Sumario ejecutivo

La base científica de los cambios climáticos

Contribución del Grupo de Trabajo 1 al Primer Informe de Evaluación Nacional del Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (GT1 RAN1 PBMC)

pbmc
painel brasileiro de mudanças climáticas

pbmc
painel brasileiro de mudanças climáticas

SUMARIO EJECUTIVO

La base científica de los cambios climáticos

Contribución del Grupo de Trabajo 1 al Primer Informe de Evaluación Nacional del Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (GT1 RAN1 PBMC)

Brasília, DF
2013

Carlos Afonso Nobre
Presidente del Consejo Directivo

Suzana Kahn Ribeiro
Presidenta del Comité Científico

Andrea Souza Santos
Secretaria ejecutiva

Giovana Maria Tadaieski Arruda
Asesora técnica del Grupo de Trabajo 1

Erico Leiva
Fabiana Soares
Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo 1

Traço Design
Proyecto gráfico

Papier Brasil/Papier Produções e Editora
Traducción al español

Ficha técnica/Referência deste Sumário:

PBMC, 2013: Resumen ejecutivo: base científica del cambio climático. Contribución del *Grupo de Trabalho 1 (GT1)* al *Primeiro Relatório de Avaliação Nacional (RAN1)* del Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24 pp.

ISBN: 978-85-285-0207-7

Autores coordinadores:

Tércio Ambrizzi y Moacyr Cunha de Araujo Filho.

Autores principales:

Abdelfettah Sifeddine; Alexandre Araújo Costa; Alexandre de Siqueira Pinto; Alexandre Lima Correia; Alice Marlene Grimm; Antonio Ocimar Manzi; Chou Sin Chan; Cleber Ibraim Salimon; Cristiano Mazur Chiessi; Dieter Carl Ernst Heino Muehe; Dora Maria Villela; Edmo José Dias Campos; Everaldo Barreiros de Souza; Fábio Roland; Francisco William da Cruz Júnior; Gabriela Bielefeld Nardoto; Gilvan Sampaio de Oliveira; Humberto Ribeiro da Rocha; Ivan Bergier; Jean Pierre Henry Balbaud Ometto; Luiz Antonio Martinelli; Marcelo Corrêa Bernardes; Marcia Akemi Yamasoe; Mercedes Maria da Cunha Bustamante; Newton La Scala Júnior; Patricia Pinheiro Beck Eichler; Paulo Nobre; Rômulo Simões Cezar Menezes; Theotonio Mendes Pauliquevis Júnior y Valério De Patta Pillar.

Autores Colaboradores:

Abdelfettah Sifeddine; Adriano Marlisom Leão de Sousa; Alan Rodrigo Panosso; Alberto Ricardo Piola; Aldrin Martin Perez Marin; Alex Enrich Prast; Aline de Holanda Nunes Maia; Aline Sarmento Procópio; Álvaro Ramon Coelho Ovalle; Ana Luiza Spadano Albuquerque; André Megali Amado; André Rosch Rodrigues; Astolfo G. M. Araujo; Bastiaan Adriaan Knoppers; Beatriz Beck Eichler; Carlos Alberto Nobre Quesada; Carlos Eduardo de Rezende; Carlos Gustavo Tornquist; Celso Von Randow; Cimélio Bayer; Corina Sidagis Galli; Donato Abe; Edmilson Freitas; Edmo José Dias Campos; Edson José Paulino da Rocha; Eduardo Arcoverde de Mattos; Eduardo Barretto de Figueiredo; Eduardo G. Neves; Eduardo Siegle; Elisabete de Santis Braga; Elizabethe de Campos Ravagnani; Eloi Melo Filho; Enio Pereira de Souza; Enrique Ortega Rodriguez; Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio; Expedito Ronald Gomes Rebello; Felipe Mendonça Pimenta; Flávio Barbosa Justino; Francinete Francis Lacerda; Francisco de Assis Diniz; Frederico Scherr Caldeira Takahashi; Gabriel Constantino Blain; Gilvan Sampaio de Oliveira; Gilvan Sampaio de Oliveira; Guilherme Ruas Medeiros; Guillermo Oswaldo Obregón Párraga; Henrique de Melo Jorge Barbosa; Ilana Elazari Klein Coaracy Wainer; Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti; Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti; Janice Romaguera Trotte-Duhá; João dos Santos Vila da Silva; Jorge Alberto Martins; José Fernando Pesquero; Jose Galizia Tundisi; José Maria Brabo Alves; Juan Ceballos; Julio Carlos França Resende; Leila Maria Véspoli de Carvalho; Lincoln Muniz Alves; Luciana della Coletta; Luciano Ponzi Pezzi; Ludgero Cardoso Galli Vieira; Luiz Antonio Cândido; Luiz Augusto Toledo Machado; Luiz Carlos R. Pessenda; Manoel Alonso Gan; Manoel Ferreira Cardoso; Manoel Ferreira Cardoso; Marcia Akemi Yamasoe; Marcos Djun Barbosa Watanabe; Marcos H. Costa; Marcus Jorge Bottino; Maria de Fátima Andrade; Mariane M. Coutinho; Michel Michaelovitch de Mahiques; Moacyr Araújo; Olga Tiemi Sato; Orivaldo Brunini; Osmar Pinto Júnior; Paulo Nobre; Paulo Polito; Prakki Satyamurty; Regina Rodrigues; Reindert Haarsma; Renato C. Cordeiro; Ricardo de Camargo; Ricardo de Camargo; Rita Yuri Ynoue; Roberto Antonio Ferreira de Almeida; Ronald Buss de Souza; Ruy Kenji Papa de Kikuchi; Simone Aparecida Vieira; Simone Sievert Costa; Solange Filoso; Sonia Maria Flores Gianesella; Vanderlise Giongo; Vera Lúcia de Moraes Huszar; Vinicius Fortes Farjalla; Wagner Soares; Weber Landim de Souza y Yara Schaeffer-Novelli.

Revisores:

Alan Cavalcanti da Cunha; Ana Luiza Spadano Albuquerque; Felipe Mendonça Pimenta; Fernando Ramos Martins; Flavio Jesus Luizão; Gilberto Fernando Fisch; Heitor Evangelista da Silva; Henrique de Melo Jorge Barbosa; Ilana Elazari Klein Coaracy Wainer; Juan Carlos Ceballos; Marcelo de Paula Corrêa; Maria Assunção Faus da Silva Dias; Maria Cristina Forti; Maria Valverde; Pedro Leite da Silva Dias; Regina Luizão; Paulo Artaxo y Jose Marengo Orsini.

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - Secretaria Executiva
Cidade Universitária, Prédio GIGTECH Parque Tecnológico Rua Paulo Emídio Barbosa, 485 1° andar Quadra 8 lote C Ilha do Fundão CEP: 21941-615 Rio de Janeiro, RJ, Rio de Janeiro – RJ - Brasil
CEP: 21941-907. Tel.: (55 21) 3733-4161
www.pbmc.coppe.ufrj.br

INTRODUCCIÓN

Este documento presenta los principales aportes del Tomo 1 del Primer Informe de Evaluación Nacional (RAN1, por sus siglas en portugués) sobre el cambio climático, elaborado en Brasil y estructurado de acuerdo con el objetivo previamente definido por los autores principales de los capítulos del *Grupo de Trabalho 1 (GT1)*, el primer grupo de trabajo del *Painel Brasileiro de Mudanças Cimáticas* (PBMC, el Panel Brasileño de Cambios Climáticos).

Los estudios que aquí se sintetizan constituyen el resultado de una extensa evaluación de la literatura científica existente, en la cual se apuntó a: (i) evidenciar las implicaciones en Brasil de los principales puntos abordados por el *WG1* (el Grupo de Trabajo 1) en lo referente al Cuarto Informe de Evaluación *(AR4*, por sus siglas en inglés) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático *(IPCC)*; (ii) registrar y debatir los principales trabajos científicos publicados luego de 2007, con relieve para aquéllos relacionados más directamente con los cambios climáticos en Sudamérica y en Brasil.

OBSERVACIONES AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS Y DE LAS PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE

Las series temporales climáticas constituyen un indicador de las interacciones complejas del sistema climático terrestre, que representa a su vez un efecto combinado de oscilaciones en diversas escalas de tiempo propias del sistema climático por acciones antrópicas, es decir, humanas. La distinción entre las variaciones naturales y las alteraciones antrópicas constituye a menudo una tarea difícil, pues generalmente se basa en series temporales de observaciones realizadas durante períodos relativamente cortos. Por tal motivo, se hace necesario tener cautela en la adjudicación de las causas de las variaciones observadas.

Brasil es un país de dimensiones continentales que exhibe una gran diversidad de regímenes climáticos y de influencias sobre su clima, lo que ciertamente dificulta la formalización de series de datos observacionales de más largos períodos (que cubran desde el comienzo del siglo XX). En la figura SEF.1 se muestran los regímenes estacionales promedio de precipitaciones en Sudamérica. El ciclo estacional de las lluvias se ve afectado por las variaciones interanuales, que efectivamente pueden producir alteraciones en dicho ciclo, tales como la ocurrencia de sequías durante la estación lluviosa, por ejemplo, o incluso una estación lluviosa demasiado abundante. Una importante fuente de variabilidad interanual está constituida por los eventos El Niño y La Niña. [GT1 2.2.1]

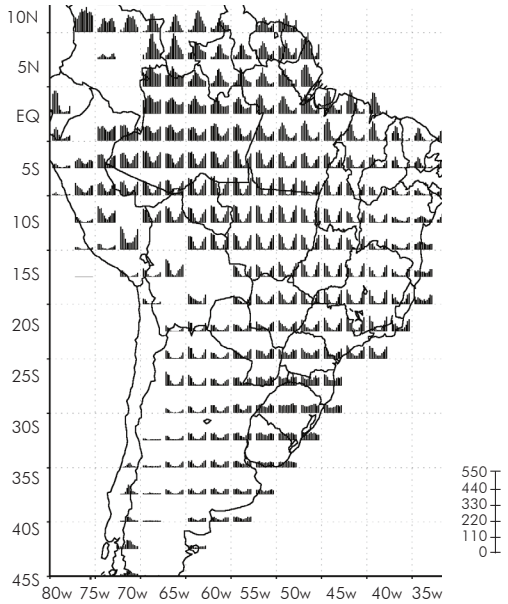


Figura SEF.1. Ciclos anuales de precipitaciones en regiones de 2,5°×2,5° latitud-longitud, calculados con al menos 25 años de datos durante el período 1950-2005. [GT1 2.2.1].

