



LA AMAZONIA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Nicolás Castaño Arboleda¹

Zona aledaña a comunidad indígena. Alto río Negro- Guainia, Nicolas Castaño

RESUMEN

La Amazonia es el sistema boscoso más grande del mundo y contiene aproximadamente 120 Petagramos de Carbono, lo que equivale a aproximadamente 20 décadas de emisiones de Dióxido de Carbono inducidas por el hombre. Almacenar esta inmensa cantidad de Carbono implica que cualquier reacción del bosque frente a los cambios de la atmósfera sea muy influyente en el clima de todo el planeta. Existe una gran cantidad de información científica sobre el cambio climático y las diferentes reacciones del bosque amazónico, como también una creciente línea de modelación que predicen las condiciones futuras de los bosques tropicales. El presente artículo realiza una revisión comentada de la literatura más reciente y relevante sobre las condiciones biofísicas del bosque amazónico frente al cambio climático y presenta las condiciones de la Amazonia colombiana en ese escenario.

PALABRAS CLAVE

Amazonia, cambio climático, bosque, gases de efecto invernadero

ABSTRACT

The amazon basin has the biggest forest in the world. It contains around 120 Pg Carbon. It means about 20

decades of human emissions of CO₂. To storage this huge amount of Carbon involves that any forest reaction in front of atmospheric changes will be very influential on the global climate. There is a large amount of scientific information about the climate change and the different possible reactions of the Amazon forest. There has been an increase in climate modeling that predicts the future conditions of the tropical forests. This paper presents a commented review of the recent literature about the bio-physical conditions of the Amazon forest under climate change and presents the Colombian Amazon conditions in this scenario.

KEY WORDS

Amazon, climate change, forest, greenhouse gases

INTRODUCCIÓN

¿Cuál será el futuro de la selva amazónica con el aumento desmedido de gases efecto invernadero en la atmósfera? Esta es una pregunta cuya respuesta tiene implicaciones para la conservación de cerca de 35 mil de especies de plantas, 550 especies de mamíferos, 2000 de especies de aves, 350 pueblos indígenas y para el clima de todo el planeta (PNUMA-OTCA, 2009). Los bosques amazónicos están sometidos a diferentes tipos de presiones, en la región, la demanda de recur-

¹ Investigador. Instituto Sinchi. ncastaño@sinchi.org.co

sos como leña, alimentos, cacería, minería, madera, entre otros está en aumento (PNUMA-OTCA, 2009). Por otro lado, en los últimos años han aumentado los incendios que devastan grandes extensiones de bosque natural (Betts *et al.*, 2004). Al 2005 la deforestación acumulada en la Amazonia era de 857.666 Km², que equivale a una reducción del 17% de la cobertura natural (PNUMA-OTCA, 2009) y se estima que los planes de expansión de la infraestructura en la región podrían reducir la cobertura en un 47 % del área original para el 2050 (Soares *et al.*, 2006).

El aumento de la demanda agro industrial (soya y biocombustibles), el aumento de incendios, la deforestación para ganadería y la tala selectiva de especies tienen impacto inmediato sobre la cobertura boscosa (Nepstad *et al.*, 2008). Sumado a estos factores, existe otra presión a gran escala que es más sutil pero que puede tener implicaciones mayores: el cambio climático.

Debido a la actividad humana, la acumulación de Gases Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera está

generando una rápida modificación de las condiciones naturales en todo el planeta (Christensen *et al.*, 2007a). Esta acumulación de GEI modifica las condiciones climáticas, que a su vez modifican las condiciones de vida que hoy conocemos. Los cambios en el clima de la región Amazónica no solo han generado una degradación de las dinámicas naturales en la región (Phillips *et al.*, 2009) también están poniendo en riesgo el equilibrio climático del planeta. El enorme volumen de Carbono almacenado en los bosques amazónicos implica que, cualquier reacción del sistema boscoso más grande del planeta frente a los cambios ambientales sea muy influyente en el clima global. El bosque amazónico contiene aproximadamente 120 Petagramos (Petagramo = Pg = 10¹⁵gramos) de Carbono y cerca de 200 Pg Carbono si se tiene en cuenta el Carbono almacenado en sus suelos (Malhi & Phillips, 2004). Esta cantidad de Carbono equivale aproximadamente a 20 décadas de emisiones de Dióxido de Carbono inducidas por el hombre (Canadell *et al.*, 2007). Es así como en la balanza de Carbono, el bosque amazónico es un factor que pue-



Santaclara, Amazonas. Augusto Mazonra

de llegar a equilibrar o desequilibrar las condiciones vitales de la tierra.

Las perspectivas del cambio climático no son nada alentadoras. En el 2007 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) presentó una serie de posibles escenarios que contemplaban cantidades diferentes de emisiones de GEI y sus posibles implicaciones. Dos años más tarde, la Alianza Internacional de Universidades de Investigación (*International Alliance of Research Universities*) realizaron, a inicios del 2009 en Dinamarca, el Congreso Internacional *Cambio Climático: Riesgos globales, retos y decisiones*, el cual produjo un compendio de seis mensajes claves que pretenden actualizar la comprensión de las afectaciones que produce el cambio climático. Uno de los mensajes más importantes a nivel biofísico es que las emisiones de GEI y las variables climáticas (temperatura media superficial, nivel del mar, temperatura de los océanos, extensión de los océanos árticos, acidificación de los océanos y eventos climáticos extremos) están superando los peores escenarios propuestos por el IPCC en el 2007. Esto significa que estamos viviendo impactos más agresivos que los pronosticados hace pocos años. Además, los seis mensajes recalcan, entre otros temas, que aunque no haya una disminución de las emisiones, muchas tendencias se acelerarán, lo que generaría un incremento en el riesgo de cambios climáticos abruptos o irreversibles a los cuales, tanto la humanidad como la naturaleza son altamente vulnerables (Richardson *et al.*, 2009).

