWF.*

Guillemette, F. et al. "Rainfall generated stormflow response to clearcutting a boreal forest: peak flow comparison with 50 world-wide basin studies", en *Journal of Hydrology* 302, 2005.

Halpin, P. N. et al. 1995. *Climate Change and Central America Forest System. Background paper on the Nicaragua Pilot Project.*

IPCC. 2001a. *Climate Change: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC.* Cambridge University Press.

IPCC. 2001b. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge University Press

Kaimowitz, D. "Useful Myths and Intractable Truths: The Politics of the Link Between Forests and Water in Central America", en Bonell, M. y L. A. Bruijnzeel (eds.). 2004. *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management.* Cambridge University Press.

Mendoza, F., M. Chevez y B. Gonzales. "Sensibilidad de las zonas de vida de Holdridge en Nicaragua en función del cambio climático", en *Revista Forestal Centroamericana* (s.n de e.).

Minae. 2000. *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Cambio Climático.* San José.

Naciones Unidas. 2004. *Estrategia para el fomento de las Fuentes Renovables de Energía en América Central.* Cepal.

Oki, T. y S. Kanae. "Global hydrological cycles and world water resources", en *Science* 313, 2006.

Pearson, R. G. "Climate change and the migration capacity of species", en *Trends in Ecology and Evolution* 21(3), 2006.

Pounds, J. A., M. P. L. Fogden y J. H. Campbell. "Biological response to climate change on a tropical mountain", en *Nature* 398, 1999.

Townsend, S. A. y M. M. Douglas. "The effect of a wildfire on stream water quality and catchment water yield in a tropical savanna excluded from fire for 10 years (Kakadu National Park, North Australia)", en *Water Research* 38, 2004.

Van Dam, J. C. 2003. *Impacts of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes.* Unesco - Cambridge University Press.

Vorosmarty, C. J. et al. "Global Water Resources: Vulnerability from climate Change and Population Growth", en *Science* 289, 2000.



# Identificación de bosques proveedores de servicios ecosistémicos para hidroelectricidad en Nicaragua

EFRAÍN LEGUÍA, BRUNO LOCATELLI, PABLO IMBACH, FRANCISCO ALPÍZAR, RAFFAELE VIGNOLA y CARLOS PÉREZ

Gracias a complejas interacciones biológicas, químicas y físicas, los ecosistemas brindan a la sociedad un conjunto de servicios ecosistémicos de gran importancia para su desarrollo (Daily *et al.* 1997, Coomes y Burt 2001, *Millenium Ecosystem Assessment* 2005). Paradójicamente, nuestras decisiones -en un marco histórico- y más recientemente el cambio climático vienen poniendo en riesgo el flujo de servicios ecosistémicos en varias zonas del mundo (Coomes y Burt 2001, IPCC 2001).

El desarrollo del sector energético es clave para el progreso de los países, principalmente de los en vías de desarrollo (Klimpt *et al.* 2002, Keon 2005, Yuksek *et al.* 2006). El agua es la fuente más usada para generar energía y, en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, es una alternativa a la utilización de combustibles fósiles (Frey y Linke 2002, Paish 2002, Reddy *et al.* 2006), motivo por el que Nicaragua, que actualmente solo aprovecha el 2 por ciento de su potencial hidroeléctrico, está promoviendo la implementación de proyectos hidroeléctricos de pequeña, mediana y alta capacidad (Cepal 2004, *La Gaceta* 2003).

Los servicios ecosistémicos hídricos de los bosques tropicales, tales como la reducción de la sedimentación, la reducción de caudales máximos, la conservación de caudales mínimos y del volumen total de agua, contribuyen a la sostenibilidad del sector hidroeléctrico (Guo *et al.* 2000, Vincenzi 2001). Sin embargo, la naturaleza y la magnitud de este aporte aún es poco claro (Bruijnzeel *et al.* 2004).

El cambio climático podrá aumentar la vulnerabilidad del sector hidroenergético mediante la alteración del patrón de precipitaciones o de eventos extremos como inundaciones y deslizamientos que pueden ocasionar severos daños a las instalaciones (IPCC 2001). En este contexto, los servicios ecosistémicos contribuyen a reducir la vulnerabilidad del sector hidroenergético (*Millenium Ecosystem Assessment* 2005, Metzger *et al.* 2006); no obstante, la presión sobre los ecosistemas forestales, por factores socioeconómicos o debido al cambio climático, tendrá un impacto sobre los servicios ecosistémicos importantes para el sector hidroeléctrico, hecho que merece un diálogo entre la sociedad civil, el sector ambiental y de recursos naturales y el sector energético. Un insumo que puede fortalecer este diálogo es una herramienta que permita priorizar los ecosistemas forestales que están generando servicios ecosistémicos de utilidad para el sector hidroenergético (Metzger *et al.* 2006).

El trabajo de investigación del que a continuación se da cuenta se desarrolló con el objetivo de generar una metodología que permita identificar bosques proveedores de servicios ecosistémicos importantes para la adaptación del sector hidroenergético en Nicaragua.

El marco metodológico del que partimos enfatiza los vínculos que existen entre los diferentes usos del suelo, principalmente los bosques y su capacidad de producir servicios ecosistémicos hídricos de utilidad para las centrales hidroeléctricas. Nuestra metodología tiene raíz en el trabajo sobre transferencia de beneficios usado para estimar el valor del flujo de servicios ecosistémicos aplicado a tres casos de estudio con una diversidad de escalas espaciales y localización (Troy *et al.* 2006). El método es aplicable a cualquier servicio ecosistémico no rival, es decir cuyo uso no reduce la disponibilidad del servicio a otros.

En primera instancia, se procedió a definir las tipologías de usuarios de los servicios ecosistémicos, usos del suelo y servicios ecosistémicos. La interacción espacial entre estos componentes se basó en la división de microcuencas de Nicaragua generada a partir del mapa de drenajes (TNC 2007). Con base en el mapa de uso del suelo de Nicaragua (Magfor 2002) se construyó cinco usos del suelo: bosques, cultivos anuales, cultivos perennes, pasturas y otros usos. Además, se especificaron las siguientes relaciones espaciales: presencia de usuarios en una microcuenca, vulnerabilidad ante eventos climáticos y proporción de cada uso de suelo en una microcuenca.

Para evaluar la vulnerabilidad se usó el siguiente índice (Adger *et al.* 2003, IPCC 2001): *Vulnerabilidad = Sensibilidad a eventos climáticos – Capacidad adaptativa*. Se definió las relaciones entre uso de suelo y producción de servicios ecosistémicos y las relaciones entre servicios ecosistémicos y usuarios. Estas relaciones fueron establecidas

con base en revisión bibliográfica y consulta con expertos y se midieron con valores lingüísticos. Se definió la capacidad de los distintos tipos de uso para producir servicios ecosistémicos con base en: Hodnett *et al.* (1995), Sahin y Hall (1996), Fahey y Jackson (1997), Nandakumar y Mein (1997), Guo *et al.* (2000), Bruijnzeel (2004), Bruijnzeel *et al.* (2004) y Vincenzi (2001), y para la utilidad de los servicios ecosistémicos para las centrales hidroeléctricas se usó Guo *et al.* (2000), Vincenzi (2001), Klimpt (2002), CNE (2004), CNE (2005) y CNE (2006).

La información fue procesada en dos etapas: En la primera se hizo énfasis en los usuarios de los servicios ecosistémicos, asumiéndose que la importancia de los ecosistemas para la adaptación del sector hidroenergético depende del beneficio que obtienen los usuarios de los servicios ecosistémicos y que este beneficio es más alto para usuarios más vulnerables. Para esto se calculó, para cada usuario, el *beneficio*, definido como el producto de la vulnerabilidad del usuario y la *utilidad* que obtiene del servicio. Para cada usuario se calculó la *cantidad de servicios ecosistémicos recibidos* de las cuencas aguas arriba para calcular el *beneficio unitario*, que indica quiénes son los usuarios que necesitan más servicios ecosistémicos (aquellos con alta vulnerabilidad o utilidad alta) y que no reciben cantidades adecuadas (baja oferta). Para ellos, una unidad de servicios ecosistémicos es más importante que para los que reciben mayores cantidades. En la segunda etapa, el énfasis se puso en los ecosistemas y se asumió que la importancia de los ecosistemas depende de tres factores: (a) cantidad de servicios ecosistémicos producidos (microcuencas aguas arriba de las centrales hidroeléctricas), (b) presencia de usuarios en la unidad de destino (aguas abajo del área donde se producen los servicios ecosistémicos) y (c) beneficio unitario de cada servicio ecosistémico para los usuarios en todas las microcuencas aguas abajo.

Como resultados del estudio se encontró que en cuanto a mayor número de centrales la cuenca principal es la n° 55 (17 centrales, 866 MW); la segunda es la n° 45 (nueve centrales, 298 MW); la tercera es la n° 61 (ocho centrales, 210 MW); luego está la n° 69 (tres centrales, 133 MW); le sigue la cuenca n° 53 (dos centrales, 278 MW), y, finalmente, con una central cada una, están las cuencas n° 49 (7 MW), n° 57 (18 MW) y n° 65 (94 MW). La vertiente del Atlántico alberga al mayor número de centrales hidroeléctricas. La capacidad prevista varía entre 2,5 MW y 300 MW. Mientras que las centrales hidroeléctricas a filo de agua tienen una capacidad instalada que varía entre 0,18 MW y 7 MW.

También, en cuanto a distribución de los bosques, se determinó que aproximadamente el 78 por ciento está en la Región del Atlántico (RAAN, RAAS y Río San Juan), el 17 por ciento en la Región Central (Madriz, Nueva Segovia, Matagalpa, Jinotega, Boaco, Chontales y Estelí), y el cinco por ciento en la Región Pacífico (Marena 2003). La central Santa recibe servicios ecosistémicos de 17 cuencas aguas arriba (32 km<sup>2</sup>), que en su mayor parte son bosques (73 por ciento), y la central Centroamérica recibe servicios ecosistémicos de 639 cuencas (876 km<sup>2</sup>), siendo el bosque el mayor uso del suelo (66 por ciento), seguido por los cultivos anuales (16 por ciento).

La superficie de ecosistemas de importancia alta o muy alta para la generación de hidroelectricidad en la vertiente del Atlántico es mucho mayor que el área identificada en la vertiente del Pacífico (21.336 km<sup>2</sup> contra 876,57 km<sup>2</sup>), debido a que posee los ríos de mayor recorrido con régimen de caudal permanente y caudalosos, aunque variable en el espacio y en el tiempo (Ineter 2001). Esta área significa el 16 por ciento de la superficie de Nicaragua en el caso de los ecosistemas seleccionados en la vertiente atlántica y menos del uno por ciento para la vertiente del Pacífico. Dentro de cada vertiente, y tomando en cuenta solo las áreas que producen servicios ecosistémicos para las centrales hidroeléctricas, los bosques siguen siendo el uso de suelo más abundante (64 por ciento en el Atlántico y 67 por ciento en el Pacífico); sin embargo, las pasturas son el segundo uso más importante en el Caribe (27 por ciento), mientras que en el Pacífico lo son los cultivos anuales (16 por ciento).

Para los embalses, los bosques cubren un 59 por ciento de las microcuencas aguas arriba, seguido por las pasturas (28 por ciento), los cultivos perennes (8 por ciento), los cultivos anuales (3 por ciento) y otros usos de suelo (2 por ciento). Mientras que para las centrales tipo filo de agua la cobertura de bosques se incrementa a un 80 por ciento.

También se encontró que, excluyendo los cuerpos de agua, el 17 por ciento de la superficie de Nicaragua se encuentra en zonas de alta a muy alta sensibilidad a eventos climáticos (21.470 km<sup>2</sup>), proporción que se incrementa notablemente cuando se toma en cuenta solo la ubicación de las cuencas que están generando servicios ecosistémicos para las centrales hidroeléctricas. El 35 por ciento de la superficie de las cuencas que generan servicios ecosistémicos se ubica en zonas de alta a muy alta sensibilidad a eventos climáticos, hecho que evidencia la necesidad de trabajar para reducir vulnerabilidad del sector hidroeléctrico, por ejemplo con un mejor manejo de las cuencas y ecosistemas forestales.