El primer modo de variabilidad interdecenal de la precipitación (es decir, la variación entre períodos de 10 o más años) total anual indica que durante el período 1950-2000 se registró una oscilación de las lluvias en el nordeste de Argentina y el centro-oeste de Brasil, con una oscilación más débil y de signo opuesto en el norte de Brasil. La evolución temporal muestra una variación interdecenal con una creciente tendencia de lluvia en el nordeste de Argentina y el centro-oeste de Brasil, fundamentalmente entre 1970 y 2000, período precedido por una tendencia a la disminución de las lluvias en esas regiones entre 1950 y 1970. Algunos estudios indican que este modo está asociado significativamente a un modo de variabilidad interdecenal de Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) en el Atlántico, denominado Oscilación Multidecenal Atlántica (OMA) [GT1 2.2.3].

Las correlaciones entre el modo de tendencia de la TSM y series promedio de precipitación (1950-2000) en Sudamérica (figura SEF.2a) sugieren un aumento de las precipitaciones en las zonas del centro-oeste y sur de Brasil, sur del bioma Amazônia y otras regiones de la Cuenca Baja del Paraná-Plata, tales como el nordeste de Argentina y Uruguay. [GT1 2.2.4]

Este perfil se confirma cuando se analiza la tendencia de las precipitaciones para el período 1951-2000 (figura SEF.2b), donde se observan tendencias negativas en el norte y el oeste del bioma Amazônia, pero positivas en el sur del mismo y en el centro-oeste y sur de Brasil y ausencia de tendencia en el nordeste del país.

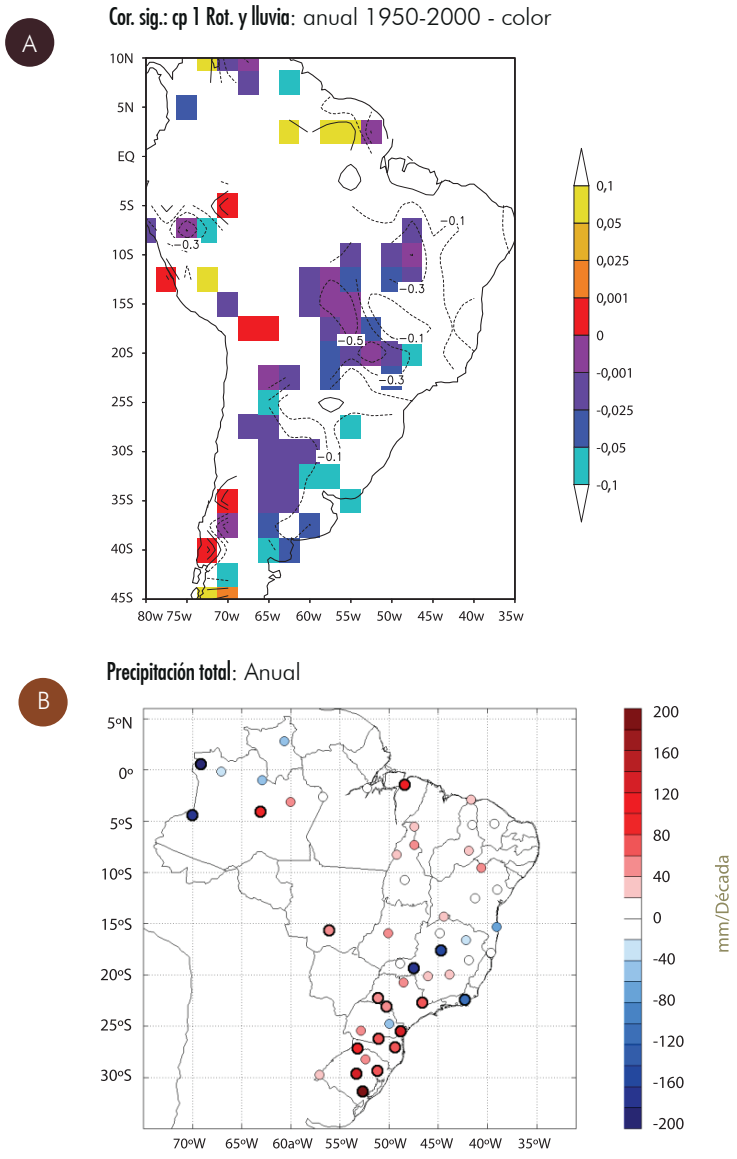


Figura SEF.2. (a) Coeficientes de correlación (isolíneas o curvas de nivel) entre el modo de variabilidad de TSM (modo de tendencia) y la precipitación promedio anual durante el período 1950-2000. Coeficientes negativos (positivos) indican un aumento (disminución) de precipitación durante el período. Los colores representan los niveles de significación (para correlaciones positivas y negativas), (b) Tendencia de la precipitación total anual durante el período 1951-2000 (mm década-*1*). Círculos con contornos gruesos indican significación estadística del Test Mann-Kendall de tendencia temperatura y precipitación en el plano de significación de 0,05.

Los estudios de tendencia de la temperatura del aire que emplean datos de estación sobre Sudamérica se limitan en su mayoría al período 1960-2000. Los resultados más significativos se refieren a las variaciones de índices basados en la temperatura mínima diaria, que indican un aumento de las noches cálidas y una disminución de las noches frías en la mayor parte de América del Sur, con la consiguiente disminución de la amplitud diurna de la temperatura, especialmente durante la primavera y el otoño. Estos resultados son más robustos para las estaciones ubicadas en las costas este y oeste de los continentes y se confirman para series en períodos más largos. [*GT1* 2.3.2]

Datos reanalizados desde 1948 suministran evidencias que apuntan que ha venido aumentando la temperatura en los bajos niveles de la atmósfera de manera más acentuada en dirección hacia los trópicos que en los subtrópicos de América del Sur durante el verano austral, en tanto que la temperatura promedio anual sobre la superficie de los trópicos ha exhibido una tendencia positiva. Como ejemplo de ello, la fig. SEF.3 muestra la tendencia lineal de expansión de área del aumento de temperaturas mayores que 18°C entre 1949 y 2009.

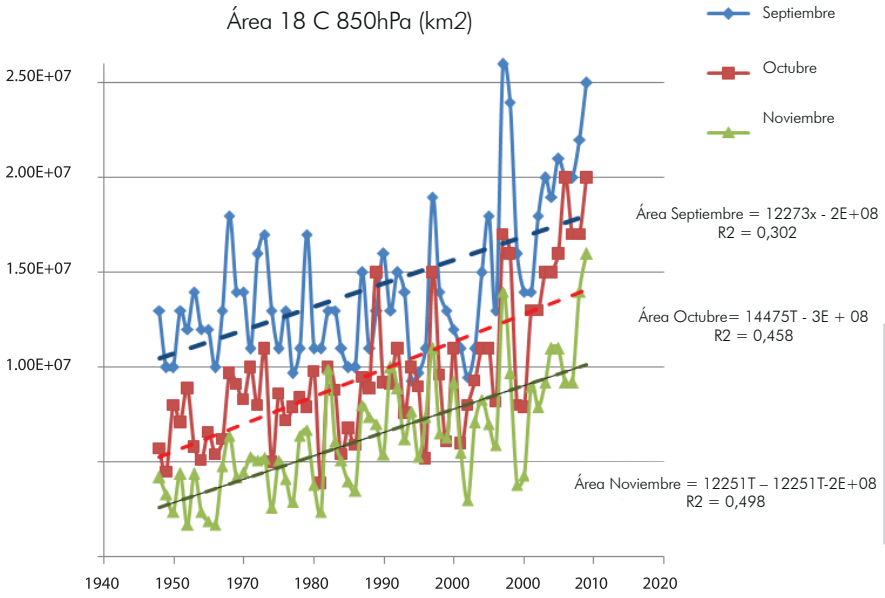


Figura SEF.3. Evolución temporal del área con temperaturas ≥ 18oC en 850 hPa sobre América del Sur (1948-2009). Las tendencias lineares aparecen indicadas en la figura.

Las lagunas científicas en las observaciones atmosféricas y en la superficie

La evaluación de tendencias de temperatura y precipitación en América del Sur en escala decenal y multidecenal se ve limitada en lo que hace a la disponibilidad de datos y debido a su distribución espacial no homogénea. Asimismo, el control de calidad de los datos y los métodos de medición aumentan la incertidumbre de las evaluaciones. Estas limitaciones se tornan aún más críticas en regiones tropicales tales como la de los biomas *Amazônia* y *Pantanal*, llanura aluvial de los estados brasileños de Mato Grosso do Sul y Mato Grosso, donde la escasez de datos sigue siendo un problema en la actualidad.

OBSERVACIONES COSTERAS Y OCEÁNICAS

El océano participa en forma decisiva en el equilibrio climático. Debido a su gran extensión espacial y a la alta capacidad térmica del agua, resulta indiscutible que el incremento del contenido de calor en los océanos y la elevación del nivel del mar constituyen indicadores robustos del calentamiento del planeta. Recientemente, se han puesto en marcha diversos esfuerzos tendientes a revaluar datos históricos e indicadores de alteraciones que han posibilitado formular interpretaciones más confiables para lapsos de tiempo más extensos. [*GT1* 3.1]

Los estudios analizados por el *IPCC-AR4* (2007), entre otros más recientes, también apuntan variaciones en el contenido de calor y en la elevación del nivel del mar en escala global. Variaciones en tales propiedades promueven alteraciones de las características de las distintas masas de agua, lo que redunda a su vez en alteraciones en los patrones de circulación del océano. Por consiguiente, cambios en la circulación desencadenan alteraciones en la distribución tanto del calor como de otras propiedades biológicas, físicas y químicas sobre la superficie de la Tierra.