En marzo de 2007 se realizó en la Universidad de Oxford el taller internacional titulado “Cambio climático y el destino de la Amazonia”. Este taller tuvo como objetivo principal condensar, desde diferentes perspectivas de la ciencia, el debate del Cambio Climático en la región Amazónica. Producto de este taller, la revista *Philosophical Transactions of The Royal Society B* publicó 25 artículos originales que son un precedente único de información sobre los cambios en la atmósfera y sus implicaciones sobre la región Amazónica. Además de esta información, en los últimos años se han publicado numerosas contribuciones científicas sobre el tema en revistas de alto nivel científico como *Science*, *Nature*, *Journal of Climate*, entre otras. El presente artículo presenta una revisión comentada de la

literatura científica más reciente sobre las alteraciones actuales y predicciones futuras del componente biofísico del bosque amazónico. Cabe resaltar que existe igualmente un inmenso debate ético, social y económico sobre las implicaciones del Cambio Climático en la Amazonia (v.g. Parry *et al.*, 2007; McMichael *et al.*, 2006; Alves 2008; Boyd, 2008; Brondizio & Moran, 2008; Ebeling & Yasué, 2008, Sawyer, 2008) el cual es tan extenso como relevante y requiere de una amplia revisión que no se trata en el presente artículo.

CAUSAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

El llamado efecto invernadero ha permitido las condiciones para que se desarrolle la vida en el planeta. La radiación que recibimos del sol se perdería de no ser por las partículas de ciertos compuestos químicos que ejercen un fenómeno natural de absorber y remitir ciertas ondas que mantienen el calor proveniente del sol. La gran mayoría de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) son productos naturales de reacciones como la respiración de animales y plantas, la descomposición de la materia orgánica, la combustión y procesos químicos naturales en el suelo y la atmósfera, entre otras. El Ozono y sus precursores, el vapor de agua, el Dióxido de Carbono y el Metano son algunos de los GEI que se encuentran en la naturaleza (en ciertas proporciones) independiente de la incidencia del hombre.

Debido a la actividad humana la excesiva concentración en la atmósfera de los GEI (Figura 1) ha generado un calentamiento inusual, que a su vez, desencadena una serie de reacciones climáticas que repercuten en cada fracción del planeta. El consumo de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural, el petróleo y sus derivados (gasolina, gas propano, aceites y grasas de motor, brea, asfalto y múltiples petroquímicos para producir plásticos y disolventes, entre otros), la producción de cemento y la tala y la quema de los bosques generan emisiones inmensas de Dióxido de Carbono (CO₂). La elaboración de fertilizantes químicos, la fabricación de nylon y la extracción de combustibles fósiles, entre otros, producen cantidades inmensas de Óxido Nitroso (N₂O). A su vez, el proceso de extracción y combustión de los combustibles fósiles, los basureros y

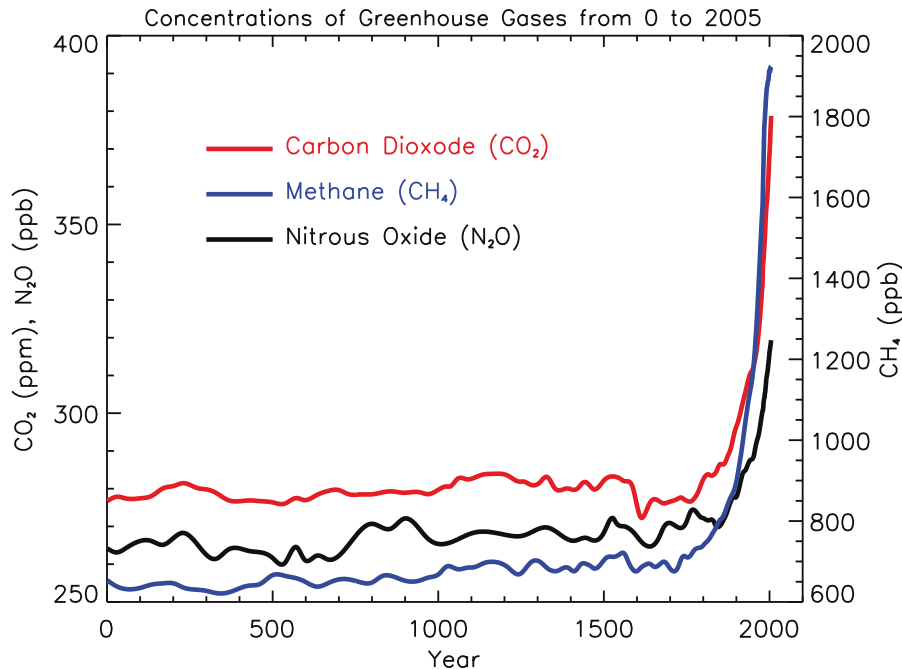


FIGURA 1. INCREMENTO EN GASES EFECTO INVERNADERO. TOMADO DE IPCC 2007. CUARTO REPORTE GRUPO DE TRABAJO I BASE FÍSICA DE LA CIENCIA.

el excremento de los rumiantes, entre otros, producen enormes cantidades de Metano (CH_4). Todos estos gases son químicamente estables, por lo que pueden llegar a persistir en el ambiente durante siglos, de modo que su presencia influencia el clima a muy largo plazo (Solomon *et al.*, 2007).

Los GEI de producción netamente antrópica son principalmente todos los cloro-fluoro-carbonados que fueron muy populares en la industria de los refrigerantes, aerosoles y en la transmisión eléctrica de alto voltaje. Afortunadamente hoy en día gracias al Protocolo de Montreal han sido prohibidos (algunos) en un gran número de países. Sin embargo, debido a que también tienen una vida útil muy larga, su presencia en la atmósfera afectará hasta el clima del próximo milenio. El calentamiento atmosférico que generan los GEI desencadena el derretimiento de las formaciones de hielo en el planeta (zonas polares, nevados) y un calentamiento de los océanos y, el derretimiento de los nevados limita el acceso del agua potable a un gran número de personas que viven en las cadenas montañosas. A su vez, el incremento en las temperaturas oceánicas modifica los patrones de precipitación en todo el planeta, que

se refleja principalmente en eventos de lluvias intensos o sequías prolongadas. Finalmente, el aumento en las concentraciones atmosféricas genera una acidificación de los océanos, con efectos drásticos para la vida acuática (Hoegh-Guldberg, 2007).