Finalmente, se determinó que los ecosistemas de importancia entre media y muy alta para las centrales hidroeléctricas representan el 10,4 por ciento de la superficie territorial de Nicaragua y están ubicados casi en su totalidad en la región atlántica, principalmente en las cuencas de los ríos Grande de Matagalpa (17 centrales, 866

MW) y Coco (9 centrales, 298 MW), que es donde se encuentra la mayor capacidad instalada potencial del país. Aproximadamente 8.300 km<sup>2</sup> de bosques se consideran como de alta a muy alta importancia para las centrales hidroeléctricas. Éstos se encuentran distribuidos principalmente en 49 municipalidades, siendo las de mayor superficie Cúa-Bocay, Waslala, Wiwili de Jinotega, Nueva Guinea, Siuna y Matiguas, con áreas entre 537 km<sup>2</sup> y 1.176 km<sup>2</sup>. La importancia de los bosques está influenciada por la capacidad instalada de las centrales, el tipo de usuario, la cobertura de bosques (porcentaje aguas arriba de las microcuencas) y el área total de las cuencas aguas arriba de las centrales hidroeléctricas. El área de influencia para el proyecto Copalar (6.800 km<sup>2</sup> aproximadamente) hace que los bosques muestren una importancia media. Ocurre lo contrario con el proyecto Tumarín, cuya área de influencia es menor y los bosques se consideran muy importantes.

La superficie de bosques productores de servicios ecosistémicos de importancia media a muy alta que están dentro de áreas protegidas es de 1.305 km<sup>2</sup>, lo que significa apenas el 11 por ciento del total de superficie de bosques identificados dentro de estas categorías (de media a muy alta); y solo los que se encuentren dentro de áreas protegidas mantendrán su cobertura según las proyecciones de deforestación de Magfor (2002). El área protegida de la reserva de la biosfera Bosawás alberga la mayor extensión de bosques importantes para la hidroenergía (716 km<sup>2</sup>).

Como conclusiones señalamos que las futuras centrales hidroeléctricas en Nicaragua se ubicarán mayoritariamente en zonas de sensibilidad alta a eventos climáticos, por lo que las políticas nacionales de adaptación al cambio climático deben incluir el sector hidroenergético.

Los bosques importantes para el sector hidroenergético en Nicaragua se encuentran ubicados mayormente en la zona central (cuenca del río Grande de Matagalpa) y al norte (cuenca del río Coco) de la vertiente del Atlántico. Gracias a su capacidad de generar servicios ecosistémicos, mayor cobertura y distribución dentro de las cuencas aguas arriba de las centrales hidroeléctricas, los bosques son más importantes para la adaptación del sector hidroenergético que los demás usos del suelo. Sin embargo, un buen manejo de suelos puede mejorar su capacidad de proveer servicios ecosistémicos.

Existen bosques importantes para la adaptación del sector hidroenergético dentro de áreas protegidas; sin embargo, la gran mayoría de ellos están fuera del amparo de este tipo de figura legal, hecho que evidencia la necesidad de incluir los ecosistemas importantes para la hidroenergía en un sistema de manejo y conservación que reduzca la vulnerabilidad del sector a eventos climáticos. Reforzando el trabajo de análisis individualizado del aporte de servicios ecosistémicos por cada uso del suelo podríamos priorizar y mapear aquéllos que producen servicios ecosistémicos específicos, evitando así sobrevaluar o subvalorar un determinado uso de suelo.

#### Referencias bibliográficas

- Adger, N. et al. "Adaptation to climate change in developing world", en *Progress in Development Studies* 3,3, 2003.
- Bruijnzeel, L. "Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?", en *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 2004.
- Bruijnzeel, L. et al. "Impacts of Forest Conversion on Streamflow", en *Hydrology* 2004.
- Cepal. 2004. *Estrategias para el fomento de las fuentes renovables de energías en América Central*.
- CNE. 2004. *Desarrollo de la Hidroelectricidad a pequeña escala para usos productivos en zonas fuera de la Red. Formulación de Estudios de Factibilidad y Diseños Finales para la Ejecución de 10 Proyectos Demostrativos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas NIC10-000-14045-001*. Managua.
- CNE. 2005. *Estudios de proyectos hidroeléctricos a nivel de pre-factibilidad. Centrales hidroeléctricas Boboké – Pajaritos – Valentín*. Managua.
- CNE. 2005. *Apoyo a la implementación de proyectos hidroeléctricos de 5 a 30 Mw*. PNUD-CNE10/0000/14043. Managua.
- CNE. 2005. *Plan indicativo de la generación del sector eléctrico. Periodo 2005-2016*. Managua.
- CNE. 2006. *Plan estratégico para el sector eléctrico*. Nicaragua.
- Coomes, O. y G. Burt. "Peasant charcoal production in the Peruvian Amazon: rainforest use and economic reliance", en *Forest Ecology and Management* 140, 2001.
- Daily, G. C.; Alexander, S.; Ehrlich, P. R.; Goulder, L.; Lubchenco, Jane; Matson, P. A.; Mooney, H. A. et al. "Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems", en *Issues in ecology* 2, 1997.
- Fahey, B. y R. Jackson. "Hydrological impacts of converting native forest and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand", en *Agricultural and forestry meteorology* 84, 1997.
- Frey, G. W. y D. Linke. "Hydropower as a renewable and sustainable energy resource meeting global energy challenges in a reasonable way", en *Energy policy* 30, 2002.
- Guo, Z., X. Xiao y D. Li. "An assessment of ecosystem services: water flow regulation and hydroelectric power production", en *Ecological Applications* 10, 2000.
- Hodnett, M. G. "Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture", en *Journal of hydrology* 170, 1995.
- Ingeniería y Ciencia Ambiental. 2006. *Estudio ambiental preliminar de los proyectos hidroeléctricos de Copalar y Tumarín (Nicaragua)*. Energía, SA – HYDROCOPALAR, Ltd. Ineter. 2001.
- Amenazas naturales de Nicaragua*. Instituto nicaragüense de estudios territoriales. Managua.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press. UK.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press. UK.
- Keong, C. Y. "Energy demand, economic growth, and energy efficiency –the Bakun dam-induced sustainable energy policy revisited", en *Energy policy* 33, 2005.
- Klimpt, J. E. et al. "Recommendations for sustainable hydroelectric development", en *Energy policy* 30, 2002.
- La Gaceta*. 2003. *Ley N° 467. Ley de promoción al subsector hidroeléctrico*.
- Leguía, E. 2007. *Identificación de bosques importantes proveedores de servicios ecosistémicos para la generación de hidroelectricidad en Nicaragua*. Tesis Mag. Sc. Catie. Costa Rica.
- Magfor-Sinia. 2002. *Atlas Rural de Nicaragua*. Managua.
- Marena. 2003. *Estado del ambiente en Nicaragua 2003. II informe GEO*. Managua.
- Metzer, M. J. et al. "The vulnerability of ecosystem services to land use change. Agriculture", en *Ecosystems and Environment* 114, 2006.
- Millennium Ecosystem Assessment*. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press. Washington DC.
- Nandakumar, N. y R. G. Mein. 1997. *Uncertainty in rainfall-runoff model simulations and the implications for predicting the hydrologic effects of land-use change*.
- Paish, O. "Small hydro power: technology and current status", en *Renewable and sustainable energy reviews* 6, 2002.
- Reddy, R. V. et al. "Achieving global environmental benefits through local development of clean energy? The case of small hilly hydel in India", en *Energy policy* 34, 2006.
- Sahin, V. y M. J. Hall. "The effects of afforestation and deforestation on water yields", en *Journal of Hydrology* 178, 1996.
- TNC. 2007. *Red de Drenajes de Centroamérica, Geodatabase, versión 1.0*. The Nature Conservancy, Región de Mesoamérica & Caribe, Science Program. San José.
- Troy, A. y M. A. Wilson. "Mapping ecosystem services: Practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer", en *Ecological economics* 60, 2006.
- Vincenzi, J. "Manejo de cuencas un nuevo desafío para el ICE", en *Tecnología-ICE. Energía y telecomunicaciones* Vol. 11, No.1, Diciembre 2001.
- Yukse, O. et al. "The roll of hydropower in meeting Turkey's electric energy demand", en *Energy policy* 34, 2006.





# Vulnerabilidad de bosques ante cambio climático puede simularse con *sistema de zonas de vida*

EDWIN ALPÍZAR

Los últimos informes del Panel de Expertos en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) ratifican lo que hace unos años era una sospecha: existe un cambio climático que ya está induciendo efectos importantes en todos los procesos naturales y, que por ende, afectará a las sociedades humanas. Los estudios indican que hay en curso un aumento de la temperatura y variaciones en la distribución anual de la precipitación, factores éstos que están provocando trastornos como el derretimiento de los cascos polares y la disminución de nevados de importancia hidrológica para las ciudades que se abastecen de su agua. El nivel del mar subirá afectando la actividad costera (infraestructura urbana, salinización de tierras y perjuicios en el turismo y la pesca), habrá cambios en la productividad y distribución de cultivos agrícolas y -en general- en la distribución natural de especies de flora y fauna, también en la disponibilidad de agua y surgirán condiciones ambientales incidentes en la presencia de plagas y enfermedades que afectan la salud humana y los cultivos.

Se sabe que las especies de flora y fauna, domesticadas y silvestres, tienen un rango ambiental de desarrollo óptimo, determinado por su ambiente natural, en el que han aprendido a adaptarse a lo largo del tiempo; el conocimiento de tales condiciones le ha permitido a los humanos poder desarrollar prácticas productivas y de conservación de las especies. En la medida en que el cambio climático altera sus rangos ambientales, las plantas y animales deben desarrollar estrategias de conservación o, en su defecto, perecer. Las especies se moverán a sitios donde las condiciones ambientales sean propicias o podrían quedarse en el mismo sitio y desarrollar adaptaciones al cambio climático.

El punto clave consiste en conocer cuáles son los rangos ambientales en que se desarrollan las especies, cómo van a cambiar esas variables climáticas y si las especies tendrán oportunidad de desplazarse, adaptarse o simplemente desaparecer. Para responder a estas inquietudes es necesario contar con una herramienta que relacione el clima con la distribución natural de las especies, y precisamente el sistema de zonas de vida, desarrollado por Leslie Holdridge [1987. *Ecología, basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José], permite establecer esa relación. Este sistema, caracterizado por clasificar los ecosistemas mediante rangos climáticos, utiliza las dos variables climáticas más importantes: temperatura y precipitación. La temperatura es convertida a biotemperatura considerando solamente el desarrollo fotosintético de las plantas, definido preliminarmente entre los 0 ° C y los 30 ° C. El sistema permite identificar y clasificar un ecosistema simplemente conociendo la precipitación y la temperatura de un determinado sitio, como se puede observar en el diagrama de zonas de vida adjunto.

Las zonas de vida se aplican en tres niveles: El primer nivel es una clasificación macro que considera las dos variables climáticas mencionadas. Hay un segundo nivel, que en realidad es el propio ecosistema, donde se considera otras variables ambientales específicas del sitio, como el suelo, el relieve y otras condiciones climáticas especiales como la presencia de sitios nubosos o de un periodo seco prolongado; a este nivel se le llama asociación y puede ser de diferentes tipos: hídrico, edáfico, climático o atmosférico. El tercer nivel comprende el grado de intervención del ecosistema, que se puede entender como el uso actual de la tierra o el estado de sucesión natural en que se encuentra.