La gran mayoría de los estudios científicos realizados durante los últimos 5 años han confirmado de manera indiscutible el calentamiento de las aguas oceánicas. La temperatura de la superficie del mar *(TSM)* en el Atlántico ha aumentado durante las últimas décadas. [*GT1* 3.2.1; 3.3.1]

Existen indicaciones de que la salinidad del océano Atlántico tropical y ecuatorial ha venido elevándose durante las últimas décadas [*GT1* 3.4], fundamentalmente en las capas ubicadas por encima de la termoclina, la capa en que el agua cambia bruscamente de temperatura. En el Atlántico Sur existen también indicaciones de un incremento de la salinidad en el giro subtropical -el sistema de corrientes marinas rotativas cuyo centro es una zona de alta presión- lo que refuerza el parecer de que la región subtropical se está tornando más cálida y más salina. [*GT1* 3.2.3] En tanto, en altas latitudes, donde se forman las masas de agua que ocupan el fondo de los océanos globales, se detecta una disminución de entre 0,1 y 0,5 de salinidad al norte de los 45oN, desde la superficie hasta el fondo.

Hay también evidencias de disminución de la salinidad en los primeros 500 metros del océano Atlántico austral, mientras que en latitudes medianas se observa un incremento de la salinidad asociada en el lado norte de la corriente del Atlántico Sur, dentro del giro subtropical, y disminución de la salinidad al sur de la misma. Toda vez que no se observa una tendencia significativa de la descarga fluvial en el Atlántico, dichas alteraciones son aparentemente producto de los cambios en el componente Evaporación-Precipitación (E-P) sobre los océanos y de las alteraciones en el proceso de formación de las aguas de fondo en altas latitudes.

En las capas superiores del océano, existen evidencias claras del aumento del contenido de calor. [*GT1* 3.3.1] Resultados recientes, basados en un amplio conjunto de datos que comprenden el empleo de batitermógrafos descartables (*XBT*, por sus siglas en inglés) para medición de variaciones temperatura, flotadores Argo y otros, durante el período 1993 – 2008, muestran que el contenido de calor en la capa que va de 0 a 700 m del océano global está aumentando a una razón promedio de 0,64± 0,29 W/m-*2* (en vatios por metro cuadrado) en todo el planeta. Este aumento en el almacenamiento de calor en toda la profundidad cubierta por los flotadores Argo es una señal indicativa de que el océano está calentándose por debajo de los 700 metros. Se estima que fenómenos similares estarían ocurriendo en el Atlántico Sur.

En efecto, los análisis de datos obtenidos por boyas derivadoras parecen indicar que el Atlántico Sur exhibe una tendencia positiva en la variación del contenido de calor oceánico durante los últimos seis años. Estudios basados en datos de anomalías de la elevación de la superficie del mar obtenidos vía satélite y datos de las boyas fijas del proyecto Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA, por sus siglas en inglés) en el Atlántico Tropical indican igualmente una tendencia positiva en la región de la retroflexión de la Corrente das Agulhas en el período comprendido entre 1993 y 2002. [GT1 3.3.1]

Existen fuertes indicios de que las características de los eventos de El Niño en el Pacífico han venido alterándose durante las últimas décadas. [GT1 3.6] Como consecuencia de ello, ha habido un cambio en los modos de variabilidad de la TSM en el Atlántico Sur. Estas alteraciones en los patrones de TSM favorecen precipitaciones por debajo del promedio o precipitaciones promedio en el norte y el nordeste brasileño, y más lluvias en el sur y en el sudeste de Brasil.

En el Atlántico Sur, diversos estudios realizados durante los últimos años muestran que, como consecuencia de las alteraciones en los patrones de vientos, el transporte de aguas del océano Índico al Atlántico Sur, un fenómeno conocido como vazamento das Agulhas - el retroceso de Agulhas-, ha venido aumentando en los últimos años. [GT1 3.5.3] Estas alteraciones se observan mediante el análisis de los datos obtenidos por satélite, con mediciones *in situ* y como resultado de la aplicación de modelos.

El nivel del mar está aumentando y las variaciones de entre 20 y 30 cm esperadas para finales del siglo XXI se registrarían en algunos lugares a mediados de siglo, o incluso antes. [GT1 3.7] En la costa de Brasil son pocos los estudios realizados con base en observaciones in situ. De todos modos, la comunidad científica brasileña reporta índices de aumento del nivel del mar desde finales de la década de 1980 y comienzos de la de 1990. Las estimaciones halladas en la literatura para Brasil indican: Recife (1946-1987): 5,4 cm/déc (centímetros por década); Belém (1948-1987): 3,5 cm/déc; Cananeia-São Paulo (1954-1990): 4,0 cm/déc; Santos-São Paulo (1944-1989): 1,1 cm/déc. [*GT1* 3.7]

En algunas áreas de la costa sur y sudeste del país, el aumento de la frecuencia y la intensidad de los ciclones extratropicales pueden derivar en un incremento de la recurrencia de eventos extremos con olas altas, fuertes vientos y precipitaciones intensas. [*GT1* 3.7.3]

A lo largo de la extensión de la línea de costa brasileña, son diversos los tramos en situación de erosión, distribuidos irregularmente y muchas veces asociados con los dinámicos ambientes de las desembocaduras. Las reconfiguraciones de las formas y de los sedimentos de playas en amplios trechos del litoral atlántico del nordeste del país, causadas por el efecto de las olas sobre la arenisca de las playas, como así también debido a los cambios en el transporte costero, producirán también una erosión y acumulación sedimentaria localizadas. [*GT1* 3.10]

Las lagunas científicas de las observaciones oceánicas y costeras

La intensificación del proceso erosivo que se observa en diversos lugares de la costa brasileña durante la última década es producto de alteraciones en los patrones de vientos y de olas que inciden sobre el litoral atlántico, como así también del aumento del nivel promedio del mar. Con todo, no existe en Brasil un sistema de observación de estas variables que permita la obtención de series continuas de datos de calidad para la comprensión y la cuantificación de los fenómenos, y para la consiguiente propuesta de medidas mitigadoras específicas.

La amplitud de la línea de costa de Brasil, que comprende regiones tropicales y subtropicales, abarca una variedad de características fisiográficas en donde se encuentran arrecifes coralinos y manglares, con una diversidad de estructuras poco monitoreadas de acuerdo con escalas temporales. Esta diversidad de características, bajo las cuales se desarrollan los arrecifes y los manglares, requiere monitorización de mediano y largo plazo en puntos representativos a lo largo de la costa.

En el caso de los arrecifes de coralinos, pese a los indicadores privilegiados de los cambios climáticos, las mediciones continuas de las alteraciones en la diversidad y de la mortalidad por estrés térmico todavía son sumamente limitadas en Brasil. Al mismo tiempo, el hecho de que los manglares constituyen ecosistemas extremadamente adaptables a las variaciones ambientales en que se insertan lleva a que se requiera aún más tiempo (décadas) de observación para diferenciar respuestas consideradas normales con relación a aquéllas que estarían manifestándose frente a las nuevas condiciones ambientales.

LA INFORMACIÓN PALEOCLIMÁTICA BRASILEÑA

Los registros paleoclimáticos y paleoceanográficos -es decir, registros del período prehistórico tomados con base de evidencias biológicas, litogenéticas e morfológicas de la corteza terrestre y de los océanos- disponibles en la literatura evidencian fuertes y abruptas oscilaciones en el gradiente de temperatura entre las altas y medianas latitudes del Atlántico Norte y la franja ecuatorial del mismo océano, que ocasionaron variaciones abruptas de pluviosidad tanto en el régimen de lluvias asociado al Sistema de Monzones de América del Sur (SMAS), como en el área directamente afectada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

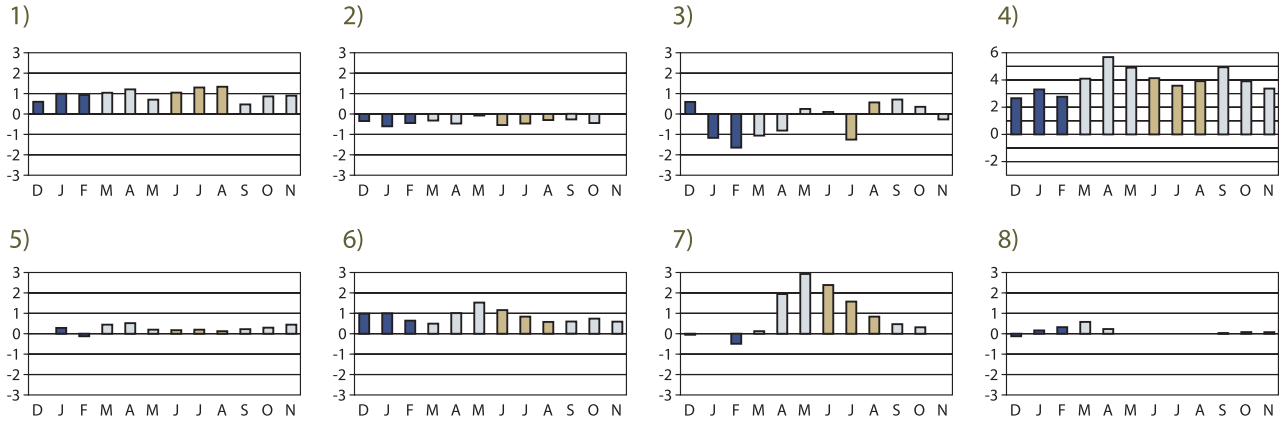
En la escala temporal milenaria se observaron fuertes y abruptas oscilaciones en el gradiente meridional de temperatura del océano Atlántico Tropical, como así también en la pluviosidad asociada al SMAS y a la ZCIT. [*GT1* 4.2] Los análisis realizados permiten afirmar que los cambios en la insolación recibida por la Tierra en escala temporal orbital (esto es, decenas de miles de años) constituyeron la principal causa de modificaciones en las precipitaciones y en los ecosistemas de las regiones tropical y subtropical de Brasil, fundamentalmente en las regiones bajo influencia del SMAS. Valores altos de insolación de verano para el hemisferio Sur aparecieron asociadas a períodos de fortalecimiento del SMAS y viceversa. [GT1 4.2.3]

Las causas de estos cambios climáticos abruptos (son los que se procesan en una gran escala geográfica) suelen perdurar durante varias centenas o unos pocos miles de años, y suceden en un lapso de tiempo de algunas décadas o menos, ocasionando rupturas sustanciales en las sociedades humanas y en los sistemas naturales. [*GT1* 4.3.1] Dichos cambios parecen ponerse en evidencia aparentemente en significativas alteraciones intensidad de la Circulación Meridiana Volteante del Atlántico (AMOC, sigla proveniente del inglés *Atlantic Meridional Overturning Circulation*). Períodos de debilitamiento de esta circulación se asociaron a un aumento de las precipitaciones en las regiones tropicales y subtropicales de Brasil.