LA AMAZONIA ACTUAL Y EL CLIMA

A través de sus hojas los árboles realizan un intercambio gaseoso que de día captura Dióxido de Carbono (CO_2) y libera vapor de agua y Oxígeno (O_2) y en la noche captura O_2 y libera CO_2 . El balance total de este intercambio es la captura de CO_2 y la liberación de O_2 y vapor de agua, lo cual implica que los bosques acumulan Carbono en sus tejidos. Producto de los cambios atmosféricos recientes, se ha encontrado que en los bosques amazónicos las dinámicas son más veloces, lo cual se ve reflejado en una mayor mortalidad y un crecimiento más acelerado (Phillips *et al.*, 2008). En el balance final, el crecimiento excede la mortalidad, lo que hace de los bosques amazónicos un sumidero de Carbono (Lewis *et al.* 2004, Phillips *et al.* 2008). Se ha estimado que los bosques amazónicos están almacenando cerca de 0.49 ± 0.18 Petagramos de Carbono al año (Phillips *et al.*, 2008). Sin embar-

go, el cambio del uso del suelo en la Amazonia está modificando estas cifras. Al eliminar los árboles que acumulan CO₂ no sólo se interrumpe el proceso de fijación de Carbono, sino que el Carbono acumulado se libera nuevamente a la atmósfera en los procesos de descomposición o quema de la madera que estaba en pie. Por otra parte, se ha demostrado que la deforestación genera reacciones en cadena, como el aumento de la incidencia de incendios (Aragão *et al.*, 2008). Se espera que los grandes cambios en la cobertura natural de la Amazonia generen una modificación en el clima local (Betts *et al.* 2008); para dar un estimativo, la deforestación y los incendios en la Amazonia brasilera generan algo más del 75% de la producción de GEI del Brasil, que se encuentra entre los primeros productores de GEI en el mundo (Marengo *et al.*, 2008a).

La cualidad de sumidero de Carbono de los bosques amazónicos no sólo se modifica por el cambio de la cobertura natural, también se ha visto modificada por las condiciones climáticas en la región. Durante el 2005 se presentó en la Amazonia una de las sequías más drásticas de los últimos 40 años (Marengo *et al.*, 2008 a,b), éste fenómeno climático generó una enorme mortalidad de árboles y un estancamiento en su crecimiento, en la cual la Amazonia liberó Carbono en vez de fijarlo en sus bosques (Phillips *et al.* 2009). Esta situación implica graves consideraciones sobre el papel de sumidero de Carbono de los bosques amazónicos, ya que las sequías en la región amazónica tienden a aumentar (Li *et al.*, 2006; Marengo *et al.*, 2009) y muchos de los modelos predictivos presentan como muy probable este desolador panorama (Huntingford *et al.*, 2008). Esto implicaría que al contrario de almacenar Carbono, el bosque amazónico podría convertirse en emisor de CO₂. Al simular condiciones de sequía se ha demostrado cómo la producción del bosque (en términos de crecimiento) desciende por la falta de lluvias, como también incide en la mortalidad de los árboles, lo cual genera una reducción de la biomasa por encima del suelo de aproximadamente 63 Megagramos por hectárea (Megagramo = un millón de gramos) en el primer año de sequía (Brando *et al.*, 2008).

Como un efecto colateral, la sequía prolongada genera condiciones óptimas para que los incendios co-

bren más fuerza y los destrozos sean mayores. Durante las épocas secas en la Amazonia se ha ubicado al fuego como uno de los agentes más importantes en la pérdida de la cobertura natural (Marengo *et al.*, 2008a). Los efectos a largo plazo de los incendios han sido poco explorados, no sólo se ha encontrado que la mortalidad de árboles después de los fuegos es muy alta, afectando principalmente las clases menores y mayores en la población de árboles, sino que las especies que crecen después de las quemadas son de una densidad de la madera mucho menor (Barlow & Peres, 2008), lo cual disminuiría la tasa de acumulación de Carbono en los nuevos bosques que crecen después del fuego. Finalmente se ha propuesto que los incendios, el aumento en la mortalidad de árboles y la actividad humana son factores que exacerbarían la disminución de las lluvias a escala local (Nepstad *et al.*, 2008), convirtiéndose en una cadena de eventos que se exacerban unos a otros, siempre en detrimento de la cobertura natural del bosque.

En muchas áreas de América del Sur, la frecuencia de eventos de precipitación extrema ha aumentado consistentemente con el calentamiento durante los últimos 50 años (Christensen *et al.*, 2007a; Solomon *et al.*, 2007; Marengo *et al.*, 2009). Por otro lado, en la región amazónica se ha registrado una tendencia hacia el aumento en la temperatura (Malhi & Wright, 2004). La frecuencia de días fríos, noches frías y heladas ha disminuido mientras que los días y noches calurosos y las olas de calor se han vuelto más frecuentes (Vincent *et al.*, 2005; Caesar *et al.*, 2006; Tebaldi *et al.*, 2006). En cuanto a la precipitación, en la región amazónica, los cambios no presentan una tendencia tan claramente distinguible y es un punto muy debatido en la actualidad. Se ha reportado que la precipitación en la región está determinada por la Oscilación Meridional de El Niño (ENSO) en el Pacífico y por las variaciones en la temperatura superficial del Atlántico tropical (Li *et al.*, 2006; Marengo *et al.*, 2008 a,b). Gran parte del régimen de precipitación en la Amazonia se caracteriza por lluvias estacionales dominadas por migraciones de “bandas” de intensa lluvia en dirección norte-sur, alimentadas por vientos húmedos (Marengo, 2004), sin embargo aún no hay un consenso sobre los patrones de precipitación en la región.

Por sus efectos drásticos, los eventos de sequía prolongada han tenido especial atención, los cuales generalmente han ocurrido en años de El Niño (1926, 1983, y 1997-8), y han afectado principalmente la región nororiental de la Amazonia (Li *et al.*, 2006; Good *et al.*, 2008; Marengo, *et al.*, 2008a,b, Marengo *et al.*, 2009). Sin embargo la sequía del 2005, que obligó al gobierno brasileiro a declarar el estado de emergencia, no fue provocada por un evento de El Niño sino por el calentamiento anormal de la superficie del Atlántico nor-tropical (Marengo *et al.*, 2008b). La sequía del 2005 desencadenó daños irreversibles en los bosques, por ejemplo, el número acumulativo de incendios se incrementó en un 33% respecto a la media reportada entre 1999 y 2005 (Marengo *et al.*, 2008a) y las tasas de mortalidad de los árboles se elevaron considerablemente (Phillips *et al.*, 2009).