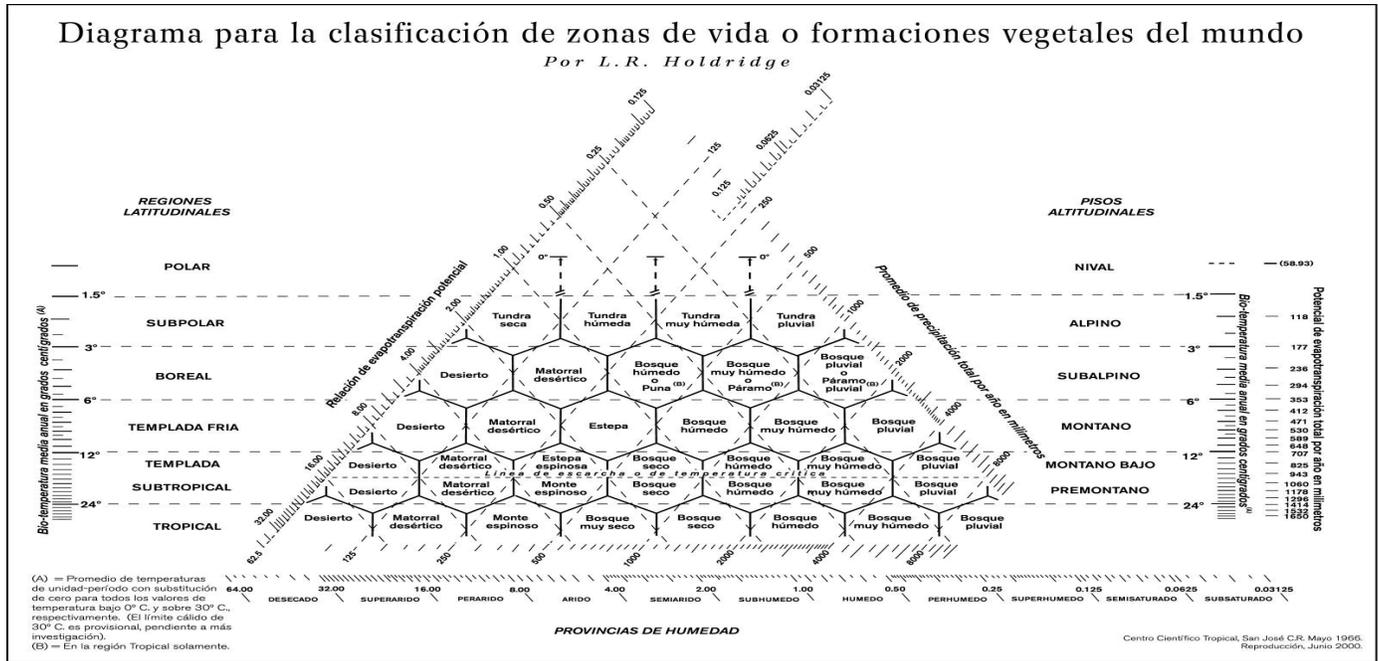
La virtud de este sistema, como herramienta para determinar la vulnerabilidad de los bosques y ecosistemas frente al cambio climático, es que, sabiendo los rangos ambientales de los ecosistemas y conociendo los cambios proyectados a futuro de estas variables climáticas, podemos determinar cómo podrían cambiar tales ecosistemas en el futuro, identificando los vulnerables, de modo que se pueda emprender las acciones correctivas requeridas.

El sistema de zonas de vida se ha aplicado para determinar la vulnerabilidad de los ecosistemas al cambio climático en México, Nicaragua, El Salvador y Costa Rica, para citar algunos casos. Naciones Unidas ha utilizado este sistema para determinar la vulnerabilidad de los ecosistemas a nivel mundial. En Costa Rica se ha realizado dos estudios: Uno desarrollado por el Centro Científico Tropical, que consideró la vulnerabilidad de los

---

El autor, ingeniero forestal especialista en bosques y cambio climático, es investigador en el Centro Científico Tropical.

bosques ante el cambio climático de manera hipotética, al igual que en los otros países: es decir, no consideró las condiciones actuales y futuras de los bosques. Y otro desarrollado por el Instituto Meteorológico Nacional, que fue más allá, haciendo un análisis más complejo, porque en la práctica no se trata solo de determinar los ambientes naturales que deberían existir y cómo van a cambiar; sino que debe considerarse su estado actual de alteración y proyectar esa condición a futuro, para lo que es necesario determinar a futuro el comportamiento del cambio de uso de la tierra, pudiendo considerar por lo menos tres escenarios: pesimista, moderado y optimista.



También, el estudio debe considerar diferentes escenarios climáticos que determinen los cambios bajo diferentes perspectivas de desarrollo socioeconómico. El IPCC ha propuesto varios escenarios, proyectando los posibles cambios climáticos que se prevé para el planeta. Éstos, producto de la aplicación de modelos de circulación general, no establecen diferencias regionales en países de poca extensión como Costa Rica, debido a la escala general de análisis. Es por ello que debe hacerse ajustes, considerando las variaciones regionales de los valores climáticos analizados.

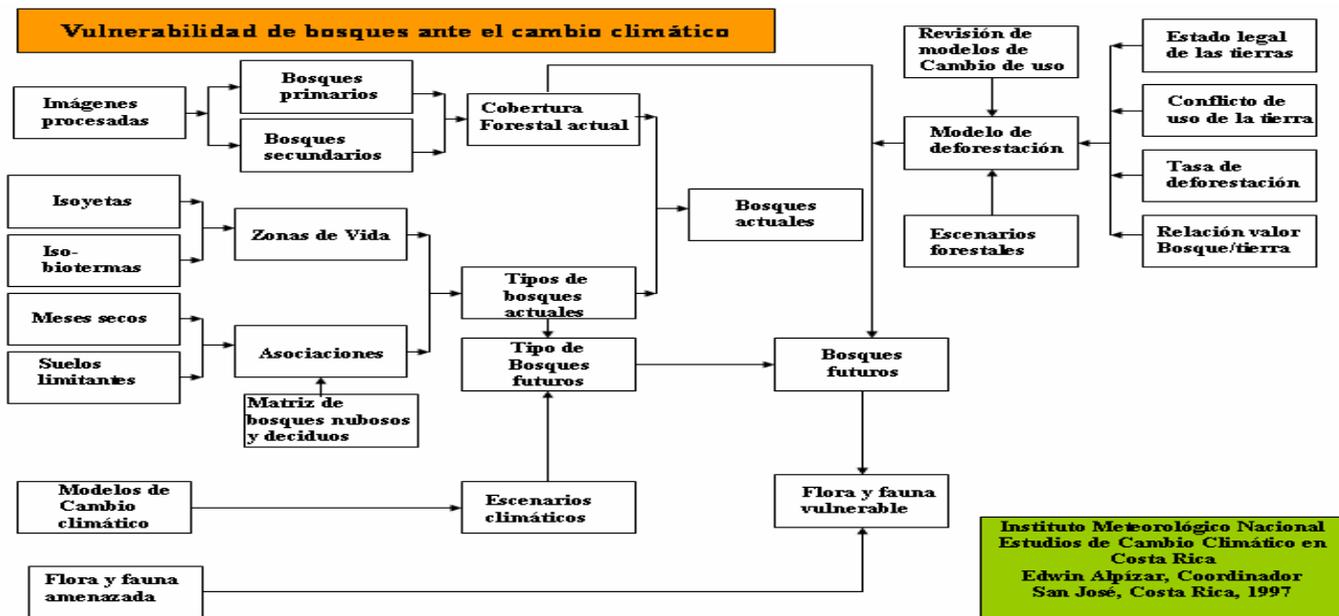
Con los escenarios climáticos definidos, por región del país, es posible determinar la vulnerabilidad de los bosques. El segundo estudio desarrollado en Costa Rica aplicó este modelo de vulnerabilidad de los bosques ante el cambio climático, y el diagrama adjunto muestra cómo se desarrolló dicho estudio.

Si bien el sistema de zonas de vida establece una estrecha relación entre los ecosistemas y el clima, no siempre los datos climáticos de precipitación y temperatura están disponibles en todos los países con el detalle requerido. De hecho, tomar como ciertos los valores climáticos y, a partir de ellos, generar el mapa de zonas de vida, actual y futuro, puede ser un error.

En muchos casos, los pluviómetros y termómetros no permiten capturar la información con la certeza requerida, y es de esperar que un mapa ecológico basado en zonas de vida, generado a partir de las variables climáticas de biotemperatura y precipitación, no coincida con el mapa ecológico clasificado mediante observaciones de la vegetación. La experiencia de los ecólogos que clasifican las zonas de vida muestra que el mejor ajuste lo proporciona la vegetación y no necesariamente los datos climáticos; éstos son solamente un soporte. Es por ello que debe tomarse ciertas precauciones. Es un hecho que en los sitios nubosos la precipitación reportada por los pluviómetros es mucho menor a la real, dado que no considera la precipitación horizontal.

En el caso de la temperatura, la alta variabilidad y las limitaciones financieras de los gobiernos impiden establecer una red completa y llevar un registro adecuado, teniendo disponible información solo en pocos sitios. Por eso debe utilizarse otras formas para generar los mapas climáticos. La temperatura puede ser obtenida por métodos indirectos, como la gradiente térmica, apoyándose en datos de estaciones climáticas con buenos registros para diferentes regiones del país. Procedimientos de este tipo se han desarrollado con aceptable confiabilidad y fueron aplicados en el primer estudio costarricense sobre el tema.

Con la precipitación hay mayor posibilidad de obtener mejor cobertura espacial de los datos que con la temperatura; sin embargo, como se mencionaba, se puede presentar generalidades en las curvas de isoyetas y también no registrar la precipitación horizontal, que es importante en sitios nublados.



Pareciera que la información más próxima a la realidad descansa en los estudios sobre zonas de vida, pero éstos también pueden tener debilidades, dependiendo de la certeza a la hora de su clasificación en el campo. Existen pocos sitios con ecosistemas poco alterados que permitan su evaluación, y la delimitación de las zonas de vida requiere de ecólogos con destreza, que son muy pocos.

Sin embargo, afortunadamente muchos de los países de América tropical cuentan con un mapa ecológico basado en zonas de vida. La desventaja es que varios de éstos fueron elaborados hace muchos años y podrían tener cambios, precisamente inducidos por el cambio climático de los últimos años. No vendría mal hacer una actualización de los mapas vigentes, de lo contrario no nos queda más que partir de la premisa de que los mapas ecológicos son válidos en las condiciones actuales.

Un método propuesto para lograr la coincidencia del mapa ecológico, generado a partir de la clasificación de campo y de los datos climáticos, consiste en determinar los valores climáticos a partir del mismo mapa ecológico. El primer paso sería desagregar dicho mapa en sus dos variables climáticas. Conociendo la zona de vida y tomando como base las curvas de nivel, ajustadas a temperatura y luego a biotemperatura, mediante la gradiente térmica, se puede obtener por diferencia la precipitación. Con ello podemos modelar los cambios de precipitación y temperatura según los escenarios climáticos propuestos y obtener el mapa ecológico futuro. Así podemos tener un mapa mucho más acertado de cómo se podrían ver afectados los ecosistemas en el futuro.

Por otro lado, el modelo propuesto no considera la capacidad de adaptación autónoma de los ecosistemas y, por ende, de las especies. Lo que sí puede demostrar este análisis es si una especie se va a ver afectada por la pérdida de su hábitat. Para determinar la vulnerabilidad de especies es necesario hacer un análisis más detallado: primero se determina la distribución natural de las especies y luego se identifica la presencia de bosque en los sitios donde se desarrolla. Lo recomendable es partir de especies que hoy día ya se conocen como especies amenazadas o en peligro de extinción, aunque el análisis podría ser extensivo a otras especies de importancia.

El cambio de uso de la tierra es un insumo vital en el estudio. Al cambiar las zonas de vida también el cambio de uso puede verse afectado, al presentarse tierras más o menos productivas, por lo que es una variable intrínseca en el modelo que debería considerarse, pero ello hace más complejo el análisis.



# Previsible impacto del cambio climático sobre el manglar Guacalillo, Costa Rica

LILLIANA PIEDRA y KATTIA PIEDRA

Entre las consecuencias del cambio climático están el aumento en el nivel del mar, la llegada al océano de aguas provenientes de fuentes como hielo derretido de los glaciares y las capas polares, la disminución del tamaño de los glaciares en los cinco continentes y la expansión termal del agua de los océanos. A medida que la temperatura de las aguas oceánicas aumente y los mares se hagan menos densos, éstos se expandirán ocupando una mayor superficie. Un aumento de la temperatura acelerará la tasa de aumento del nivel del mar, la disminución del caudal de los ríos, una mayor radiación solar, la desaparición de especies extremadamente sensibles a los cambios de temperatura, y, en los seres humanos, el aumento de enfermedades como el cáncer de piel.

En Costa Rica, los efectos del cambio climático podrán ser sequías prolongadas, inundaciones, mayor escorrentía, huracanes más dañinos, más sedimentos arrastrados que aumentarán los problemas de inundaciones, pérdida de la zona costera por el aumento en el nivel de los océanos, disminución del tamaño de los bosques de altura normalmente fríos y desaparición de especies habitantes de éstos.

Dentro de las zonas costeras uno de los ecosistemas más frágiles es los manglares, que son considerados humedales y están en la categoría de manejo de *reserva forestal*. Los manglares son ecosistemas de zonas litorales tropicales y subtropicales, localizados en la franja intermareal de áreas protegidas de la acción directa del oleaje, en suelos planos y fangosos, inundados por las mareas con frecuencias relativas a su amplitud y topografía del suelo, en estuarios, bahías, ensenadas, lagunas costeras, esteros y desembocaduras de ríos. Son de los ecosistemas más productivos y biodiversos del mundo.