La información paleoclimática referente al último milenio en Brasil es extremamente fragmentada y dispersa. La Pequeña Edad del Hielo (aproximadamente entre 1.400 y 1.700 AD) estuvo caracterizada en las franjas tropicales y subtropicales de Sudamérica, al sur de la línea del ecuador, por un aumento de las precipitaciones, que probablemente estuvo asociado a un fortalecimiento del SMAS -posiblemente controlado por la disminución de la temperatura de la superficie del mar (TSM) del Atlántico Norte- y a una merma de intensidad de la AMOC. *[GT1* 4.8.1]

La fig. SEF.4 muestra una selección de reconstituciones de precipitaciones para el Último Máximo Glacial (UMG) y diferencias de precipitaciones entre las simulaciones correspondientes al UMG y a los días actuales. [*GT1* 4.9.3] La mayor parte de los registros paleoclimáticos seleccionados muestran condiciones más áridas (los círculos anaranjados) durante el período.

Sin embargo, algunas regiones exhiben condiciones más húmedas (los círculos azules). Los círculos con ambos colores indican diferencias en las interpretaciones de los datos de reconstituciones paleoclimáticas. Por cada registro también se muestra un histograma, el ciclo estacional de la precipitación simulada. Los valores se normalizaron según su desvío estándar. Las mejores correspondencias entre ambos conjuntos de datos se notan en los puntos 11, 13, 14 y 15, que indican condiciones más secas para el UMG con relación al presente, y en los sitios 3, 4, 7 y 12, que muestran condiciones más húmedas durante el UMG.



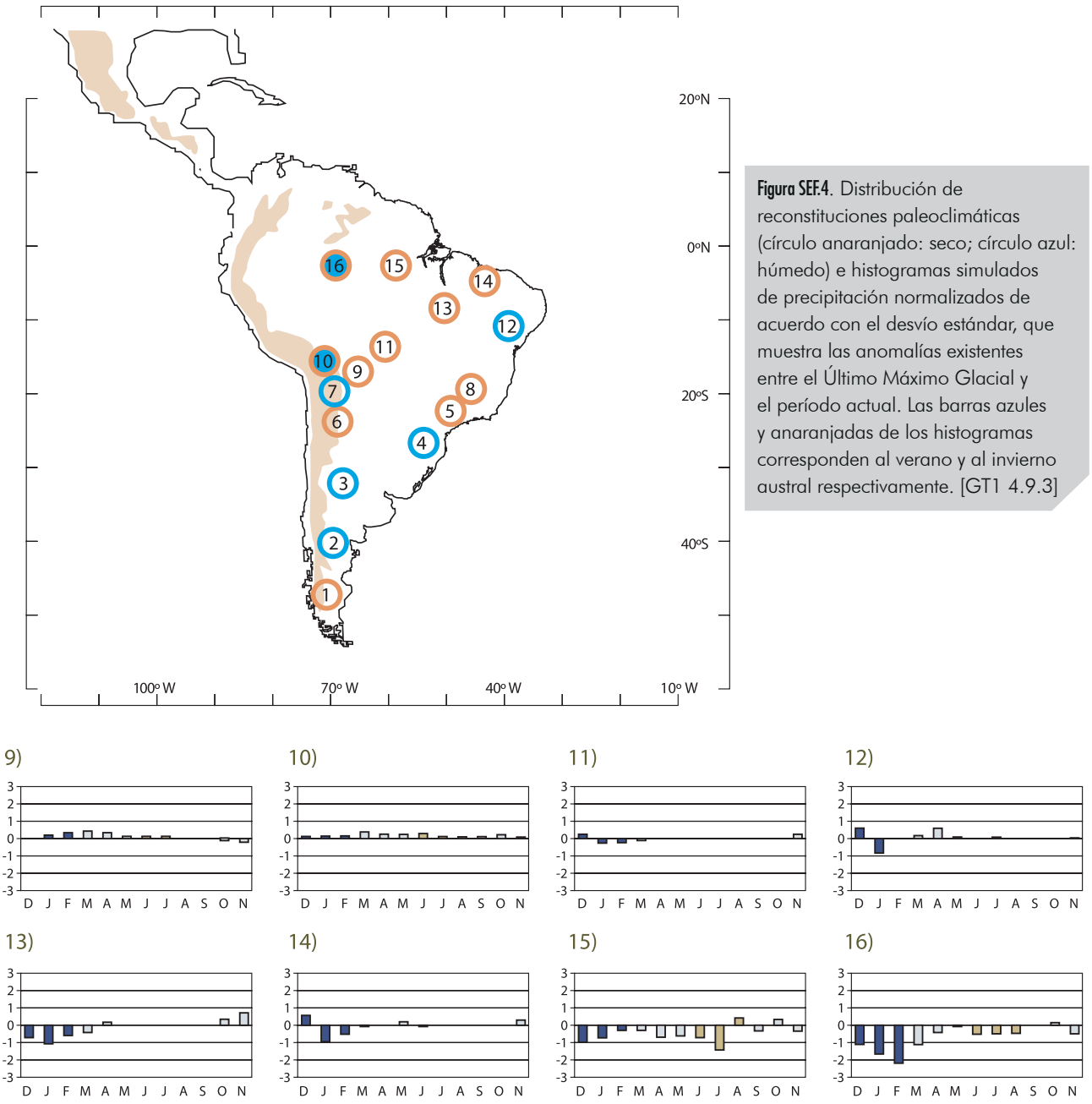


Figura SEF.4. Distribución de reconstituciones paleoclimáticas (círculo anaranjado: seco; círculo azul: húmedo) e histogramas simulados de precipitación normalizados de acuerdo con el desvío estándar, que muestra las anomalías existentes entre el Último Máximo Glacial y el período actual. Las barras azules y anaranjadas de los histogramas corresponden al verano y al invierno austral respectivamente. [GT1 4.9.3]

Las lagunas científicas en la información paleoclimática brasileña

El conocimiento referente a las alteraciones en la paleocirculación de la franja oeste del Atlántico Sur es aún bastante restringido y fragmentado. Extensas regiones de la margen continental este de América del Sur prácticamente no cuentan con ningún estudio con resolución temporal mínima y un modelo de edades confiables. Adicionalmente, la ausencia prácticamente total de estudios que aborden los cambios abruptos producto de la última glaciación y el último período interglacial representa una importante barrera a la hora de emplear los escenarios pretéritos de circulación de la franja oeste del Atlántico Sur en forma análoga para estudios climáticos futuros.

Los estudios de indicadores del nivel relativo del mar en la plataforma continental son también igualmente escasos. Esto deja una laguna que debe llenarse a los efectos de entender cuándo y cómo el nivel relativo del mar inundó la plataforma hasta la llegada del Máximo del Holoceno, como así también los períodos de rápida elevación del nivel relativo del mar, típicos de la última deglaciación.

Cabe subrayar que se registra también la existencia de arrecifes que pueden suministrar información adicional sobre el comportamiento del nivel relativo del mar. No existen estudios que hayan producido curvas detalladas del comportamiento del nivel relativo del mar en la plataforma continental septentrional, por eso urge llevarlos a cabo. A su vez, la utilización de modelos climáticos junto a los datos de campo representa un avance en el abordaje de las variaciones del nivel relativo del mar, que permitirá detectar y cuantificar los factores locales y regionales con mayor eficacia.

Los mecanismos climáticos asociados al último milenio en Brasil no han sido aún consolidados, y la cantidad de registros paleoclimáticos y paleoceanográficos disponibles en ambientes tropicales (y subtropicales) es particularmente escasa. Para llenar las lagunas existentes y mejorar la comprensión referente a las variaciones climáticas naturales multidecenales y seculares se hace necesario buscar, recabar, analizar e interpretar nuevos registros paleoambientales.

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS Y CAMBIOS CLIMÁTICOS

En Brasil se aguardan alteraciones profundas y variables en el clima según cada región. [GT1 5.1] Cabe esperar que dichos cambios tengan efectos sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres del país, cuyo territorio comprende seis biomas terrestres (la *Amazônia y la Mata Atlântica* -el bosque atlántico-, el *Pantanal*, la *Caatinga* -la región semiárida-, el *Cerrado* -la sabana brasileña- y la *Pampa*, la pradera o llanura sureña), por donde pasan algunos de los mayores ríos del mundo, tales como el Amazonas, el Paraná y el São Francisco, con una costa de alrededor de 8.000 km con al menos siete grandes zonas de estuarios, y toda la plataforma continental.

En términos de existencias o concentraciones de carbono y nitrógeno debajo del suelo, observamos que las más extensas, hasta un metro de profundidad del suelo, se hallaron en el bioma *Mata Atlântica*, y luego en la *Amazônia* y en el *Cerrado*. Resulta importante hacer hincapié en que existe una disminución exponencial de las concentraciones de carbono y nitrógeno con relación a la profundidad del suelo.