LA REVOLUCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Entender el destino del bosque amazónico en el siglo XXI, frente al incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, el cambio del uso del suelo, la incidencia de incendios y la tala selectiva, constituye un esfuerzo científico internacional de gran envergadura (Mayle & Power, 2008). La complejidad de factores que afectan el clima en la región amazónica y los efectos sobre los bosques ha requerido del uso de modelos matemáticos que permiten inferir y predecir las variaciones extremas en el futuro a diferentes escalas de tiempo. Los modelos matemáticos han tenido grandes avances gracias a las capacidades computacionales alcanzadas en la actualidad (Marengo *et al.* 2009). La modelación numérica del clima del globo terráqueo y su posible respuesta ante los efectos de la acumulación de GEI permite priorizar regiones geográficas, acciones de mitigación y acciones de adaptación hacia el futuro. Sin embargo, la necesidad de generar detalles más finos en la simulación de la variabilidad climatológica sólo se consiguen bajo el desarrollo de Modelos Regionales sobre el Clima, que tienen en cuenta características locales importantes como la orografía, la vegetación y otras variables internas de la conformación del clima a nivel regional. Hay que tener en cuenta que, sin proyecciones regionales apropiadas sobre el cambio del clima, es muy discutible que las estrategias de adaptación pue-

dan ser implementadas o desarrolladas (Parry *et al.*, 2007), ya que existen condiciones locales y regionales propias que son vitales para poder responder a las necesidades de adaptación y mitigación.

La relación entre el aumento de las temperaturas de la superficie oceánica y los cambios en la precipitación regional no es del todo clara en la región amazónica. La evaluación de los escenarios futuros sobre el clima presentan una amplia divergencia entre los registros de la amplitud del ENSO y la respuesta del clima en la región (Christensen *et al.*, 2007b). En una evaluación de once modelos climáticos para la Amazonia se encontró que cinco de ellos proyectan un incremento en la precipitación anual, tres proyectan una disminución en la precipitación anual y los otros tres proyectan cambios muy poco significativos en la precipitación de la Amazonia (Li *et al.*, 2006).

Marengo y colaboradores (2009) usaron un modelo regional para Suramérica que se basa principalmente en acontecimientos a pequeña escala de tiempo y proyectan que los días con gran precipitación incrementarán en la Amazonia occidental, la región norte de Perú y Ecuador y la región más suroriental de Suramérica; por el contrario proyectan una tendencia a la sequías en el norte de Suramérica y la región más oriental de la Amazonia (nordeste brasileiro).

Por otro lado, uno de los modelos más alarmistas predice el marchitamiento a gran escala del bosque amazónico (Cox *et al.*, 2000, 2008; Betts *et al.*, 2004, 2008; Harris *et al.*, 2008), éste modelo propone que en las próximas décadas el bosque amazónico sufrirá sequías más intensas, que redundarán en una transformación a gran escala del bosque. Algunos autores sugieren que el bosque se transformará en una especie de “sabana” (Oyama & Nobre, 2003; Salazar *et al.*, 2007), sin embargo este término ha sido muy cuestionado y el término de “marchitamiento” refleja mejor el proceso que predice el modelo (Betts *et al.* 2004; Cox *et al.*, 2008). Aunque en la región amazónica se presentan variaciones de precipitación internas, se ha propuesto que la reducción de las lluvias no es producto de dicha variabilidad, sino producto de la influencia antropogénica dada por la acumulación de GEI (Li *et al.*, 2008).

En la reacción del bosque a los cambios climáticos intervienen una serie de variables que modifican las predicciones de los diferentes modelos. En la búsqueda de una valoración más real de las respuestas del bosque a los cambios climáticos y de un modelo más robusto, Huntingford y colaboradores (2008) incorporaron un modelo de demografía ecosistémica desarrollado por Moorcroft y colaboradores (2001), en donde combinaron variables ecológicas a partir de datos de campo provenientes de la región amazónica, las variables tenidas en cuenta fueron: 1) *El área foliar*. 2) *La tasa de mortalidad de los árboles*. 3) *La densidad de la madera*, debido a que no en todas las maderas se acumula la misma cantidad de Carbono, la variación de la densidad de la madera tendrá una variación en la cantidad de Carbono secuestrado. 4) *La vida útil de las hojas*. 5) *El patrón de distribución del carbono al interior de los árboles (raíces, tronco o ramas)*. 6) *La estratificación del bosque*. La gran complejidad del bosque amazónico genera una estructura vertical dada por la variación en la altura de los diferentes árboles. Las hojas más altas y en general el estrato más alto del bosque (dosel) reciben la luz solar directamente y absorben parte de ella, dejando pasar una fracción de la luz (ley de Beer), las múltiples “capas” permiten que llegue sólo una pequeña fracción de luz a los estratos inferiores del bosque (sotobosque). Esta característica incide en acumulación del Carbono, ya que la luz incidente sobre cada hoja es un factor determinante para el proceso de metabolismo del Carbono. 7) *La dinámica natural de la vegetación*. Teniendo en cuenta que el bosque amazónico es muy dinámico, en donde el nacimiento y la muerte de árboles son sucesos comunes que alteran la estructura del bosque amazónico (la caída de un árbol con frecuencia genera una reacción en cadena de varios más que a su vez crean una discontinuidad en el bosque conocido como “claro”). El modelo toma en cuenta la representación de las caídas naturales de árboles, así como factores demográficos como el tamaño y la edad de los árboles. 8) *Los tipos funcionales de plantas*. Entre las plantas tropicales existen variaciones fisiológicas que inciden en la captación del CO₂ de la atmósfera (plantas C3, C4), que repercute en velocidades diferenciales en la acumulación del Carbono. 9) *El crecimiento de los árboles*.

Al incorporar la variación de estos factores éste modelo predice igualmente un marchitamiento a gran

escala y recalca sobre la vulnerabilidad del bosque Amazónico frente al cambio climático (Huntingford *et al.*, 2008).

Es importante recalcar que la gran mayoría de modelos no incorporan la relación entre los cambios climáticos, la deforestación, la transformación por los incendios, ni la influencia creciente de la industria en la región. Al tener en cuenta variables como la tasa de deforestación, la tala selectiva de maderas y las condiciones de emisiones de gases efecto invernadero como se han venido presentando, Nepstad y colaboradores (2008) sugieren que para el 2030 se habrá perdido el 31% del bosque de la Amazonia, lo cual significa que entre 15 y 26 Petagramos de Carbono serían liberados a la atmósfera en menos de tres décadas.