A continuación se expone los resultados de un estudio sobre el efecto del cambio climático global en el ecosistema de manglar de Guacalillo, en la costa pacífica de Costa Rica (Puntarenas), realizado con base en las estadísticas mundiales de cambio de temperatura y variación en el nivel del mar.

Los objetivos orientadores del estudio fueron: (1) establecer los posibles efectos de las variaciones en temperatura sobre el sistema de manglar de Guacalillo; (2) determinar el efecto de la variación en el nivel del mar sobre el manglar de Guacalillo, y (3) predecir la variación en el área de manglar como una respuesta al cambio climático global.

El manglar Guacalillo (ubicado en Bajamar, cantón de Garabito, provincia de Puntarenas), que forma parte del Área de Conservación Pacífico Central, tiene un clima muy cálido, con un periodo seco relativamente largo que alcanza hasta seis meses: la temperatura media es de 27 ° C y los máximos y mínimos corresponden a 33 ° C y 23 ° C, respectivamente. La humedad relativa promedio anual es de un 75 por ciento, siendo septiembre el mes más húmedo (90 por ciento) y febrero el más seco (65 por ciento) El brillo solar promedio anual corresponde a siete horas diarias. La región está calificada como de clima tropical lluvioso y tropical seco, y pertenece a la zona de vida trópico húmedo caliente.

La red hídrica que influye sobre este manglar está compuesta por las quebradas Guachipelín, Mariana y Parales y por el río Grande de Tárcoles que recoge las aguas de la región central del país. Este último acoge este manglar sobre una planicie aluvial.

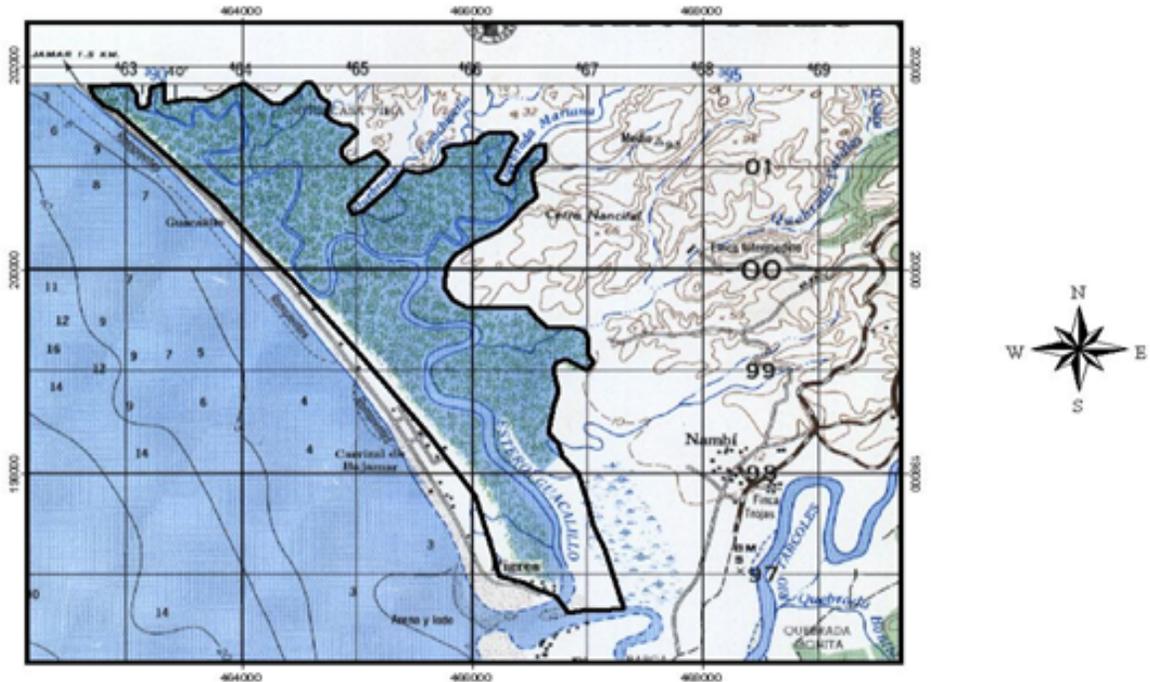
El manglar posee una superficie de 1.060.618 ha en las que se encuentran representadas tres zonas de vida: bosque húmedo premontano transición a basal, bosque húmedo tropical transición a perhúmedo y bosque húmedo tropical transición a seco. El manglar se delimitó utilizando el atlas digital del Instituto Tecnológico de Costa Rica (2004) y mediante verificación de campo utilizando un *gps* marca Garmin GPS map 60 cs. Se elaboró un mapa digital de la ubicación del manglar y, sobre éste, se modeló las modificaciones esperadas como consecuencia del cambio climático global.

Se realizó una revisión bibliográfica sobre los ecosistemas de manglar y las respuestas fisiológicas a las

variaciones en inundación que permitió realizar una predicción de los posibles cambios en dicho sistema.

El estudio arrojó los resultados que de seguido se exponen:

Se estimó un área de manglar de 1.060.618 ha con una relación área perímetro superior a 1, lo que muestra que la forma del ecosistema es muy irregular con un efecto de borde alto. Se determinó que las variaciones que puedan darse a nivel de la costa, específicamente en la variación del nivel de mar, podrían afectar de forma importante el interior.



**Figura 1. Delimitación del manglar Guacalillo.**

El manglar se ubica entre los 0 y los 5 m.s.n.m. Las zonas de menor elevación se ubican en la zona cercana a la costa y a los bordes del estero Guacalillo; las de mayor elevación están en la parte más interna, colindando con áreas de más altitud. Considerando un escenario de 0,3 m de aumento del nivel del mar, el área de inundación permanente en el manglar podría aumentar alrededor de 10 ha, lo que implicaría una ampliación del canal central y la consiguiente disminución de la cobertura vegetal del bosque.

Dado que está establecido que el aumento en la temperatura media global provocará una elevación del nivel de los océanos de entre 0,3 m -en un escenario optimista- y 1,0 m -en un escenario pesimista- en los próximos 100 años, puede preverse una transgresión (retroceso) de la línea ribereña hasta una nueva posición de equilibrio en el escenario optimista, o una ampliación de las áreas sujetas a inundación mareal en el escenario pesimista. En ambas circunstancias, las zonas bajas con un fuerte desarrollo podrían experimentar cambios, limitaciones y daños ocasionando un elevado costo económico y social. Pero como el proceso de cambio aparentemente será lento en comparación con la actividad humana, aún es posible planificar el desarrollo tomando en consideración esos cambios naturales como una componente importante, para así minimizar los posibles perjuicios sobre la inversión financiera, la infraestructura y la sustentabilidad del desarrollo.

Considerando el escenario de 1 m se espera que alrededor de un 65 por ciento del área del manglar se inunde completamente principalmente en el área que se ubica frente a la línea de costa. En este caso no solo se producirá un ensanchamiento del canal sino que se establecerán áreas de inundación en esas llanuras aluviales.

Los manglares, capaces de soportar temperaturas que oscilan entre los 24 ° C y los 30 ° C, están constituidos por especies frágiles y sensibles a los cambios ambientales a pesar de las adaptaciones que presentan para sobrevivir en condiciones extremas de oxigenación y salinidad. Dado que las estimaciones de variación de temperatura en los próximos 100 años señalan que serán de 1 ° C por cada 10 años, las temperaturas llegarán a ser superiores a las que se encuentran adaptadas las especies. Y puesto que desde el punto de vista evolutivo 100 años son un periodo muy corto, la posibilidad de que las especies generen nuevas adaptaciones al nuevo ambiente son muy reducidas.

Dentro de los principales efectos que la variación de temperatura podría tener en las especies de mangle son: reducción de la viabilidad de semillas por sobreexposición térmica, reducción de la tasa de supervivencia de propágulos, reducción de la supervivencia de adultos e inhibición de la tasa fotosintética.

En relación con los períodos de inundación, los principales efectos sobre los árboles de mangle son: mortalidad de los propágulos por largos períodos de inundación, imposibilidad de fijación de semillas y propágulos, neumatóforos inundados -lo que imposibilita el intercambio gaseoso-, reducción de la capacidad de las raíces de fijarse al suelo y pérdida del follaje que permanece constantemente inundado en árboles adultos. Adicionalmente, es probable que muchas especies dependientes del manglar no encuentren el hábitat adecuado.

**E**n el escenario de un aumento de 0,3 m en el nivel del mar podría provocarse un aumento en el ancho del canal del estero Guacalillo que favorecería los procesos erosivos, con el consiguiente derrumbe de las paredes de sustrato que sostienen los árboles, provocando la caída de éstos -principalmente los ubicados en las riberas-, lo que podría ocasionar obstrucciones y represamientos del agua que, a su vez, causarían más ensanchamiento, caída de árboles y retención de agua en las áreas de inundación.

En el escenario pesimista -el de aumento de un 1 m en el nivel del mar- el canal del estero prácticamente desaparecería, la zona de inundación sería de un 65 por ciento del manglar, las paredes de sustrato se derrumbarían al igual que los árboles de la ribera provocando la caída de los árboles adultos, lo que provocaría un represamiento que aumentaría la zona de inundación permanente. Los árboles que están en el centro del manglar perecerían porque su fijación al suelo se debilitaría por permanecer siempre inundados; la fijación de propágulos y semillas sería mínima (solo en la zona no inundada) y, en consecuencia, el manglar disminuiría su tamaño considerablemente.

Los organismos litorales y supralitorales como los mangles se adaptan para resistir temperaturas altas y, a menos que el aumento de temperatura (por ejemplo en 1,5 °C) afecte el ciclo reproductor, la elevación de este factor tendría efectos probablemente no medibles (Maul 1989). Aunque en general existe poca información sobre los manglares, el impacto por el ascenso del nivel del mar se cree que serán capaces de tolerarlo, siempre que otros factores ambientales no cambien el equilibrio natural (Ibid.).

Algunos trabajos reportan que los manglares costeros pueden quedar sumergidos y que el rápido ascenso del nivel del mar tendería a inundar los bosques de mangles más adentrados en tierra, situación que puede ser más drástica en los ya impactados. No se conoce con certeza en qué medida esto pueda afectarlos aunque si podría tener una influencia en la zonación del bosque, en la cual juega un importante papel la relación con el agua.

Por otra parte, el suelo del manglar alberga una importante biodiversidad adaptada al flujo y reflujo de la marea que podría ser drásticamente alterada por cambios en los factores que rigen sus ciclos diarios de conducta. Otro tanto ocurre con la fauna asentada en sus raíces, que puede verse afectada por los cambios bruscos de salinidad. Precisamente, el grado de especialización de este ecosistema hace que las especies que la habitan no puedan migrar a otro, por lo que las afectaciones a la biodiversidad son preocupantes.

La capacidad adaptativa de los manglares al cambio climático se espera que varíe según las especies y las condiciones locales (Ibid.). Las construcciones costeras reducen su capacidad natural de adaptarse, por la pérdida de terreno, y su capacidad de emigrar tierra adentro, por la presencia de infraestructuras y actividades humanas que constriñen su espacio de desplazamiento (Watson *et al.* 1997).

Como se prevé que con el cambio climático el patrón de lluvias cambiará, y los aguaceros estarán concentrados en intensidad y tiempo, es probable que se dé un aumento en el caudal de los ríos, lo cual elevaría de forma considerable la posibilidad de inundaciones en las zonas aledañas al manglar. Y al existir una zona de inundación permanente, que varía entre 10 ha para el escenario optimista y 65 por ciento del área del manglar para el escenario pesimista, se prevé que el área de inundación podría aumentar considerablemente para el período lluvioso -de julio a noviembre. Esto tendrá como consecuencia que el ecosistema de manglar sea más sensible y que los árboles permanezcan mayormente inundados durante la época lluviosa, dando como resultado una alta mortalidad de propágulos y de adultos.

La reducción del área del manglar y el aumento del área de inundación, además de afectar la pesca -por la migración de las especies- y el turismo -por la dificultad de navegación y la migración de aves-, afectarán la salud humana, porque muchas enfermedades y sus efectos agudos están asociados a temperaturas elevadas, y porque el agua (con el ascenso del mar) es hábitat de organismos transmisores de enfermedades. Por ejemplo, se espera que el aumento de temperatura puede incrementar el número de dinoflagelados asociados a la ciguatera (Sleath 2000), por lo que el envenenamiento por ciguatera podría incrementarse con el calentamiento global.