En cuanto a las concentraciones de carbono y nitrógeno sobre el suelo, en términos de ecosistemas, destacan los biomas *Mata Atlântica* y especialmente la *Amazônia*, con las más altas. Sólo en esta última y en el *Pantanal*, las existencias de carbono y nitrógeno son más elevadas en la biomasa ubicada encima del suelo que en el propio suelo: en los restantes biomas, las mayores concentraciones se encuentran efectivamente en los suelos.

Cobran relieve las observaciones que señalan que el bioma Amazonia está absorbiendo carbono de la atmósfera a razón de entre 0,11 y 0,50 MgC ha-*1* año-*1*. Esta absorción de carbono resulta sumamente significativa y constata un importante servicio ambiental que realiza la selva amazónica, al extraer grandes cantidades de CO2 de la atmósfera. El *Cerrado* también muestra absorción de CO2 atmosférico a razón de entre 0,1 y 0,3 MgC ha-*1* año-*1*.

Se observa también una mejor cuantificación del stock de biomasa sobre el suelo en todos los biomas, en particular en la *Amazônia*, con concentraciones de carbono que oscilan entre 95 y 250 MgC ha-1. Un trabajo significativo también se llevó a cabo en la contabilidad de carbono almacenado en el suelo para todos los biomas brasileiros, con relieve para los altos valores observados en la Mata Atlântica, con valores entre 190 y 280 MgC ha-1. [GT1 5.4]

La transferencia de nitrógeno es significativamente mayor en los sistemas forestados de los biomas *Amazônia* y *Mata Atlântica* con respecto a los sistemas herbáceos-arbustivos, tales como el del Cerrado y el de la *Caatinga*. Más allá de las grandes diferencias de existencias de carbono en el suelo, las variaciones en los flujos de CO2 hacia la atmósfera (cuando el carbono que se ha fijado a través del proceso de fotosíntesis regresa a la atmósfera) no fueron elevadas entre los distintos biomas, fundamentalmente cuando se excluye a la Amazônia, en donde los flujos de CO2 fueron claramente mayores.

El flujo de N2O del suelo hacia la atmósfera también es considerado como una pérdida de nitrógeno del sistema. En tal caso, las diferencias son más acentuadas entre los biomas, y la *Amazônia* exhibe los flujos más importantes, seguida por la *Mata Atlântica*, en tanto que se detectaron flujos significativamente menores en el Cerrado.

En el caso de la fijación biológica de nitrógeno (FBN), las mayores entradas se encuentran asociadas a los sistemas forestales de la *Amazonia* y del bosque atlántico, seguidos por el ecosistema del *Cerrado* o sabana y, por último, por los biomas *Pantanal* y *Caatinga*, con una cantidad de nitrógeno fijado anualmente significativamente menor que en los tres biomas antes mencionados.

Con respecto a la deposición atmosférica de nitrógeno, los valores fueron análogos entre los biomas y, en la mayoría de los casos, por debajo de los valores que entran vía FBN, y ligeramente más elevados con relación a los flujos de N2O hacia la atmósfera.

Las concentraciones de nitrógeno en el suelo y en la biomasa se cuantificaron para la mayor parte de los biomas brasileños, y se observó una baja cantidad de nitrógeno en los suelos amazónicos (del orden de 1 MgN ha-*1*), en tanto que en el de la *Mata Atlântica* los estudios muestran concentraciones de nitrógeno en el suelo de entre 14 y 20 MgN ha-*1*. Todavía no ha sido posible determinar los valores de fijación biológica de nitrógeno para todos los ecosistemas, pero se observa que para el *Pantanal* y la *Caatinga* los valores varían de 2,6 a 11 KgN ha-*1* año-*1*.

La proyección más crítica para la región amazónica es la posible "sabanización" de la selva (*Amazon rainforest dieback*, en inglés) que traería aparejadas pérdidas significativas en las existencias de carbono, tanto en el suelo como en la vegetación. En este escenario, previsto por el modelo HadCM3 del Hadley Center del Reino Unido, la zona este de dicha cobertura podría ser reemplazada por una vegetación del tipo de sabana. [*GT1* 5.5.1]

No obstante, otros autores, echando mano de una compilación mayor de modelos climáticos globales, se contraponen a esa hipotética "sabanización" de la selva amazónica y exhiben simulaciones que no reproducen las condiciones ambientales y de respuesta de la selva como para que se plasme tal escenario. De concretarse el proceso de sabanización en una parte del bioma *Amazônia*, dichas alteraciones tendrían reflejos no solamente en el ciclo del carbono, sino también en el ciclo del nitrógeno y en el clima regional.

El bioma *Mata Atlântica* almacena cantidades apreciables de carbono y nitrógeno en sus suelos, fundamentalmente en los de altura. Los aumentos previstos para la temperatura del aire en la región sudeste de Brasil ocasionarían una aceleración de los procesos de respiración y descomposición, generando un incremento de las pérdidas de carbono y nitrógeno con respecto a la atmósfera.

En los pastizales sureños del bioma *Pampa*, de manera análoga a lo que se registra en la *Mata Atlântica*, los suelos contienen una apreciable concentración de carbono. Por ende, los aumentos de temperatura previstos para el futuro incrementarían las emisiones de CO2 hacia la atmósfera.

La productividad primaria del *Cerrado* puede potencialmente verse disminuida debido a los cambios climáticos proyectados para este bioma. El aumento de la temperatura redundará probablemente en una merma del proceso fotosintético en sus plantas, lo que implicará en una posible disminución de su biomasa. Adicionalmente, durante la estación seca, esa vegetación se erige en fuente de carbono emitido hacia la atmósfera, debido al estrés hídrico.

Por ende, una extensión en la duración de este período redundaría a su vez en una merma de la productividad primaria del Cerrado, como así también puede potencialmente resultar en un aumento de la vulnerabilidad al fuego. Al aumentar la cantidad de episodios de incendios, se produciría una disminución de las existencias de biomasa y de nutrientes por la vía de desagüe profundo, la erosión, el transporte de partículas y la volatilización. *[GT1* 5.5.3]

Las proyecciones muestran una disminución en el valor total y un aumento de la variabilidad en los niveles de precipitación para el bioma *Caatinga*, sumados a un incremento en la cantidad de días secos y un aumento de la temperatura del aire. Se trata en este caso del bioma donde se espera la mayor alteración en el régimen de precipitaciones, con una significativa merma pluvial, lo que puede resultar en profundas alteraciones en el funcionamiento del ecosistema. Las posibles consecuencias de estas variaciones del clima apuntan la ocurrencia de sequías más intensas y frecuentes. [*GT1* 5.5.4] Cabe hacer hincapié en que este ecosistema ya sufre actualmente un pronunciado estrés hídrico, con bajas concentraciones de carbono, que podrán verse reducidas debido a la intensificación de la sequía. [*GT1* 5.5.4]

Las lagunas científicas en el conocimiento de los ciclos biogeoquímicos

Faltan aún observaciones de corto y largo plazo en lo que hace a los procesos que regulan las existencias y los flujos en el funcionamiento de los ecosistemas brasileños. Puede detectarse un déficit crítico de información para determinados biomas, en los casos de la *Pampa*, el *Pantanal* y la *Caatinga*. Puede hallarse un volumen mayor de información al respecto de la *Amazônia* y, en menor medida, del *Cerrado*. Sólo recientemente se han llevado a adelante estudios acerca de la *Mata Atlântica*, pero todavía concentrados en algunas pocas áreas.

Las concentraciones de carbono y nitrógeno son sumamente sensibles a los cambios climáticos, y no se conocen del todo los mecanismos de estrés hídrico y de incremento de temperatura de ninguno de los biomas brasileños. Los posibles mecanismos biológicos de compensación deben aún estudiarse mejor en todos los biomas brasileños.

No existe información suficiente sobre los impactos de los cambios climáticos con relación al funcionamiento de los pastizales sureños de la pampa, que contienen considerables concentraciones de carbono en sus suelos. Las bajas temperaturas contribuyen para la acumulación de materia orgánica en el suelo; por ende, un aumento en las temperaturas como el que se pronostica desencadenaría un incremento de los niveles de descomposición, elevando las emisiones de CO2 hacia la atmósfera.

De igual forma que lo que se ha observado para la *Mata Atlântica*, no es posible aún prever si este aumento de las emisiones se vería compensado con un aumento de la productividad primaria neta del sistema.

AEROSOLES ATMOSFÉRICOS Y NUBES

Mediante diversos estudios llevados adelante en Brasil, se ha observado que las partículas ultramicroscópicas en suspensión en el aire denominadas aerosoles atmosféricos tienen fuertes efectos en el balance atmosférico de radiación y en los mecanismos de formación y desarrollo de las nubes.

La mayor parte de los trabajos brasileños sobre los aerosoles atmosféricos y las nubes corresponde a la región amazónica. Y se refieren al rol de las emisiones producto de quemas en la selva en el balance radiactivo y en los mecanismos de formación y desarrollo de nubes.

Puede observarse que las quemas o incendios emitieron enormes cantidades de material en partículas en dirección hacia la atmósfera en el año 2010 debajo, en la figura SEF.5. A la izquierda se muestra la cifra total de focos de incendios, y a la derecha, la distribución espacial de la profundidad óptica de los aerosoles (*AOD*, sigla en inglés; longitud de onda = 550 nm, newton por metro cuadrado), obtenida por el sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS*, por sus siglas en inglés. Se observa a su vez una fuerte asociación entre los focos de incendios y la distribución de aerosoles, no solamente en el bioma *Amazônia*, sino también y en gran escala en todo el territorio brasileño.