Otra forma de entender y predecir las reacciones del bosque frente a los cambios atmosféricos es estudiar las condiciones pasadas del bosque. Al estudiar las variaciones en el clima del Holoceno (entre 8000 y 4000 años antes del presente) las predicciones tienden a variar. A partir de evaluaciones del polen antiguo Mayle & Power (2008) sugieren que el bosque amazónico ha sobrevivido a condiciones de sequía y perturbaciones hace miles de años y tiene una gran capacidad de responder ante eventos extremos, lo que contradice en cierta medida la hipótesis del marchitamiento a gran escala de la región amazónica. Sin embargo, hay que tener en cuenta que a diferencia de las condiciones del pasado, en el presente el bosque se enfrenta además a una combinación desfavorable de sequías, altas tasas de deforestación, creciente incidencia de incendios y la tala selectiva de especies, entre las más importantes (Cochrane & Laurance, 2008; Sawyer, 2008; Nepstad *et al.*, 2008).

Aunque las sequías del bosque Amazónico no son comunes en todos los modelos de circulación atmosférica propuestos, tal como lo establece el Cuarto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Christensen *et al.*, 2007a), las predicciones más alarmantes deben ser tenidas en cuenta, debido a la inmensa importancia que tendría un eventual marchitamiento a gran escala sobre el clima del planeta (Harris *et al.*, 2008).

Uno de los puntos más relevantes en el desarrollo de la elaboración de los modelos matemáticos es la reducción de los factores de incertidumbre. Debido a la dificultad de incluir variables importantes como la competencia entre especies, las predicciones de las variaciones de temperatura superficial de los océanos, el reemplazo de especies, entre otras, se genera cierto grado de incertidumbre en las predicciones, las cuales dificultan el entendimiento y cuantificación de las variaciones en las precipitaciones sobre el bosque amazónico (Harris *et al.*, 2008).

Finalmente, un elemento crucial para la futura modelación del clima es la calidad y cantidad de datos climáticos en la Amazonia que permitan ajustar y validar las proyecciones y simulaciones regionales. Lamentablemente, en muchos países como Colombia, la cantidad y disponibilidad de los datos climáticos para la región amazónica es muy escasa (Poveda, 2008).

Este hecho genera una reducción de la capacidad de predecir las variaciones climáticas en la región y por ende una dificultad para establecer estrategias de mitigación y adaptación frente a los eventuales cambios.

LA AMAZONIA COLOMBIANA Y SUS RETOS

Frente a las proyecciones del futuro de la región Amazónica en general, la Amazonia colombiana se encuentra en una situación privilegiada. Por un lado, la región nor-occidental de la Amazonia presenta condiciones climatológicas de altas precipitaciones anuales y baja estacionalidad (Figura 2), las cuales generan cierta estabilidad frente a los eventos extremos que se han descrito para la región, a diferencia del suroriente de la región amazónica que presenta fenómenos climáticos más estacionales.