La adaptación en el contexto del cambio climático puede definirse como una estrategia deliberada de gestión para reducir al mínimo los efectos adversos del cambio climático, incrementar la capacidad de recuperación/adaptación de sistemas vulnerables y reducir el peligro de que el cambio climático cause perjuicios a

sistemas humanos y ecológicos. Los elementos de una estrategia de adaptación deben abarcar no sólo alteraciones físicas en el sistema de gestión sino también cambios tecnológicos e institucionales que permitan hacer frente a condiciones dinámicas (Bergkamp y Orlando 1999).

La adaptación al cambio climático puede tratarse de dos maneras: interviniendo sobre las causas -mitigación de las emisiones- e interviniendo sobre las consecuencias -adaptación propiamente dicha al cambio climático. Dado que algunas de las posibles medidas de adaptación tienen costos muy considerables, la incertidumbre inherente a la selección de los escenarios hace que se deba ser cauto con la adopción de medidas de adaptación que involucren ese tipo de costos. Lo que sí debe hacerse es, por un lado, adoptar las medidas que producen beneficios en cualquier caso y, por otro lado, tener en cuenta la sensibilidad de cada lugar de la costa -vulnerabilidad- en el proceso de planificación (Saizar 1996). En tal sentido, son valiosas todas las medidas que contribuyen a mitigar impactos antrópicos actuales no relacionados con el cambio climático, pero que su acción nociva torna más vulnerable la zona (López-Portillo y Ezcurra 2002).

Concluimos estableciendo que, sin importar el escenario futuro, habrá una pérdida importante de la vegetación del manglar y, por ende, de la fauna. El cambio de la temperatura y el ascenso del nivel del mar afectarán al turismo -directa e indirectamente- en la zona y tendrán un efecto en la salud humana en el lugar. Con el cambio climático se espera que se incremente el riesgo de inundación de tierras bajas, la erosión de los litorales blandos, el riesgo de intrusión salina y la frecuencia del daño causado por tormentas. Sin manglares la vulnerabilidad aumenta exponencialmente y, con ella, la pérdida de vidas.

Recomendamos incrementar la investigación en la zona para contar con patrones de línea base a fin de estimar significativamente los cambios. Debe definirse estrategias deliberadas de gestión para reducir al mínimo los efectos adversos del cambio climático. Hay que supervisar los problemas de salud de la zona costera (por ejemplo, mareas rojas y ciguatera) evaluando su posible aumento bajo los cambios en el clima. Debe incorporarse la variable cambio climático global en los procesos de planificación de la zona, principalmente en los planes reguladores. Hay que impulsar una repoblación vegetal en el manglar para lograr la restauración de áreas degradadas poniendo atención a las regiones donde la cubierta boscosa ya ha sido previamente alterada. Debe restaurarse y rehabilitarse las zonas de humedales fluviales y costeras para posibilitar la anegación natural de grandes extensiones de tierra y mantener los balances hídricos. Finalmente, hay que eliminar las presiones actuales que reducen la capacidad de la zona de responder al cambio climático, particularmente todas las formas de contaminación doméstica e industrial.

#### Referencias bibliográficas

- Bergkamp, G. y B. Orlando 1999. *Los humedales y el cambio climático: examen de la colaboración entre la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán 1971) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. En: [www.ramsar.org/key\\_unfccc\\_bkgd\\_s.htm](http://www.ramsar.org/key_unfccc_bkgd_s.htm).
- Maul, G. 1989. *Implications of Climate Changes in the Wider Caribbean Region*. Caribbean Environment Programme. United Nations Environment Programme. Technical Report No. 3.
- López-Portillo J. y E. Ezcurra. "Manglares de México: una revisión", en *Madera y bosques* Número especial, 2002.
- Pérez, R., L. A. Amadore y R. B. Feir. "Climate change impacts and responses in the Phillipine coastal sector", en *Climate Research*, 12(3-3), 1999.
- Saizar, A. (1996). "Gestión de la zona costera y cambio climático", en: *Hacia el desarrollo sostenible de la zona costera del Río de la Plata, Conferencia Internacional, Montevideo, 25-27 de noviembre de 1996, Resumen de Exposiciones*. En: [www.idrc.ca/lacro/docs/conferencias/ecodoc3.html#gestiondelazonacosteraycambioclimatico](http://www.idrc.ca/lacro/docs/conferencias/ecodoc3.html#gestiondelazonacosteraycambioclimatico).
- Sleath, M. 2000. *Tropical fish may be off the menu*. *News in Science XX*. En: [www.abc.net.au/science/news/print/print\\_101874.htm](http://www.abc.net.au/science/news/print/print_101874.htm).
- Watson R. T. et al. (eds.) 1997. *Summary for Policymakers. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. A special Report of IPCC Working Group II. Intergovernmental Panel on Climate Change*.  
[http://www.tendencias21.net/index.php?action=article&id\\_article=67967](http://www.tendencias21.net/index.php?action=article&id_article=67967)  
<http://www.actionbioscience.org/esp/environment/chanton.html> <http://www.tecnociencia.es/especiales/cambioclim/1.htm>





# Enfoque ecosistémico para restaurar humedales costeros ante los cambios globales

ALEJANDRO YÁÑEZ-ARANCIBIA, JOHN W. DAY, ROBERT R. TWILLEY y WILLIAM J. MITSCH

Los cambios globales impactarán significativamente el manejo integrado de la zona costera en el siglo 21: destruyendo humedales, colapsando recursos naturales, expandiendo ciudades y centros poblados, incrementando la degradación ambiental, creando incertidumbre metodológica respecto de la restauración, acelerando el cambio climático global, aumentando el costo y disminuyendo la disponibilidad de energía, incrementando la presión económica y social y elevando la dramática incompreensión del manejo ecosistémico de los humedales costeros.

Vivir por siglos en las costas del golfo de México constituye una historia de enfrentamiento con inundaciones de primavera (en Estados Unidos) e inundaciones de verano (en México) y con fuertes tormentas y huracanes de verano-otoño en ambas costas. Por una parte, las inundaciones y los huracanes son las condicionantes ambientales del paisaje costero, además de controlar el qué y el dónde la gente puede asentarse con calidad de vida; por otra parte, ambas condicionantes ambientales modulan los mecanismos de producción natural en la plataforma continental somera y, como consecuencia, diversas especies de recursos pesqueros acoplan sus ciclos de vida con estos procesos ambientales siguiendo un paisaje *en-continuo* desde la cuenca hidrológica hacia las lagunas costeras y estuarios, deltas y el océano adyacente, siendo los humedales la pieza clave en la integridad ecológica de la zona costera (Yáñez-Arancibia *et al.* 2004). Estas dos condicionantes ambientales también modulan la notable diversidad y la productividad de los humedales costeros que se encuentran en el golfo de México. En el siglo 21 también se debe considerar cómo esos hábitat costeros sostienen a las comunidades de pobladores, pero también cómo son afectadas por el propio desarrollo social.

Con la premisa de que solo es sustentable el manejo basado en el funcionamiento del sistema ecológico, nuestro enfoque para restaurar y sostener esos hábitat debe ser colocado en un contexto social, económico y ecológico, entendiendo el enfoque ecosistémico -o manejo basado en el funcionamiento del sistema ecológico- como una perspectiva para ver dónde estamos, como un primer paso en el proceso de restauración/rehabilitación de los humedales de la zona costera en el golfo de México, principalmente porque en el siglo 21 aparecen nuevos componentes en la ecuación para restaurar hábitat costeros, como son el cambio climático global, el ascenso relativo del nivel medio del mar, la subsidencia, la acreción, la derivación de los ríos, la disponibilidad y costo de la energía, los ecosistemas en auto-diseño y las unidades ambientales, para contender con estos problemas en diversas latitudes (Yáñez-Arancibia y Day 2004, Day *et al.* 2005 y 2007, Day y Yáñez-Arancibia 2007, Boesch 2006, Costanza *et al.* 2006, Lane *et al.* 2006, Mitsch y Day 2006).

Antes de pasar a la discusión de este planteamiento es preciso establecer dos definiciones de referencia: *Restauración* es regresar un ecosistema lo más posible a sus condiciones antes del disturbio -utilizando ciencia tanto como se pueda- enfocando los recursos de peces, la vida silvestre, la calidad de agua y el fortalecimiento de la vegetación costera (Chapman y Reed 2006); el énfasis es sobre la estructura. *Rehabilitación* es la recuperación de la salud del ecosistema para mantener un metabolismo productivo y obtener el óptimo de los servicios ambientales fortaleciendo sus condiciones resilientes, sobre base científica y tecnológica (Costanza *et al.* 2006, Day *et al.* 2007, Twilley 2007 [entrevista]); el énfasis es sobre el funcionamiento.

El manejo ecosistémico requiere integración de múltiples componentes y usos del sistema, aproximación social, económica y ambiental identificando problemas y esforzándose por obtener resultados sustentables, precaución para evitar acciones deletéreas, y adaptaciones con base en experiencias tendientes al logro de

---

A. Yáñez ([alejandro.yanez@inecol.edu.mx](mailto:alejandro.yanez@inecol.edu.mx)) es investigador en el mexicano Instituto de Ecología (Veracruz) e integrante de la Comisión Mundial de Manejo de Ecosistemas de la IUCN. J. Day ([johneday@lsu.edu](mailto:johneday@lsu.edu)) y R. Twilley ([rtwilley@lsu.edu](mailto:rtwilley@lsu.edu)) son investigadores en Louisiana State University (EU). W. Mitsch ([mitsch.1@osu.edu](mailto:mitsch.1@osu.edu)) es investigador en The Ohio State University (EU).

soluciones efectivas y al fortalecimiento del proceso en el tiempo.

Puede reducirse la incertidumbre científica a la luz de la figura 1 (de R. R. Twilley), donde se destacan dos columnas principales: la de la derecha, el “programa científico”, la de la izquierda, la “disponibilidad de datos e información”, interactuando ambas a través de tres agendas principales: la “planeación”, la “implementación” y la “evaluación”. Desde nuestro enfoque, el proceso de planeación es la pieza clave para mantener viva la hipótesis que se basa en el funcionamiento del ecosistema. Una vez implementado el proceso, las respuestas del sistema son el principal insumo para su evaluación, además de que su desempeño retroalimenta las dos columnas principales. La evaluación del proceso se ilustra en las tres gráficas de la figura 2: (A) La recuperación nunca alcanza el nivel máximo de desarrollo de las condiciones prístinas; más aun, el máximo nivel de desarrollo disminuye en el tiempo declinando marcadamente la integridad ecológica del sistema frente a los cambios globales. Al monitorear la evaluación del desempeño en la meta de restauración (B), se observa que el ecosistema en restauración se acerca ligeramente al ecosistema de referencia, pero después de algún tiempo hay tendencia a regresar al estado de degradación, lo cual es muy común en estos procesos, porque lograr la estructura y el funcionamiento del sistema de manera similar a sus condiciones prístinas es prácticamente insostenible en el tiempo. La alternativa, entonces, es aproximarse a una rehabilitación de las funciones más cercanas de sus servicios ambientales (servicios como el metabolismo de materia orgánica para mantener la producción de biomasa útil, la depuración de aguas residuales y la dilución de la contaminación, la retención de sedimentos y nutrientes, la protección de la calidad del agua, la acreción sedimentaria para la protección de la línea de costa fortaleciendo la vegetación costera y amortiguando la subsidencia para prevenir la intrusión salina, el control de inundaciones y recarga de aguas subterráneas y la protección de tormentas amortiguando el ascenso relativo del nivel medio del mar) como se ilustra en (C). En el modelaje de prueba de la predicción de la hipótesis se observa que la alternativa para romper el círculo vicioso entre degradación-restauración en (C) es la salida alterna hacia la rehabilitación, la que con una estructura relativamente distinta al ecosistema prístino se mantiene en el tiempo funcionando con sus servicios ambientales y sosteniendo su resiliencia. Frente a los cambios globales esta alternativa (C) parece ser la viable en el siglo 21.