El espesor óptico registrado de los aerosoles es extremadamente elevado, y en tales niveles, los mismos generan fuertes efectos sobre la salud de las precipitaciones y sobre los índices fotosintéticos de fijación de carbono a cargo de la vegetación. [*GT1* 6.3.1]

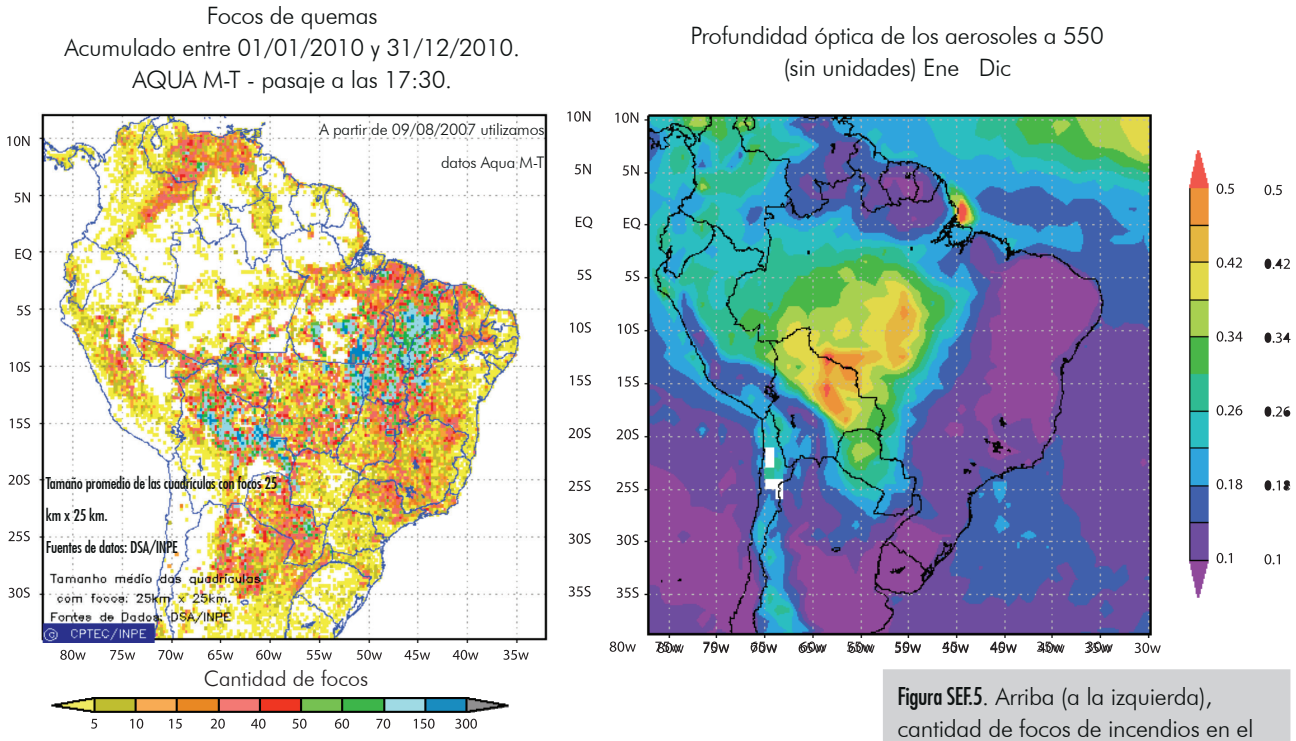


Figura SEF.5. Arriba (a la izquierda), cantidad de focos de incendios en el año 2010. [*GT1* 6.3.1]

Se han realizado diversos estudios en la Amazonia brasileña a los efectos de cuantificar los factores de emisión de partículas de aerosoles producto de incendios, pero todavía no existe formalmente un inventario nacional completo de emisiones de partículas por debido a este motivo, o por emisiones industriales o naturales.

Un punto importante en el caso de Brasil reside en la gran cantidad de estudios que se han realizado teniendo en cuenta el papel de los aerosoles en la formación y el desarrollo de las nubes, tanto en la región amazónica como en otras zonas. Dichos trabajos científicos han hecho posible efectivamente analizar cuidadosamente el rol de los aerosoles en tal sentido. Con todo, resulta más difícil cuantificar el rol de los aerosoles sobre el índice de precipitación, ya que esta cuestión sigue abierto, no solamente en dicho país sino en todo el mundo.

Se han observado resultados contradictorios en la literatura (aumento o diminución de las precipitaciones) debido al aumento de la cantidad de aerosoles ocasionados por incendios, lo que puede deberse a las distintas condiciones termodinámicas atmosféricas de los diversos experimentos. Este balance entre los efectos termodinámicos atmosféricos y el papel de los aerosoles sigue siendo entonces un tema abierto en la literatura científica brasileña e internacional.

Por otro lado, se registra un importante aporte de emisiones de material en partículas en las zonas urbanas, producto fundamentalmente de las emisiones de los vehículos. Aunque no sean mayoritarias en el contenido total de emisiones, las partículas de aerosoles de las emisiones urbanas ejercen un rol importante en el clima urbano y en la salud pública de las metrópolis brasileñas. [*GT1* 6.3.1] El tabla SET.1 que se observa debajo sintetiza la información referente a las concentraciones de aerosoles en algunas localidades brasileñas.

Observamos que la región metropolitana de São Paulo (conurbación de 39 localidades con una superficie de 7.946,8 kilómetros cuadrados y una población de 20,1 millones de habitantes, es decir, el 10% de la población brasileña) exhibe altas concentraciones de material fino en partículas, por encima del actual estándar de calidad del aire para PM2.5, y también arriba del estándar recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de una concentración promedio anual de 10 $\mu g/m^3$, es decir, microns por metros cúbicos. Este estándar de la OMS ha sido sobrepasado en diversas regiones metropolitanas brasileñas.

Tabela STD.1. Concentración promedio de material fino inhalable en partículas y black carbon (BC) , en μg/m3, medida en seis capitales brasileñas entre 2007 y 2008, y en áreas sujetas a incendios con el aporte relativo de BC en el PM,5. = partículas inhalables finas de diámetro inferior a 2,5 microns (μm).

	PM10	PM2.5B	C%	BC
SÃO PAULO	34[+]	28±14[b]	11±6	38±14
RIO DE JANEIRO	-	17±11[b]	3,4±2,5	20±7
BELO HORIZONTE	-	15±8[b]	4,5±3,33	1±13
CURITIBA	-	14±10[b]	4±4	30±11
PORTO ALEGRE	-	13±10[b]	5±4	26±11
RECIFE	-	7±3[b]	1,9±1,1	26±12
RONDÔNIA[c] (estação seca)	83±64	67±557	±6	11±2
ALTA FLORESTA[d] (estação seca)	37±25*	63±55	8±6	

[+]CETESB (2011); ref. ano 2009, [2]Andrade *et al.* (2012), [c]Artaxo *et al.* (2002) [d]Maenhaut *et al.* (2002)

*inclui apenas moda grossa. [GT1 6.3.1]

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (2011); ref. año 2009, [2]Andrade et al. (2012), estado de Rondônia [c]Artaxo et al. (2002) [d]Maenhaut et al. (2002) *incluye solamente moda gruesa. [GT1 6.3.1]

Mayoritariamente, tanto en las regiones urbanas como en aquéllas bajo el influjo de las quemas se registra un incremento significativo en la masa de material en partículas de moda fina. Aliado a ello, el material en partículas fino tiene un tiempo de residencia más elevado, lo que vuelve eficiente su transporte a distancias muy alejadas de su fuente. En particular, en el caso de los incendios, las plumas provenientes de la quema de biomasa en la región amazónica afectan a extensiones significativas de Sudamérica, con gran efecto en el forzante radiactivo directo e indirecto (es decir, cualquier cambio o alteración en la radiación calórica). [*GT1* 7] Asimismo, como parte significativa del material en partículas se genera bajo la forma de *black carbon* cuando se encuentra en suspensión, esta pluma tiene la capacidad de calentar los niveles medios de la tropósfera, generando estabilidad atmosférica e inhibición de la convección superficial.

Mediciones realizadas en la cuenca amazónica durante el experimento LBA-SMOCC -expresión producto de *Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia*, o Experimento de Gran Escala de la Biosfera-Amósfera en la Amazonia, y *Smoke Aerosols, Clouds, Rainfall and Climate*, Experimento de Microfísica de Nubes, todo por sus siglas en inglés– en 2002 [GT1 6.3.3] en la región de pasturas del estado brasileño de Rondônia cubrieron un período con intensa actividad de quemas (septiembre), transición (octubre) y comienzo de la estación lluviosa (noviembre).

Se observó un aumento de la cantidad total de partículas de 450 en la estación lluviosa a 5.260 en la estación seca, debido a las fuertes emisiones de los incendios en Rondônia. [*GT1* 6.3.3] Y también que ese gran aumento en la cantidad de partículas se produce fundamentalmente a partir de 50 nm de diámetro, una franja de tamaño en la cual las partículas de aerosol ya tienen una significativa capacidad para actuar como *Cloud Condensation Nuclei*, o *Núcleos de Condensación de Nubes, CCN,* por sus siglas en inglés. Se observó además un fuerte aumento de la concentración de *CCN* en la Amazonia, como consecuencia de las emisiones resultantes de incendios.

La comparación entre días con polución y días limpios muestra una concentración de *CCN* por lo menos cinco veces mayor para los días con polución. Se registraron valores promedio de concentraciones menores que 200 cm-*3* para las regiones limpias, y mayores que 1.200 cm-3 para las regiones contaminadas. A su vez, distintos estudios mostraron que las partículas finas, la franja donde predominan los *CCN*, están compuestas predominantemente por material orgánico secundario, formado por la oxidación de precursores biogénicos, en tanto que las partículas gruesas, importantes nucleadores de hielo, se conforman con material biológico emitido directamente por la selva. [*GT1* 6.3.3]

Diversos estudios referentes a los efectos de los aerosoles en la formación y el desarrollo de nubes se llevaron a cabo mediante el empleo de la hipótesis de que, si los efectos indirectos (y también el efecto semidirecto) se manifiestan en condiciones de polución como consecuencia de la disminución de los procesos de colisión y coalescencia o aumento de la estabilidad, debería haber una merma en la precipitación estratiforme en comparación con las condiciones más limpias en el mismo ambiente. Sin embargo, al comparar muestras sin lluvia, con lluvia y con lluvia intensa (>5 mm h-*3)*, se arribó a la conclusión de que las condiciones atmosféricas de mayor escala son más importantes para el desarrollo de las precipitaciones que la concentración de aerosoles.