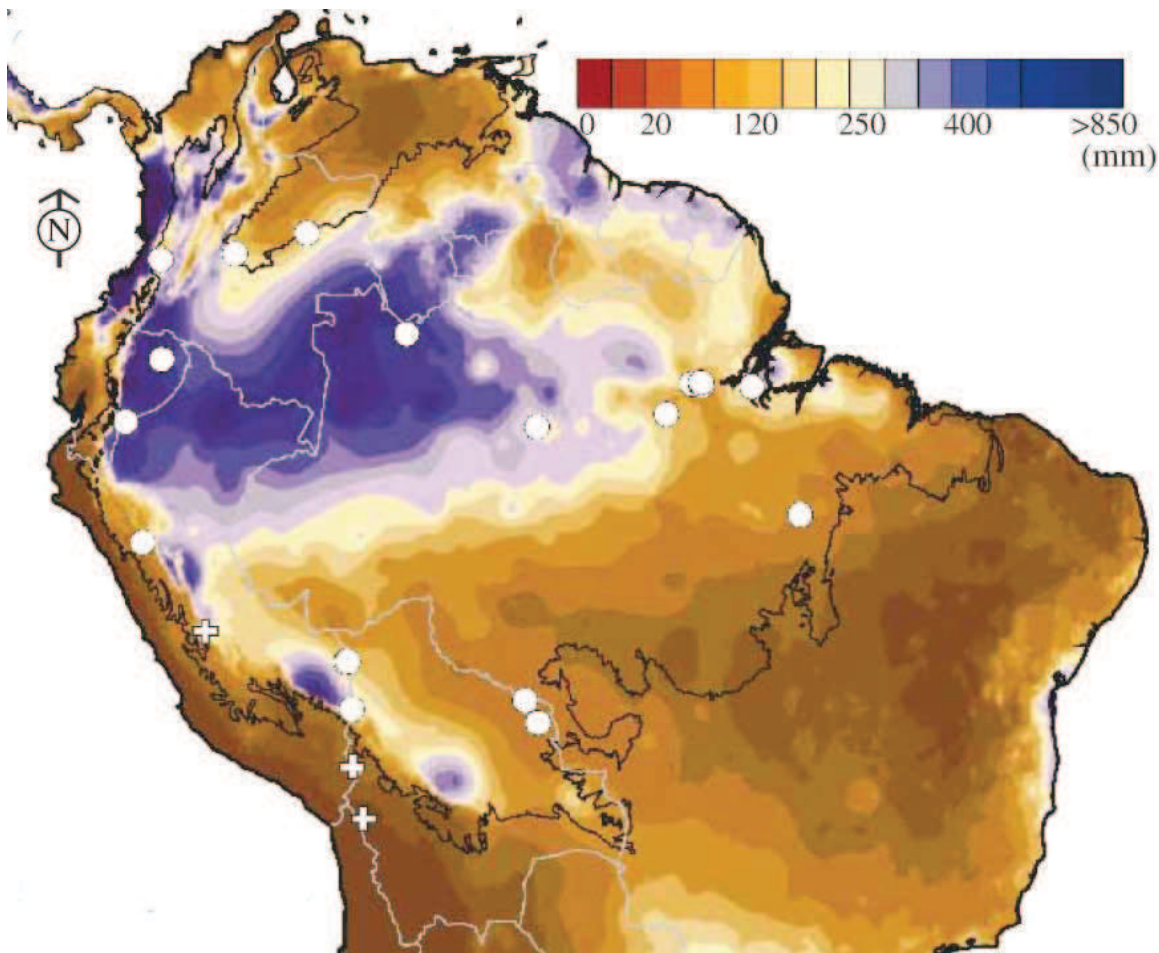


FIGURA 2. PROMEDIO DE LA PRECIPITACIÓN EN LA ÉPOCA MÁS SECA. TOMADO DE MAYLE & POWER 2008

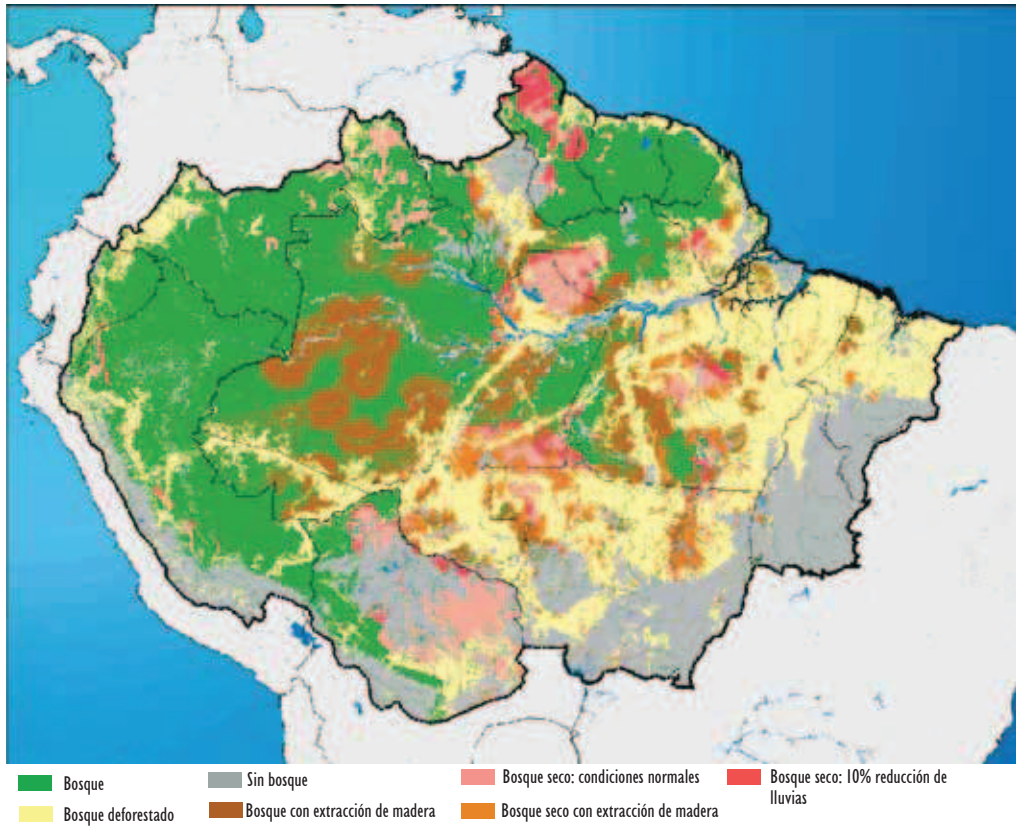


FIGURA 4. PREDICIÓN DE LA COBERTURA DE LA AMAZONIA AL 2030, COMBINANDO AUMENTO DE GEI EN LA ATMÓSFERA Y DEFORESTACIÓN. TOMADO DE NEPSTAD Y COLABORADORES 2008

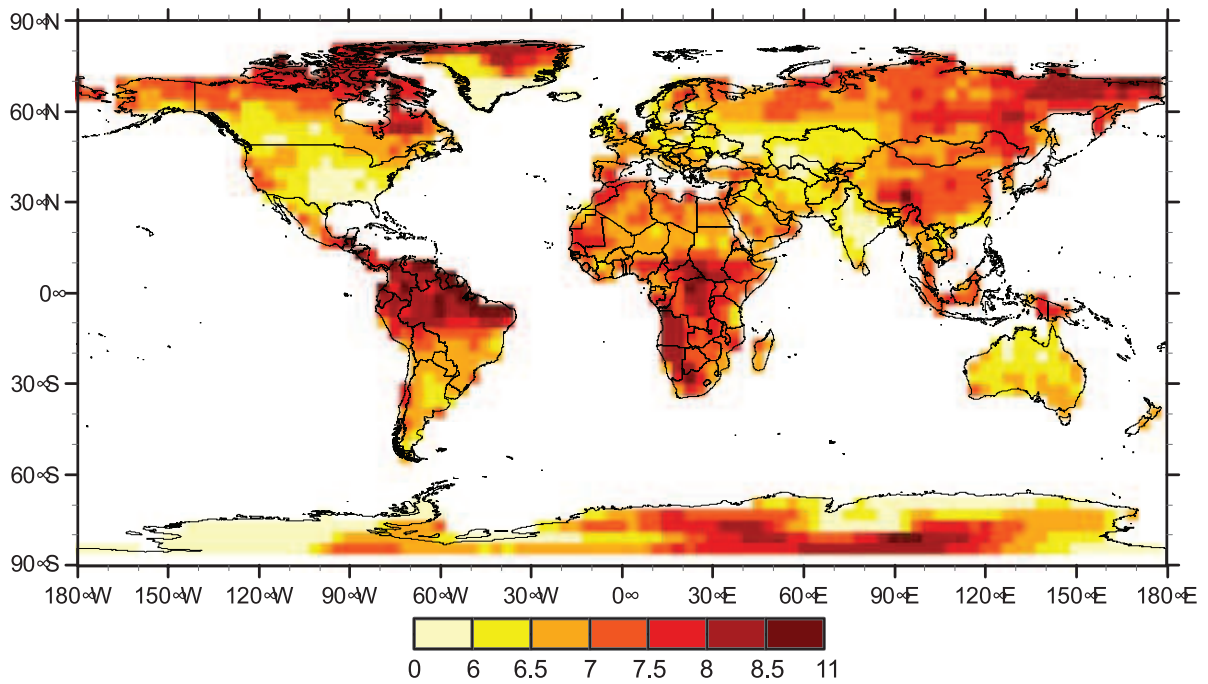


FIGURA 5. ÍNDICE DE CAMBIO CLIMÁTICO. TOMADO DE BAETTIG ET AL. 2007.

cala ayudan a mitigar el cambio climático (Killeen & Solórzano, 2008) se requiere ampliar las áreas protegidas en regiones estratégicas de la Amazonia colombiana.