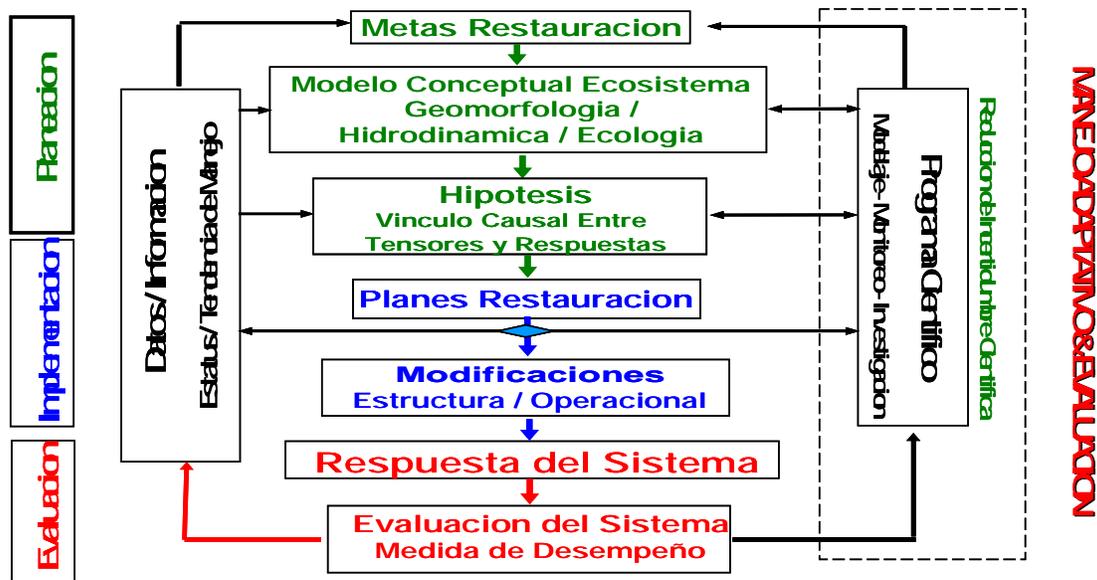


Figura 1. Implementación del manejo adaptativo, rehabilitación/restauración, y su evaluación en sistemas de humedales costeros (R. R. Twilley [entrevista]). Las columnas de “datos e información” y la del “programa científico” se comunican y fortalecen a través de las tres agendas de “planeación”, “implementación” y “evaluación”. La fuerza de la hipótesis se sostiene en el modelo conceptual del ecosistema. La respuesta del sistema es fundamental para retroalimentar todo el proceso.

Por ejemplo, se ha propuesto una restauración ecológica e hidrológica de la cuenca Mississippi-Ohio-Missouri, en Estados Unidos, como solución a las condiciones recurrentes de hipoxia en el golfo de México, debidas a excesos de nitrógeno-nitratos que causan eutrofización, siendo su fuente el incremento de fertilizantes en las regiones influidas por esta cuenca de drenaje (Lane *et al.* 2006). Esta región se ha drenado

artificialmente y se ha perdido entre el 80 y el 90 por ciento de sus humedales originales (Mitsch y Day 2006, Day *et al.* 2007). Un proceso similar, pero de magnitud inferior, ha ocurrido en la cuenca Grijalva-Usumacinta, en México (Day *et al.* 2003). En ambos países, la pérdida de humedales en sus costas del golfo es cercana a los 250 km<sup>2</sup> por año, por causa de dragado y relleno de humedales en actividades industriales, cambio de uso de suelo, expansión urbana, construcción de canales y bordos para control de inundaciones y alteraciones hidrológicas mayores en la planicie deltaica (Yáñez-Arancibia y Day 2004, Yáñez-Arancibia *et al.* 2004).

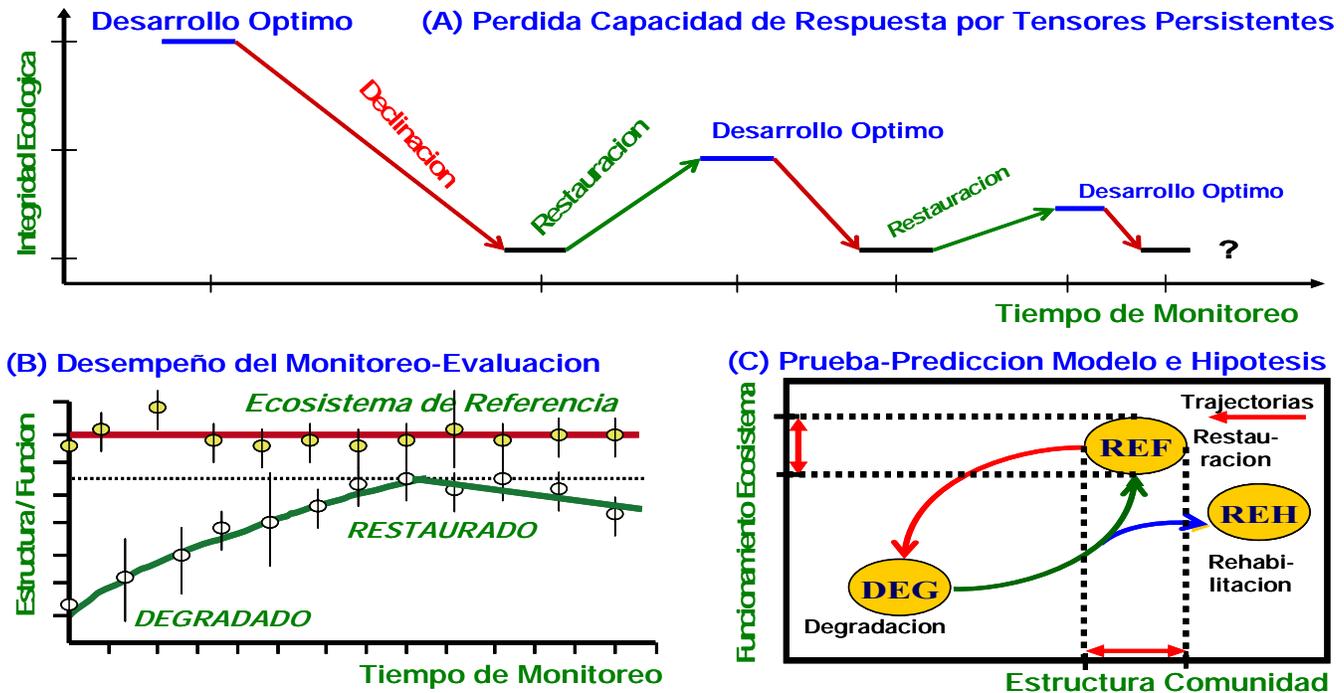


Figura 2. El modelaje y monitoreo son esenciales en el desarrollo del manejo adaptativo, fortaleciendo tanto el modelo conceptual como el modelo de simulación en ecología de la rehabilitación/restauración de humedales costeros. (A) Debido a que la capacidad de respuesta de los humedales costeros a los tensores depende de su resiliencia, la declinación de la integridad ecológica será mas rápida en el tiempo y la restauración mas incierta. (B) El ecosistema bajo restauración se acerca ligeramente al ecosistema de referencia, pero después de algún tiempo hay tendencia a regresar al estado de degradación. (C) Es la salida alterna hacia rehabilitación, la cual con una estructura relativamente distinta al ecosistema prístino se mantiene en el tiempo funcionando con sus servicios ambientales y sosteniendo su resiliencia.

Los esfuerzos de restauración/rehabilitación costera deberán ser mucho más intensos, sobre todo para atenuar los impactos del cambio climático, incluyendo el acelerado ascenso relativo del nivel del mar (i.e., 40 a 100 cm para fines del siglo 21 en el golfo de México) y cambios en los patrones de precipitación (i.e., más de 22 por ciento a fines de siglo). Los futuros esfuerzos de rehabilitación deberán enfocarse en usos menos intensos de energía y empleo de técnicas de manejo de ingeniería ecológica que utilicen la energía natural del sistema, porque el bombeo de agua y sedimentos será prácticamente incosteable en el futuro. Con el incremento de iniciativas de rehabilitación de humedales costeros el proceso de ecosistemas de auto-diseño (o reacomodación frente a los cambios globales) debe ser revisado siguiendo la huella energética, porque es un enfoque viable en el proceso de rehabilitación, y los atributos ideales de la rehabilitación funcional auto-sustentable constituyen una realidad que debe ser utilizada en la planificación ambiental estratégica de la zona costera (Costanza *et al.* 2006, Mitsch y Day 2006, Day *et al.* 2007). Probablemente, una de las principales justificaciones para rehabilitar con urgencia los humedales costeros del golfo de México sea el costo del deterioro frente a los desastres naturales. Costanza (2007) ha estimado que en Estados Unidos los humedales proveen un servicio ambiental de protección contra los huracanes y tormentas de \$23,2 billones por año, por lo que su rehabilitación/restauración/preservación es una estrategia extremadamente benéfica en términos de costo-beneficio para la sociedad..

El manejo adaptativo es un proceso central en la rehabilitación de humedales costeros en el golfo de México. Basado en estas experiencias, el enfoque de ecosistema para el manejo costero debe encausarse hacia: (1) actividades científicas que orienten soluciones requeridas para la rehabilitación, (2) construcción de puentes

de conexión que aproximen las barreras científicas y de manejo para hacer más efectiva la ciencia integrada al manejo, (3) poner más atención para comprender los resultados y productos que fortalezcan la resiliencia del



Belice

Olivier Chassot

ecosistema frente a los cambios globales, (4) fortalecimiento de la capacidad de la ciencia para caracterizar la incertidumbre y comunicarla con eficiencia e (5) integración de modelos con bases de datos, observaciones e investigación para facilitar un manejo adaptativo eficaz.

Los beneficios del enfoque ecosistémico para la rehabilitación de humedales, además de resolver problemas de integridad ecológica, protección, eutrofización e hipoxia, incluyen: (1) incremento de la calidad del agua, (2) reducción de factores que deterioran la salud pública, (3) mitigación de inundaciones que afectan la ubicación en la zona

costera donde la rehabilitación está ocurriendo y (4) ahorro de mucho dinero. Antes de dar inicio al proceso de rehabilitación es necesario un enfoque ecosistémico de largo plazo, formal y riguroso, para reducir incertidumbres.

#### Referencias bibliográficas

- Boesch, D. F. "Scientific requirements for ecosystem-based management in the restoration of Chesapeake Bay and Coastal Louisiana", en *Ecological Engineering* 26, 2006.
- Chapman, P. y D. Reed. "Advances in coastal habitat restoration in the northern Gulf of Mexico", en *Ecological Engineering* 26 (1), 2006.
- Costanza, R. 2007. *The value of coastal wetlands for hurricane protection. Estuarine Research Federation Conference. 19<sup>th</sup> Biennial Conference. Nov 2007, Providence, RI.*
- Costanza, R, W. J. Mitsch y J. W. Day. "A new vision for New Orleans and the Mississippi delta: Applying ecological economics and ecological engineering", en *Frontiers in Ecological Environment*, 4 (9), 2006.
- Day, J. W. y A. Yáñez-Arancibia (eds.). 2007 (en prensa). *The Gulf of Mexico: Ecosystem-Based Management*. The Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas A&M University Press, College Station, TX.
- Day, J. W. et al. "Using ecotechnology to address water quality and wetland habitat loss problems in the Mississippi basin, and Grijalva-Usumacinta basin: A hierarchical approach", en *Biotecnology Advances*, 22 (1-2), 2003.
- Day, J. et al. "Implications of global climate change and energy cost and availability for the restoration of the Mississippi delta", en *Ecological Engineering* 24, 2005.
- Day, J. et al. "Restoration of the Mississippi Delta: Lessons from hurricanes Katrina and Rita", en *Science*, 315, 23 march 2007.
- Lane, R., J. W. Day y J. N. Day. "Wetland surface elevation, vertical accretion, and subsidence at three Louisiana estuaries receiving diverted Mississippi river waters", en *Wetlands*, 26 (4), 2006.
- Mitsch, J. W. y J. W. Day. "Restoration of wetlands in the Mississippi-Ohio-Missouri river basin: Experience and needed research", en *Ecological Engineering* 26 (1), 2006.
- Yáñez-Arancibia, A. y J. W. Day. "Environmental sub-regions in the Gulf of Mexico coastal zone: The ecosystem approach as an integrated management tool", en *Ocean & Coastal Management* 47, 2004.
- Yáñez-Arancibia, A. et al. "Estuary-shelf ecological interactions: Conceptual framework for coastal environmental management", en s.a. 2004. *Environmental Diagnosis of the Gulf of Mexico*, Ine-Semarnat, Inecol A. C., The Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A & M University-Corpus Christi.





# Cambio climático contra tortugas marinas

EDWIN ALPÍZAR

En el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) queda claro que el cambio climático es un fenómeno evidente y que ya está provocando trastornos ambientales graves en todo el planeta y, consecuentemente, a la humanidad. Aún hay dudas sobre la magnitud de sus impactos actuales y de los efectos ulteriores que podría acarrear, y el no tener certezas sobre esto puede inducir a dudas respecto de las formas de mitigar y/o adaptarse a las posibles situaciones sobrevinientes. En muchos de los casos se requiere de estudios más profundos a nivel local para predecir tales efectos.