Los resultados de estudios de electrificación en la región de la Amazonia brasileña sugieren que la ausencia de distinción entre los parámetros eléctricos de los regímenes de polución y limpio en la cuenca amazónica pone en duda el papel de los aerosoles en la intensificación de la electrización de las nubes y refuerzan la idea de un rol preponderante de la dinámica. [*GT1* 6.4]

En lo que atañe específicamente a los aerosoles en Brasil y en Sudamérica, utilizando el modelado regional (RegCM3 y *BRAMS*), se han evidenciado potenciales impactos de los mismos producto de incendios sobre la circulación atmosférica de gran escala, con modificaciones en el comportamiento del monzón de América del Sur

1 El *black carbon*, denominado en castellano carbón negro, es la fracción del material en partículas que tiene la propiedad de absorber fuertemente la radiación. Corresponde al llamado hollín, y comúnmente se lo asocia a los procesos de combustión de motores y a la quema de biomasa.

debido al aumento de la estabilidad termodinámica sobre el sur de la Amazonia. Estos autores plantean que aumentos en la estabilidad y la presión sobre la superficie, como así también un desagüe divergente en esa zona, pueden desencadenar un refuerzo de la actividad ciclónica y un aumento de las precipitaciones en el sudeste de Brasil, en Paraguay y en el nordeste de Argentina.

Se ha observado que el transporte de polvo desde el Sahara tiene impactos sobre la concentración de núcleos de hielo en la parte central de la Amazonia, lo cual contribuye para la formación y el desarrollo de nubes convectivas en todo ese bioma. [*GT1* 6.2]

Las lagunas existentes referidas a aerosoles y nubes

De manera general, puede decirse que debemos expandir nuestros conocimientos referentes a los procesos de generación y transporte de aerosoles sobre el continente sudamericano, incluso sobre las fuentes naturales y antrópicas locales y remotas. También resulta fundamental mejorar nuestra comprensión acerca de la influencia de los aerosoles en la formación de nubes, al servir como núcleos de condensación (*CCN*) y de hielo (*IN,* por sus siglas en inglés); incluso con respecto al papel de su variabilidad espacial y temporal.

Nuestro conocimiento también es limitado en lo que atañe a las propiedades microfísicas de las nubes sobre el continente sudamericano, incluso en lo referente a las observaciones en nubes cálidas y de fase mixta, ya realizadas sobre territorio brasileño, y a sus posibles implicaciones sobre las propiedades radiactivas y sobre el ciclo hidrológico. Resulta importante determinar los efectos de los aerosoles y de las alteraciones termodinámicas de la atmósfera sobre los mecanismos de formación y desarrollo de las nubes, como así también lo es la representación de las mismas en modelos numéricos de circulación general y de área limitada.

En Brasil, en las áreas urbanas, no existen trabajos que reporten medidas de concentración de cantidades de nanopartículas. Resulta importante que este tipo de mediciones se realicen con el objetivo de permitir un mejor estudio de los efectos de las partículas sobre la salud de la población y de la influencia de las nanopartículas de las emisiones urbanas en la microfísica de las nubes.

FORZANTE RADIACTIVO NATURAL Y ANTRÓPICO

Resulta importante determinar el aporte cuantitativo de cada agente climático en las variaciones de temperatura de la superficie en Brasil. No obstante, los modelos climáticos más modernos y sofisticados requieren aún de un importante desarrollo como para estar en condiciones de suministrar resultados consistentes sobre los pronósticos de cambios climáticos: existen todavía grandes divergencias entre los pronósticos de temperatura, la cobertura de nubes, las precipitaciones, etc., elaborados con modelos distintos, no sólo en lo que atañe a Brasil sino también para todo el planeta.

El concepto de forzante radiactivo, definido en el Panel SEP.1, constituye un paso intermedio que, de entrada, no requiere de modelos climáticos para su cálculo; por ende, los valores de forzante radiactivo pueden interpretarse más objetivamente.

Painel SEP.1 – Definición de forzante radiactivo

Se define como forzante radiactivo debido a un agente climático a la diferencia de irradiancia neta en la tropopausa, entre un estado de referencia y un estado perturbado por un agente climático. Las temperaturas de la superficie y de la tropósfera se mantienen fijas, pero se permite que la estratósfera alcance el equilibrio radiactivo. El estado de referencia puede ser la ausencia del agente climático, o su impacto sobre una determinada situación o época, como el comienzo de la Revolución Industrial, por ejemplo (aproximadamente 1750), adoptado por el *IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change* (Forster *et al*., 2007).

Los efectos climáticos más significativos en escalas ubicadas entre decenas y centenas de años en Brasil son los efectos radiactivos de las nubes, el forzante radiactivo de los gases de efecto invernadero, el forzante de cambio de uso del suelo, y el de los aerosoles (humo) emitidos en incendios ocasionados por fuentes antrópicas. El gráfico SET.2 presenta una compilación de resultados hallados en la literatura científica sobre los principales efectos radiactivos de los agentes climáticos en Brasil.

Los resultados compilados muestran que las nubes constituyen el agente climático más importante desde el punto de vista del balance de radiación sobre el bioma amazónico, que reduce hasta en 110 Wm 2 el flujo radiactivo en la superficie, y contribuye con un forzante radiactivo de alrededor de -9.8 Wm 2 en la cima de la atmósfera. Esto significa que las nubes sobre la *Amazônia*, en las condiciones actuales, desempeñan un importante papel en el enfriamiento del sistema climático.

Diversos estudios han cuantificado ese forzante de aerosoles antrópicos, sobre todo en la región antes mencionada. Una media aritmética ponderada de algunos de los resultados compilados en este capítulo resultó en un forzante radiactivo de -8,0±0,5 Wm 2, lo que indica que el humo emitido por incendios forestales contribuye a enfriar el planeta y se contrapone en parte al calentamiento causado por los gases de efecto invernadero antrópicos.

Sin embargo, resulta sumamente importante hacer hincapié en que los aerosoles y los gases de efecto invernadero tienen escalas de tiempo y espacio muy distintas. Mientras que las partículas de aerosoles tienen una vida promedio en la baja atmósfera que va de algunos días a semanas, los gases de efecto invernadero pueden tener una vida promedio situada entre decenas y miles de años.

El tabla SET.2 exhibe una compilación de resultados de determinaciones de forzante radiactivo en diversas regiones brasileñas y para distintas condiciones. Observamos la fuerte alteración en el balance de radiación observado o modelado, con valores promedios diarios de enfriamiento en la superficie de hasta -110 vatios por m^2, en tanto que en la cima de la atmósfera se reportaron valores entre -10 y -20 w/m^2. La columna atmosférica, debido al efecto del carbón negro emitido en las quemas, puede exhibir valores de calentamiento entre +30 y +40 w/m^2. Este fuerte calentamiento en general en la cima de la capa límite planetaria altera el perfil vertical normal de temperatura, inhibiendo la convección, un proceso crítico para la formación y el desarrollo de nubes.

Tabela SET.2 Cuantificación del forzante radiactivo del aerosol antrópico, del cambio en el uso del suelo y del efecto radiactivo de nubes sobre Brasil y América del Sur

Agente	Região	Condição[a]	Valor[b] (Wm^{-2})	Fonte dados
Nuvens	Amazônia	SUP, 24h[c]	[-110; -50]	Modelo climático, satélite
		SUP, 24h[c]	-76	Modelo climático
		TDA, 24h[c]	+26	
Uso do SolbA	mazônia	TDA	-23,7±2,9	Satélite, modelo radiativo
		TDA, 24h-	7,1±0,9	
Aerossol antrópico: Efeitos Diretos	Amazônia	SUP, 24h[d]	-39,5±4,2	Sens. remoto, modelo radiativo
		ATM, 24h[d]	+31,2±3,6	
		TDA, 24h[d]	-8,3±0,6	
	Amazônia	TDA, 24h[c]	-16,5	Modelo climático, medidas *in-situ*
	Atlântico tropicd	TDA, 24h[e]	-1,8	Satélite, modelo radiativo
		ATM, 24h[e]	+2,9	
	América do Sul	TDA, 24h[	-8; -1]	Modelo climático, satélite
		SUP, 24h[	-35; -10]	
	América do SulT	DA, anual[	-1,0; -0,2]	Satélite
	Amazônia	TDA-	13,0±3,9	Satélite, modelo radiativo
		TDA, 24h-	7,6±1,9	
	Amazônia	TDA, 24h	-5,6±1,7	Satélite, modelo radiativo
	Floresta		-6,2±1,9	
	Cerrado-		4,6±1,6	
Aerossol antrópico: Efeitos Indiretos	Hemisfério Sul	TDA, 24h[c], alb	-0,70±0,45	Revisão da literatura
	Global, sobre continentes	TDA, 24h[c], ind	-1,9±1,3	
	Atlântico tropical	TDA, 24h[e], alb	-1,5	Satélite, modelo radiativo
		TDA, 24h[e], ind	-9,5	
	América do SulT	DA, 24h, ind[	-5; +20]	Modelo climático, satélite
	América do Sul	TDA, anual, alb	[-0,10; -0,02]	Satélite
	Atlântico tropical		[-5,00; -0,05]	
Total aerossóis e nuvens	Amazônia	TDA, 24h[c]	-9,8	Modelo climático, medidas *in-situ*
	Atlântico tropicd	TDA, 24h[e]	-11,3	Satélite, modelo radiativo
		SUP, 24h[e]	-8,4	
	América do Sul	TDA, 24h[	-10; +15]	Modelo climático, satélite
		SUP, 24h[	-35; -5]	

a) Indica la posición vertical en la columna atmosférica (cima de la atmósfera o *TDA*, por sus siglas en portugués; SUP: superficie; ATM: columna atmosférica) para la estimación en cuestión, el dominio temporal de cálculo (valor instantáneo, promedio de 24h o promedio anual), y el componente del efecto indirecto analizado (alb: albedo; ind: total de los efectos indirectos). b) Los valores entre corchetes indican los rangos mínimos y máximos exhibidos en las referencias. De estar disponibles, se indican las incertidumbres que plantean los autores. c) Dominio temporal presumido (no informado explícitamente en la referencia). d) Estado de referencia con profundidad óptica de aerosoles de 0,11. e) Estado de referencia con profundidad óptica de aerosoles de 0,06.