Como se ha expuesto, la mayoría de los modelos indican que la susceptibilidad de los bosques amazónicos frente al cambio climático es alta. Aunque se estima que la región nor-occidental (Colombia) tendrá mayor estabilidad, el Índice de Cambio Climático desarrollado por Baettig y colaboradores (2007), al ponderar nueve indicadores climáticos (eventos extremos de temperatura y precipitación), presenta a la Amazonia colombiana como una de las regiones en donde el Cambio Climático podría ser más intenso con eventos drásticos en la precipitación y la temperatura. (Figura 5).

Para Colombia, la deforestación evitada (Cano, 2008) es una opción que debe ser considerada seriamente en la región amazónica ya que la deforestación a gran escala está restringida a zonas puntuales y se requiere de otras estrategias globales que aseguren la conservación de las grandes extensiones de bosque natural que conserva el país. Por otro lado se requiere establecer estrategias de desarrollo que tengan una visión a largo plazo, donde se considere al cambio global (Poveda, 2008) como el eje principal para la toma de decisiones políticas, económicas y sociales y que ade-

más, pondere la perspectiva de quienes han habitado el bosque por miles de años, los que aportarán menos al cambio climático y quienes sufrirán con más inmediatez sus desafortunados efectos.

Las predicciones “favorables” para amplias zonas de la Amazonia colombiana, lo son en relación con otras regiones amazónicas en donde se predicen cambios en la precipitación muy drásticos y en donde los procesos de transformación de la cobertura natural son a gran escala. Esto no quiere decir que la región amazónica colombiana no se verá afectada por los cambios en el clima, sino que se predice que serán menores. Finalmente hay que tener en cuenta que la ausencia de proyecciones robustas a nivel regional, genera que las acciones lleguen después de que ocurra algún evento desastroso y por ello, es importante aunar esfuerzos a escala regional para generar estrategias de mitigación del cambio climático en la Amazonia colombiana.

AGRADECIMIENTOS

A Oscar Laverde y Dairon Cárdenas por la lectura crítica del manuscrito, a Sonia Sua por la elaboración de los mapas, a Nelson Salinas por el apoyo en la adquisición de la literatura, a Dairon Cárdenas, Misael Rodríguez, Oscar Laverde y Paola Jiménez por motivar este manuscrito.



Zona deforestada Putumayo, Jaime Navarro

BIBLIOGRAFÍA

- Alves, D.S. 2008. Taking things public: a contribution to address human dimensions of environmental change. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1903-1909.
- Aragão, L.E.O.C., Y. Malhi, N. Barbier, A. Lima, Y. Shimabukuro, L. Anderson & S. Saatchi. 2008. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1779-1785.
- Baettig, M.B., M. Wild & D.M. Imboden. 2007. A climate change index: Where climate change may be most prominent in the 21st century. *Geoph. Res. Let.* 34, L01705, doi:10.1029/2006GL028159.
- Barlow, J. & C.A. Peres. 2008. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1787-1794.
- Betts, R.A., P.M. Cox, & M. Collins. 2004. The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. *Theor. Appl. Climatol.* 78: 157-175.
- Betts, R., M. Sanderson & S. Woodward. 2008. Effects of large-scale Amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1873-1880.
- Boyd, E. 2008. Navigating Amazonia under uncertainty: past, present and future environmental governance. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1911-1916.
- Brando P.M., D.C. Nepstad, E.A. Davidson, S.E. Trumbore, D. Ray & P. Camargo. 2008. Drought effects on litter fall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1839-1848.
- Brondizio E.S. & E.F. Moran. 2008. Human dimensions of climate change: the vulnerability of small farmers in the Amazon. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1803-1809.
- Caesar, J., L. Alexander, R. Vose. 2006. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: creation and analysis of a new gridded data set. *Journal of Geophysical Research* 111: D05101, DOI: 10.1029/2005JD006280.
- Canadell, J.G., C. Le Quéré, M.R. Raupach, C.B. Field, E.T. Buitenhuis, P. Ciais, T.J. Conway, N.P. Gillett, R.A. Houghton & G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104: 18866-18870.
- Cano, C.G. 2008. La economía del cambio climático y la opción Amazónica. *Revista Colombia Amazónica* 1: 33-54.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton. 2007a. Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Christensen, J.H., T.R. Carter, M. Rummukainen, G. Amanatidis. 2007b. Evaluating the Performance and Utility of Regional Climate Models: the PRUDENCE Project. *Climatic Change* 81: 1-6.
- Cochrane M.A. & W.F. Laurance. 2008. Synergisms among Fire, Land Use, and Climate Change in the Amazon. *Ambio* 37(7-8): 522-527.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall & I. J. Totterdell. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408: 184-187.
- Cox, P.M., P.P. Harris, C. Huntingford, R.A. Betts, M. Collins, C.D. Jones, T.E. Jupp, J.A. Marengo & C.A. Nobre. 2008. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. *Nature* 453: 212-216.
- Good, P., J.A. Lowe, M. Collins & W. Moufouma-Okia. 2008. An objective tropical Atlantic sea surface temperature gradient index for studies of south Amazon dry-season climate variability and change. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1761-1766.
- Ebeling, J. & M. Yasué. 2008. Generating carbon finance through avoided deforestation and its potential to create climatic, conservation and human development benefits. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1917-1924.
- Harris, P.P., C. Huntingford & P.M. Cox. 2008. Amazon Basin climate under global warming: the role of the sea surface temperature. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1753-1759.
- Huntingford, C., R.A. Fisher, L. Mercado, B.B.B. Booth, S. Sitch, P.P. Harris, P.M. Cox, C.D. Jones, R.A. Betts, Y. Malhi, G.R. Harris, M. Collins & P. Moorcroft. 2008. Towards quantifying uncertainty in predictions of Amazon 'dieback'. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1857-1864.
- Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi, M. E. Hatzioles. 2007. Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science*. Vol. 318 (5857): 1737 - 1742.
- Killeen T.J., & L.A. Solórzano. 2008. Conservation strategies to mitigate impacts from climate change in Amazonia. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1881-1888.