Uno de los principales trastornos de los que nos hablan los expertos es el derretimiento de los cascos polares. Recientemente, el oceanógrafo alemán Eberhard Fahrbach, considerado uno de los máximos expertos mundiales en océanos polares, indicó que a finales de este siglo el hielo del océano Ártico desaparecerá completamente durante los meses de verano, constituyendo esto una situación muy grave no solo por el posible aumento del nivel del mar, estimado en unos 60 cm, sino también por la aniquilación del ecosistema polar. Otras investigaciones prevén que este deshielo puede ocurrir mucho antes, en torno al año 2050.

Respecto de las tortugas marinas, el cambio climático puede afectar su existencia, considerando que, además, ya hay otros factores antropogénicos que las están alterando. Ellas han sobrevivido más de 150 millones de años y han superado cambios climáticos en otras eras, pero la acción humana puede resultar definitiva en cuanto a la posibilidad de que superen o no ese trastorno climático. El cambio climático propiciará un aumento en la temperatura de las aguas, lo que afectará la disponibilidad de alimentos, limitando el desplazamiento de las tortugas a largas distancias para cumplir con su proceso natural de reproducción; además, el aumento de la temperatura en la arena durante el proceso de incubación cambiará la relación del sexo en los huevos.

La solución a esta situación es compleja y requiere del esfuerzo de todas las naciones del mundo, y los acuerdos para adoptar las acciones pertinentes se han demorado demasiado. Sin embargo, hay otro factor que puede contribuir a su sobrevivencia o, por el contrario, a acelerar el proceso de su extinción. Tal factor es la protección de las playas de anidación, pero, más aun que eso, es salvaguardar una franja de costa inmediata a la playa, no solo por el efecto que puede ocasionar la contaminación y la luz producidas por los humanos sino también ante un eventual incremento del nivel del mar que propicie que en el futuro la playa de desove se encuentre más tierra adentro de lo que se encuentra hoy. Por el momento no se sabe cuánto será ese aumento del nivel del mar en las playas de anidación, pero sí se sabe que sucederá y, por lo tanto, se debe de tomar las medidas necesarias para mitigar ese fenómeno. Es importante que las zonas costeras de amortiguamiento de estas playas de anidación consideren este criterio. En el futuro, el mar llegará a tierra más adentro de lo que llega hoy; lo que implicará la salinización de tierras, dificultades para el drenaje de aguas servidas y una reducción apreciable de la zona de amortiguamiento entre la playa de anidación y las áreas con intervención humana.

Costa Rica, a pesar de ser un país pequeño, cuenta con una cantidad significativa de playas tortugueras. Sin embargo, solamente cinco de ellas tienen alguna categoría de protección debido a su importancia. En el Caribe está el Parque Nacional Tortuguero, adonde llega principalmente la tortuga verde (*Chelonia mydas*), y el Refugio de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, adonde arriba la tortuga baula (*Dermochelys coriacea*). En el Pacífico hay tres playas de mayor importancia: Nancite, protegida por el Parque Nacional Santa Rosa; Ostional, protegida por el Refugio de Vida Silvestre del mismo nombre, y playa Grande, que se encuentra en el Parque Nacional Marino Las Baulas, en Guanacaste. De tales cinco, las primeras tres tienen pocas posibilidades de permitir un desarrollo de infraestructura en la zona inmediata a la playa: Tortuguero es un parque nacional donde el estado tiene total posesión de la tierra, además de que lo componen sistemas de humedales; en Gandoca sucede una situación similar y, aunque las tierras no son totalmente del estado, hay limitaciones para el desarrollo de infraestructura, por ubicarse también en humedales; y en el caso de Santa Rosa las tierras son estatales. Por otra parte, en playa Ostional las tierras son del estado pero hay pobladores que viven en la zona con derechos de posesión; ella, que presenta problemas ambientales, cuenta con un sistema de manejo comunitario que controla la extracción de huevos; la arribada masiva de tortugas lora (*Lepidochelys kempii*) pone a esta playa en una situación no tan crítica como la de playa Grande. En ésta última y en sus playas vecinas: Ventanas, Carbón, Tamarindo y Langosta, el caso es diferente: sobre ellas pende

---

El autor, ingeniero forestal especialista en bosques y cambio climático, es investigador en el Centro Científico Tropical.

una amenaza inminente derivada del desarrollo urbano; de hecho, hace unos años la baula llegaba a playa Tamarindo, pero hoy tal desarrollo ha imposibilitado eso.

La situación de playa Grande y del Parque Nacional Marino Las Baulas, en Guanacaste, tiene dos características que la hacen muy sensible a un eventual aumento del nivel del mar. Primero, la principal tortuga que llega es la baula, considerada en situación crítica de peligro de extinción. Segundo, los terrenos que se ubican inmediatamente a la playa son privados, a pesar de ser parque nacional. El Parque comprende una franja de 125 m desde la pleamar ordinaria, de los que 50 m son zona pública, pero los restantes 75 m en su mayoría son privados. Que estas tierras estén en manos privadas es una amenaza inminente para la sobrevivencia de la baula, máxime porque playa Grande está considerada como la más importante de todo el Pacífico Oriental en cuanto a desove de tortugas. Los propietarios de estas tierras pretenden que esta área se mantenga bajo esta condición privada, permitiendo, de manera controlada, el desarrollo de infraestructura. Sin embargo, están



Tortuga lora (*Lepidochelys olivacea*)

Sebastián Troeng

más que demostrados los efectos dañinos del desarrollo urbano y la presencia humana, lo cual, aunado a la posibilidad del aumento del nivel del mar, hará que la zona de protección de 75 m definida por el Parque se vea reducida. En definitiva, ésta es una razón más para garantizar que la franja de protección en este Parque tenga un control estatal total y no se permita desarrollo alguno.





# Adaptación del sistema hídrico al cambio climático, en el noroeste del Área Metropolitana

ROBERTO VILLALOBOS

**E**n Costa Rica se ha avanzado en identificar los sistemas vulnerables al cambio climático (aquellos susceptibles ante las amenazas de éste y/o incapaces de hacerles frente), a la vez que se ha desarrollado proyectos que han generado acciones y capacidades en materia de mitigación; sin embargo, el país carece de una estrategia nacional de adaptación al cambio climático y, por lo tanto, de un proceso para sistematizar la toma de decisiones, definir prioridades y determinar un mecanismo de monitoreo de las acciones en materia de adaptación.

Debido a la importancia del recurso hídrico en el desarrollo energético del país, y a la alta demanda de aquél por parte de los sectores productivos y de la población para consumo directo, las autoridades de gobierno, lideradas por el Ministerio de Ambiente y Energía, tomaron la decisión de priorizar el sistema hídrico en la exploración de medidas de adaptación al cambio climático. Dicha necesidad fue planteada a las autoridades del Programa para las Comunicaciones Nacionales del PNUD-Gef en un encuentro regional centroamericano en la ciudad de México, obteniéndose como resultado la oportunidad de financiamiento -por parte del Fondo para el Medio Ambiente Mundial- de un proyecto regional ahora conocido como “Fomento de las capacidades para la etapa II de adaptación al cambio climático en Centroamérica, México y Cuba”, en el que cada uno de los países involucrados priorizó sus necesidades de investigación. Nuestro Ministerio de Ambiente, por medio del Instituto Meteorológico Nacional, tomó la decisión de desarrollar en Costa Rica un plan piloto que profundizara en la vulnerabilidad del sistema hídrico en la región noroccidental del Gran Área Metropolitana (al norte de la cuenca del río Virilla) ante la amenaza del cambio climático, con la finalidad de proponer medidas de adaptación para el sistema hídrico, comprendiendo las relaciones entre lo social, lo económico y lo ambiental, para así generar capacidad individual e institucional.

Tal proyecto también permitiría responder a los compromisos adquiridos por el país ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, cuyas directrices establecen en el artículo 4, y el párrafo 35, que, en la medida de lo posible, los países incluidos en el Anexo I proporcionen información, una evaluación de las estrategias y medidas para la adaptación al cambio climático en las áreas esenciales, incluidas las de máxima prioridad.

El desarrollo del proyecto está planteado para la región noroccidental del Gran Área Metropolitana, de gran riqueza en aguas superficiales y subterráneas, donde están los principales acuíferos del Valle Central: Colima, Barva y Los Bambinos, de cuya oferta hídrica depende una gran actividad productiva. Administrativamente, el área de estudio, que cubre parte de las provincias de Alajuela, Heredia y San José, incluyendo 13 cantones y 60 distritos, tiene una extensión de 73.753 ha y una población de 642.210 personas, casi un 30 por ciento de la población metropolitana, que es de más de dos millones de habitantes. En ella se localizan dos de las ciudades más importantes del país: Alajuela y Heredia, y en la parte alta se encuentran las últimas zonas de bosque bajo la categoría de área silvestre protegida, de donde fluyen importantes nacientes que conservan parte de la biodiversidad del área.

Siendo que la precipitación es la principal fuente constitutiva de la oferta de agua en la región, la distribución anual y temporal de las lluvias, su cantidad y -en cierto grado- su disponibilidad para los diferentes ecosistemas están influenciadas por la variabilidad climática, que, a su vez, está condicionada por el cambio climático. Eventos como las fases de *El Niño-Oscilación sur* pueden conducir a extremos secos (*El Niño*) o lluviosos (*La Niña*) durante algunos meses del año. Estas variaciones afectan la cantidad y la calidad del agua: tanto los períodos muy lluviosos como los muy secos afectan directamente el abastecimiento de agua potable. Una disminución de la cantidad precipitada afecta la disponibilidad del recurso en las cuencas y, en virtud de un aumento en la concentración de contaminantes, también su calidad. Por otra parte, la mayor intensidad de las lluvias provoca un aumento de caudales y el arrastre de sedimentos, lo que hace imposible el abastecimiento de agua potable debido a la turbiedad,

---

El autor, ingeniero agrónomo especialista en meteorología agrícola, es jefe de Gestión de Desarrollo y coordinador del Programa de Cambio Climático del Instituto Meteorológico Nacional ([rvilla@imn.ac.cr](mailto:rvilla@imn.ac.cr)).

color y presencia de contaminantes.

El cambio climático no solo está afectando el patrón normal de lluvias (distribución, cantidad y disponibilidad), sino también la magnitud y la recurrencia de los diferentes fenómenos de variabilidad climática, que pueden traducirse en eventos extremos de clima de gran magnitud e impacto. El clima, su variabilidad y el cambio climático afectan directa e indirectamente el sistema hídrico, la calidad y la cantidad del recurso agua, así como la sensibilidad de las poblaciones más vulnerables.

El proyecto que emprendemos pretende contestar la siguiente interrogante o problema: ¿Cómo dotar al sistema hídrico y a los subsistemas sociales, económicos y ambientales del área de estudio, de capacidades de adaptación de tal forma que se reduzca su vulnerabilidad ante las amenazas climáticas (variabilidad climática local, eventos meteorológicos extremos y cambio climático)? Y el proyecto no se propone solamente determinar las medidas de adaptación potenciales, sino también definir su viabilidad por medio de una estrategia para el área de estudio que permita incluir las medidas propuestas en los planes operativos de las instituciones y organizaciones que tienen un involucramiento directo, apuntando a que se constituya en una estrategia piloto que, posteriormente, permita aplicar la metodología empleada a nivel nacional.

A efectos de operacionalizar la estrategia, y atendiendo a la existencia de cada subsistema y a las relaciones de causa-efecto de sus problemas, se propuso tres ejes de acción: el ambiental, el social y el económico, a los que a su vez se les construyó -a cada uno- un objetivo estratégico, es decir, los objetivos de la estrategia como tal.

Las medidas, que se conjuntaron, se validaron y han sido incluidas dentro de un plan de acción estratégico, sin ser exhaustivas se tuvieron que priorizar tomando en cuenta criterios definidos. Ellas son de tipo político, social, económico, ambiental, educativo, institucional y organizativo, para poder dotar así al sistema hídrico de capacidades, con la idea de poder reducir las pérdidas económicas, prevenir, disminuir la amenaza, educar y concienciar al público.