- Lewis, S. L., O.L. Phillips, T.R. Baker, J. Lloyd, Y. Malhi, S. Almeida, N. Higuchi, W.F. Laurance, D.A. Neill, J.N.M. Silva, J. Terborgh, A. Torres, R. Vásquez, S. Brown, J. Chave, C. Kuebler, P. Núñez & B. Vinceti. 2004. Concerted changes in tropical forest structure and dynamics: evidence from 50 South American long-term plots. *Phil. Trans. R. Soc. B* 359: 421–436.
- Li, W., R. Fu, R.E. Dickinson. 2006. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. *Journal of Geophysical Research* 111: D02111, DOI:10.1029/2005JD006355.
- Li, W., R. Fu, R.I. Negrón-Juárez & K. Fernandes. 2008. Observed change of the standardized precipitation index, its potential cause and implications to future climate change in the Amazon region. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1767–1772.
- Malhi, Y. & Phillips, O. L. 2004 Tropical forests and global atmospheric change: a synthesis. *Phil. Trans. R. Soc. B* 359:549–555.
- Malhi, Y. & J. Wright, 2004. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 359: 311–329.
- Marengo, J. A. 2004. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoret. Appl. Climatol.* 78: 79–96.
- Marengo J.A., C.A.Nobre, J. Tomasella, M.F. Cardoso & M.D. Oyama. 2008a. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1773–1778.
- Marengo, J.A., C.A. Nobre, J. Tomasella, M.D. Oyama, G.S. de Oliveira, R. de Oliveira, H. Camargo, L.M. Alves & I.F. Brown. 2008b. The drought of Amazonia in 2005. *J. Clim.* 21: 495–516.
- Marengo J. A., R. Jones, L. Alves, M. Valverde. 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology* (In press).
- Mayle, F.E. & M.J. Power. 2008. Impact of a drier Early-Mid-Holocene climate upon Amazonian forest. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1829–1838.
- Moorcroft, P. R., Hurtt, G. C. & Pacala, S. W. 2001. A method for scaling vegetation dynamics: the ecosystem demography model (ED). *Ecol. Monogr.* 71, 557–586.
- McMichael, A.J., R. Woodruff & S. Hales. 2006. Climate change and human health: present and future risks. *The Lancet* 367: 859–869.
- Nepstad, D.C., C.M. Stickler, B. Soares & F. Merry. 2008. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1737–1746.
- Oyama, M. D. & C. A. Nobre. 2003. A new climate vegetation equilibrium state for Tropical South America, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (2199), doi:10.1029/2003GL018600.
- Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, (eds.). 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Phillips, O.L., S.L. Lewis, T.R. Baker, K.J. Chao & N. Higuchi. 2008. The changing Amazon forest. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1819–1827.
- Phillips, O.L., L.E. Aragão, S.L. Lewis, J.B. Fisher, J. Lloyd, G. López-González, Y. Malhi, A. Monteagudo, J. Peacock, C.A. Quesada, G. Van der Heijden, S. Almeida, I. Amaral, L. Arroyo, G. Aymard, T.R. Baker, O. Bánki, L. Blanc, D. Bonal, P. Brando, J. Chave, A.C. Alves de Oliveira, N.D. Cardozo, C.I. Czimczik, T. R. Feldpausch, M.A. Freitas, E. Gloor, N. Higuchi, E. Jiménez, G. Lloyd, P. Meir, C. Mendoza, A. Morel, D.A. Neill, D. Nepstad, S. Patiño, M.C. Peñuela, A. Prieto, F. Ramírez, M. Schwarz, J. Silva, M. Silveira, A.S. Thomas, H. ter Steege, J. Stropp, R. Vásquez, P. Zelazowski, E. Alvarez, S. Andelman, A. Andrade, K.J. Chao, T. Erwin, A. Di Fiore, E. Honorio, H. Keeling, T.J. Killeen, W.F. Laurance, A. Peña, N.C. A. Pitman, P. Núñez, H. Ramírez-Angulo, A. Rudas, R. Salamão, N. Silva, J. Terborgh, A. Torres-Lezama. 2009. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science* 323: 1344–1347.
- PNUMA-OTCA. 2009. *Perspectivas del medio ambiente en la Amazonia – GeoAmazonía. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA) y el Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico (CIUP)*. Lima.
- Poveda, G. 2008. Impactos del cambio global y la necesidad de una Eco-Economía, *Economía Colombiana* 323: 9–17.
- Richardson, K., W. Steffen, H.J. Schellnhuber, J. Alcamo, T. Barker, D.M. Kammen, R. Leemans, D. Liverman, M. Munasinghe, B. Osman-Elasha, N. Stern, O. Wæver. 2009. *Synthesis Report. Climate Change: Global Risks, Challenges & Decisions. International Alliance of Research Universities*. Copenhagen.
- Salazar, L. F., C. A. Nobre & M. D. Oyama. 2007. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09708, doi:10.1029/2007GL029695.
- Sawyer, D. 2008. Climate change, biofuels and eco-social impacts in the Brazilian Amazon and Cerrado. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 1747–1752.
- Soares, F.B.S., D.C. Nepstad, L.M. Curran, G.C. Cerqueira, R.A. Garcia, C.A. Ramos, E. Voll, A. McDonald, P. Lefebvre & P.

- Schlesinger. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* 440 (23): 520-523.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Resumen Técnico. En: *Cambios Climáticos 2007: Base Física de la Ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos.
- Tebaldi, C, K. Hayhoe, J. Arblaster, G. Meehl. 2006. Going to the extremes: an intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Climatic Change* 79: 185–211.
- Vincent, L.A., T.C. Peterson, V.R. Barros, M.B. Marino, M. Rusticucci, G. Carrasco, E. Ramirez, L.M. Alves, T. Ambrozzi, M.A. Berlato, A.M. Grimm, J.A. Marengo, L. Molion, D.F. Moncunill, E. Rebello, Y.M.T Anunciação, J. Quintana, J.L. Santos, J. Baez, G. Coronel, J. Garcia, I. Trebejo, M. Bidegain, M.R. Haylock, D. Karoly. 2005. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. *Journal of Climate* 18: 5011–5023.