Como parte de la planificación estratégica se definió la misión, la visión y los objetivos: *Misión*: Reducir la vulnerabilidad del sistema hídrico del área noroccidental del Gran Área Metropolitana a los impactos del cambio climático por medio del mejoramiento de su capacidad adaptativa, para así poder apoyar la gestión integrada del recurso hídrico, orientada a garantizar la disponibilidad y calidad de éste. *Visión*: El área noroccidental del Gran Área Metropolitana contará con un sistema hídrico resiliente al cambio climático y con una eficiente y efectiva gestión integrada del recurso hídrico. *Objetivos estratégicos*: Eje ambiental: “fomentar acciones participativas a nivel ambiental para la gestión integrada del recurso hídrico en el área del proyecto con el fin de aumentar la capacidad adaptativa ante el cambio climático”. Eje económico: “promover una sostenibilidad económica del recurso hídrico que permita la adaptación del sector productivo a los efectos del cambio climático”. Eje social: “fortalecer la capacidad de la sociedad y de las instituciones para operacionalizar un sistema de gestión de riesgo que favorezca la adaptación al cambio climático”.

El plan de acción estratégico contempla 24 medidas de adaptación debidamente priorizadas y agrupadas en tres ejes principales (ambiental, social y económico) con sus respectivos objetivos estratégicos, los beneficios esperados, las acciones estratégicas, las sinergias, los actores responsables y los actores involucrados, así como los indicadores de logro. Para acometer la mayoría de las iniciativas propuestas en la estrategia, después del análisis del tema de capacidades del país, se cuenta con la existencia de suficientes activos “tangibles” e “intangibles”, entre ellos: capacidad técnica e intelectual, recursos operativos, tecnología y recurso humano calificado para llevarlas a cabo. Sin embargo, se reconoce limitaciones en algunas áreas. El principal obstáculo es la falta de capacidad de dicho sistema (al igual que en el resto del sistema institucional del país) para promover cambios en el plano organizacional con el fin de atender los desafíos diagnosticados, lo que está claramente señalado en la estrategia al haberse identificado el tema de “sinergias” como una dimensión muy relevante de ella. La estrategia plantea la necesidad de establecer complementariedades entre las entidades institucionales para facilitar una gestión ejecutora, pero para alcanzar dichas sinergias se requiere una mayor definición de responsabilidades y gobernabilidad: sólo así la estrategia permitirá reducir el riesgo por medio de la adaptación ante la amenaza del cambio climático. El éxito de esta estrategia dependerá de los esfuerzos conjuntos de los sectores involucrados y de la respuesta que la sociedad civil en general dé a estas iniciativas.

Las medidas de adaptación priorizadas son:

*Eje ambiental*: (1) Ampliación del Parque Nacional Braulio Carrillo en la zona de estudio. (2) Implementación y mejoramiento del sistema de alcantarillado sanitario en la zona de estudio. (3) Tratamiento de aguas residuales de actividades agropecuarias. (4) Reparación y mejoramiento continuos de la red vial. (5) Mejoramiento de la infraestructura del servicio de agua potable. (6) Programa de información pública y sensibilización respecto de la problemática y las medidas de adaptación al cambio climático. (7) Implementación y modernización de la infraes-

estructura de alcantarillado pluvial. (8) Fortalecimiento y coordinación de la investigación sobre adaptación y prevención al cambio climático. (9) Inducción de una cultura de aprovechamiento de otras fuentes de agua para uso no potable. (10) Mejoramiento del manejo de la fertilización nitrogenada. (11) Fortalecimiento de las investigaciones de pronóstico y evolución de eventos hidrometeorológicos extremos. (12) Seguimiento y monitoreo de los indicadores de vulnerabilidad al cambio climático en el área de estudio. (13) Plan de manejo piloto de la microcuenca del río Bermúdez. (14) Fortalecimiento de las capacidades institucionales para la observación sistemática que contribuya con la adaptación al cambio climático.

*Eje económico:* (1) Fortalecimiento del programa nacional de pago de servicios ambientales para el recurso hídrico en el área. (2) Incentivación del tratamiento de aguas residuales y estimulación de la producción limpia. (3) Implementación del canon ambiental por vertidos. (4) Implementación del canon de aprovechamiento de agua. (5) Promoción de la producción y la comercialización de la agricultura orgánica. (6) Incentivación de tecnologías que permitan el uso eficaz y eficiente del recurso hídrico y energético como adaptación al cambio climático.

*Eje social:* (1) Acceso oportuno a los servicios de salud para la población afectada por los efectos de eventos hidrometeorológicos extremos. (2) Mejoramiento de los programas de atención y prevención de emergencias causadas por eventos hidrometeorológicos extremos a nivel familiar, escolar y comunal. (3) Fortalecimiento del monitoreo y registro estadístico del asma como apoyo a la investigación bioclimática. (4) Incorporación del impacto de la política migrante en la planificación del recurso hídrico y energético.



Nubes

Gregory Basco





# Proyecto Amigable con el Cambio Climático: acciones para compensar emisiones de CO<sub>2</sub>

CENTRO CIENTÍFICO TROPICAL

A través de la alianza concretada entre el Centro Científico Tropical ([www.cct.or.cr](http://www.cct.or.cr)), la empresa Control Union Certifications ([www.controlunion.com/certification](http://www.controlunion.com/certification)) y, por parte de la Universidad Nacional (Una), el Laboratorio de Química de la Atmósfera y el Instituto de Investigación y Servicios Forestales (Inisefor), se ejecuta el proyecto denominado Amigable con el Cambio Climático, con el fin de ofrecer una opción práctica a todos quienes quieran compensar las emisiones de gases de efecto invernadero de su vehículo, servicio o proceso industrial, con acciones concretas para mitigar el calentamiento global.

El programa consiste en la compensación de emisiones de CO<sub>2</sub> eq. a través de la reforestación con especies nativas. La estimación de la cantidad de árboles a sembrar se efectúa con base en promedios de emisiones vehiculares o, en su defecto, a través de auditoría de emisiones de los diversos procesos productivos industriales.

En coordinación con *oenegés* locales, asociaciones comunales y programas nacionales e instituciones, el programa Amigable con el Cambio Climático se orienta a las áreas prioritarias identificadas en cuencas hidrográficas y corredores biológicos, siendo el objetivo último del programa reforestar regionalmente a través de una red de *oenegés* con proyección ambiental.

Actualmente, el planeta enfrenta un excedente aproximado de un 25 por ciento de CO<sub>2</sub> que el sistema biosfera-atmósfera no puede procesar, generando un incremento en la temperatura global actualmente estimado en 0,6 ° C. El economista Nicholas Stern (2007) elocuentemente en fecha reciente ha mostrado que la evidencia científica del calentamiento global es apabullante, que en ello concuerdan varias disciplinas científicas y que, de no actuar, las consecuencias del calentamiento global serían desastrosas a muy corto plazo. Este estudio, que es el primer aporte de importancia económica al debate internacional sobre el calentamiento global, advierte un escenario de graves consecuencias ambientales, sociales, políticas y económicas, por las sequías, inundaciones, deshielo de glaciares y otros desequilibrios globales. Científicos aseguran que se propagarán enfermedades que surgirán con motivo de los desplazamientos climáticos altitudinales y la falta de agua por el derretimiento de los glaciares y picos nevados, entre otras consecuencias. De acuerdo con el informe, de no detenerse el calentamiento global con un aporte estimado de por lo menos un uno por ciento del producto interno bruto mundial al año, habría que esperar macrofenómenos hidro-meteorológicos que afectarían -entre otros lugares- el Caribe, Centroamérica y Japón. La vida animal también se vería severamente impactada y hasta un 40 por ciento de las especies podrían desaparecer.

Las predicciones más preocupantes, con fundamento científico, indican que, de seguir con el modelo económico actual y sus aportes a la emisión de gases de efecto invernadero, lo único que podría quedar habitable en el planeta sería los polos, y lugares como la Patagonia llegarían a tener un clima semejante a Hawai (Harding 2007).

De no actuar de inmediato, tendríamos un aumento de dos grados en las próximas décadas, incremento desde el que se daría una segunda escalada a los cuatro o cinco grados centígrados, con el peligro de derretirse la Antártida, elevando el nivel del mar, inundando zonas bajas y salinizando acuíferos costeros, efecto éste que ya empieza a ser una realidad en regiones como Bangladesh (*Le Monde Diplomatique* 2007).

Según la organización Plankton, a nivel marítimo el dióxido de carbono reacciona con el agua creando el ácido carbónico. La acidificación y el calentamiento del mar es también una amenaza para la vida marina. Se reporta una disminución en el plancton del mar de un 10 por ciento o más, lo cual significa que 5.000 millones de toneladas de carbono no están siendo fijadas debido a la acidificación del océano y a una disminución en la cantidad de hierro acarreado por los vientos desde las áreas terrestres, lo que está limitando el desarrollo del plancton fotosintético.

Ante este escenario es importante concienciarse y adaptarnos a un cambio de comportamiento y a un estilo de vida y de consumo concordante con la sostenibilidad del entorno natural. Los ciudadanos debemos tomar decisiones acerca del modelo económico que queremos: seguir con el consumismo desmedido que demanda más energía y deterioro ambiental o desarrollar hábitos y procesos productivos que permitan una concordancia y equilibrio con la vida. A nivel gubernamental se debe expandir y ligar los diferentes mercados de emisiones, adoptar tecnologías de bajas emisiones, implementar proyectos a escala nacional para lograr reforestar y reducir la deforestación, incluir el cambio climático en planes de desarrollo, y los países ricos deben financiar la adaptación y reducir sus emisiones, incluyendo investigaciones para desarrollar nuevos cultivos adaptados al cambio climático como compensación por su gran aporte a la contaminación atmosférica que causa el calentamiento global.

Necesitamos incrementar la capacidad del planeta para que a través de las plantas pueda procesar el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, capturarlo y fijarlo en la biomasa vegetal, proceso que puede incentivarse a través de la reforestación y la

restauración del plancton fotosintético en el mar. Este esfuerzo tendría un efecto de disminución de la concentración de CO<sub>2</sub>, aunado a los cambios tecnológicos y a nuevos modelos de desarrollo que permitan reducir significativamente las emisiones lo más pronto posible, ya que, como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático lo advierte, deberemos hacerlo en los próximos 10 años si queremos evitar consecuencias mayores.

**E**l programa Amigable con el Cambio Climático se enfoca en la acción inmediata, por lo que se trabaja con promedios generales de emisiones para vehículos sin dejar de contemplar mediciones y auditorías de emisiones detalladas para procesos y servicios específicos, las cuales se pueden solicitar y coordinar con este programa. Las empresas que colaboren con el programa podrán usar el sello Amigable con el Cambio Climático en sus productos (como herramienta de mercadeo y diferenciación de responsabilidad ambiental y social) y/o recibir un certificado del programa. Los vehículos particulares recibirán un distintivo o calcomanía que representa la siembra de 11 árboles para mitigar 5,5 toneladas de CO<sub>2</sub>, promedio anual de emisiones de un vehículo particular. El servicio en Costa Rica tiene un costo de \$60 anuales (\$5 por mes) y solo se requiere llenar el formato de aplicación. Para empresas o individuos en EU el pago del servicio es deducible de impuestos. La información está en [www.friendsoftsc.org](http://www.friendsoftsc.org), donde tendremos todos los datos de seguimiento del proyecto: personas que colaboran, empresas y lugares donde se están sembrando los árboles y otros. Las calcomanías estarán a la venta en el Centro Científico Tropical (CCT) -San Pedro de Montes de Oca, San José; teléfono 253 3267- y en las tiendas del CCT en Monte Verde, Volcán Poás e Irazú. También se pueden adquirir por internet. El sello se envía por correo o se entrega personalmente.

#### Referencias bibliográficas

Stern, N. 2007. *La economía del cambio climático*. Climate Change Communications. En: [www.climatechange.gov.uk](http://www.climatechange.gov.uk).

Harding, S. 2007. *S.t.* Holistic Science Department, Schumacher College. Devon UK.

*Le Monde Diplomatique* (english edition), may 2007. En: <http://mondediplo.com/>.



### **Pequeñas acciones... grandes contribuciones**

Visítenos en [www.friendsoftsc.org](http://www.friendsoftsc.org) o contáctenos en nuestras oficinas:



Centro Científico Tropical  
Enrique Ramirez Guier  
[eramirez@cct.or.cr](mailto:eramirez@cct.or.cr)  
Teléfono (506) 253 3267  
Fax (506) 253 4963

Control Union Costa Rica  
Laura Lang Patiño  
[llang@racsa.co.cr](mailto:llang@racsa.co.cr)  
Teléfono (506) 232 2402  
Fax (506) 291 5101