El uso del suelo en las diversas regiones brasileñas altera el albedo de superficie -es decir, la capacidad de la superficie de reflejar a partir de la luz- causando un forzante radiactivo debido a la alteración de la reflectividad de la superficie comparada con la superficie natural. El análisis de la alteración del albedo, debido a la deforestación de la Amazonia, la estima en -7,3±0,9 Wm 2, un valor alto si se lo compara con el calentamiento de los gases de efecto invernadero (aprox. 2 Wm 2), lo que demuestra que al cambiarse un área de selva por áreas de pastoreo o de cultivo agrícola, se registra una fuerte alteración en el balance radiactivo atmosférico. Cabe notar que ese valor es análogo al forzante de aerosoles antrópicos; pero resulta importante a su vez subrayar que el desmonte en la Amazonia tiene un carácter virtualmente "permanente" (esto es, la mayoría de las áreas degradadas en general no vuelven a recomponerse como bosques primarios), mientras que los aerosoles de las quemas tienen una vida promedio del orden de los días.

Las lagunas detectadas en el forzante radiactivo natural y antrópico

La mayoría de los trabajos regionales realizados en Brasil se enfocó en la región Amazónica. Estudios realizados en los demás biomas brasileños se hacen necesarios para arribar a una comprensión de las complejas interacciones existentes entre el balance de radiación atmosférico y el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero y de aerosoles, como así también del efecto del cambio en el albedo de superficie. Es necesario realizar también estudios de modelado en gran escala, con modelos químicos dinámicos acoplados a los códigos de transferencia radiactiva.

EVALUACIÓN DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES Y REGIONALES

El modelado climático global y regional ha concretado grandes avances durante los últimos años en términos de representación de procesos y fenómenos críticos para el estudio de las alteraciones del clima. Brasil ha cobrado relieve en el área, debido al desarrollo de modelos atmosféricos regionales y globales -atmosféricos y acoplados- océano-atmósfera.

Los patrones de variabilidad estacional e interanual de la Oscilación del Sur el Niño -*El Niño Southern Oscillation*, o *ENSO*, por sus siglas en inglés– son bien simulados por el Modelo de Circulación General de la Atmósfera (MCGA) [Não precisa dizer que é em portugués, pois é igual em español] del *Centro de Previsão e Estudos Climáticos del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, CPTEC/ INPE*, por sus siglas en portugués. En este caso, el modelo reproduce el patrón observado de anomalías de precipitación sobre América del Sur asociado al *ENSO*, con exceso de precipitaciones en el sur y déficit en el nordeste del territorio brasileño, siendo que el índice de éxito de los resultados depende del tipo de *ENSO*. [*GT1* 3.6.3]

Cuando la señal de *ENSO* es fuerte, es decir, cuando las anomalías de TSM son intensas en el océano Pacífico Ecuatorial, las anomalías de precipitación simuladas sobre la región sur de Brasil corresponden más fielmente a las observaciones. [*GT1* 8.4.1]

El desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) observado sobre el océano Atlántico es en general reproducido adecuadamente por los modelos brasileños. Sin embargo, se registra una deficiencia en la representación de su migración estacional. Pero los más recientes avances implementados con el *Modelo Brasileiro do Sistema Climático Global* (*MBSCG*, por su siglas en portugués) redundaron en una mejora sustantiva de la representación de la convección atmosférica y de la precipitación sobre la Amazonia y el Atlántico tropical, con un notable impacto en la reproducción de la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical - ZCIT. [*GT1* 8.4.2]

El patrón de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), uno de los principales componentes del SMAS, aparece también adecuadamente representado numéricamente en la escala de tiempo interanual e intraestacional. [*GT1* 8.4.2] Las características atmosféricas asociadas a la ZCAS, en casos extremos de precipitación en el sudeste, obtenidas en análisis observacionales, se reproducen igualmente en los análisis

de casos extremos, llevados a cabo a partir de resultados numéricos. [*GT1* 8.4.4]

En general, se verifica que el clima de regiones tales como el nordeste y el sur de Brasil, la Amazonia, el noroeste de Perú y de Ecuador y el sur de Chile aparece mejor reproducido, si se lo compara con otras, tales como el sudeste y el centro-oeste brasileños. Suponiendo que la capacidad para simular el clima en el futuro sea la misma que en el presente, las proyecciones de clima para el futuro en las áreas de menos errores tendrían mayor credibilidad. [GT1 8.6]

La incertidumbre en las simulaciones de los modelos globales y regionales

La incertidumbre en las formulaciones de los modelos numéricos en lo que atañe a resolver el sistema climático se refleja en la magnitud de los errores sistemáticos de las simulaciones. Esta evaluación de los errores, a su vez, también contiene las incertidumbres que se desprenden de la calidad de las observaciones, cuya red sobre América del Sur es deficiente desde el punto de vista espacial y temporal. La incertidumbre sobre las medidas observacionales afecta directamente a la robustez de la evaluación de los modelos climáticos.

En términos específicos, el conocimiento de la eficiencia de los modelos climáticos globales y regionales a la hora de reproducir correctamente el patrón estacional de precipitaciones y los diversos sistemas importantes para el clima de América del Sur y de Brasil, tales como ZCAS y ZCIT, entre otros, depende de la expansión y del mantenimiento de sistemas de observación que permitan la obtención de series continuas de datos meteorológicos y climatológicos de calidad.

LOS CAMBIOS AMBIENTALES DE CORTO Y LARGO PLAZO: PROYECCIONES, REVERSIBILIDAD Y ASIGNACIÓN

Los resultados de las proyecciones regionalizadas de clima en los distintos biomas de Brasil, considerados los períodos de inicio (2011-2040), mediados (2041- 2070) y finales (2071/2100) del siglo XXI, se resumen en la figura SEF.6. [*GT1* 9] Los cambios porcentuales en la lluvia y en la temperatura (°C) se refieren a los valores del clima actual (finales del siglo XX).

La figura SEF.6 muestra proyecciones de alteraciones en las lluvias y la temperatura para los períodos de verano (de diciembre a febrero –DEF–) e invierno (de junio a agosto –JJA–). Dependiendo del escenario futuro de calentamiento global, con baja o alta emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), tales valores pueden respectivamente oscilar entre ~5% y ~20% en precipitaciones y ~1°C y ~5°C en temperatura. Las proyecciones indican una disminución significativa de las lluvias en gran parte del centro-norte-nordeste del territorio brasileño. [*GT1* 9] Los escenarios climáticos futuros sugieren una expansión de los eventos extremos de sequías y estiajes prolongados, fundamentalmente en los biomas de la *Amazônia, el Cerrado* y la *Caatinga*. Cabe acotar que dichos cambios se acentúan a partir de la mitad y finales del siglo XXI. En lo que se refiere a la temperatura del aire en la superficie, todas las proyecciones indican condiciones de clima futuro más cálido. [*GT1* 9]

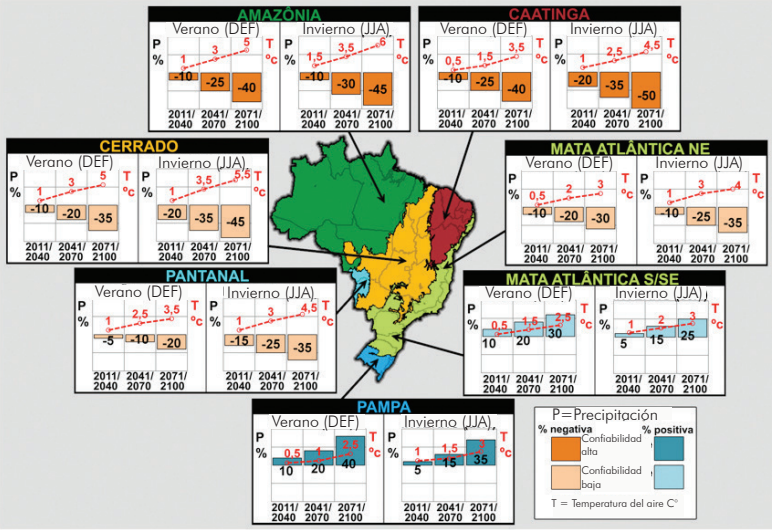


Figura SEF. 6. Proyecciones regionalizadas del clima en los biomas brasileños Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pantanal, el Mata Atlântica (sectores nordeste y sur/ sudeste) y Pampa para los períodos de comienzos (2011-2040), mediados (2041-2070) y finales (2071/2100) del siglo XXI, basados en los resultados científicos de modelado climático global y regional. Las regiones con distintos colores en el mapa indican el dominio geográfico de los biomas. La leyenda se encuentra en la parte inferior, a la derecha. [*GT1 9*]

En general, las proyecciones climáticas exhiben un desempeño (*skill*) relativamente mejor en los sectores norte/ nordeste (*Amazônia* y *Caatinga*) y sur (*Pampa*) de Brasil, y un desempeño inferior en el centro--oeste y sudeste (*Cerrado, Pantanal* y *Mata Atlântica*). Tal cual ilustra la figura SEF.6, **las proyecciones para los biomas brasileños**, basadas en los resultados científicos de modelado climático global y regional, son las siguientes:

AMAZÔNIA: Reducciones porcentuales del 10% en la distribución de lluvias y aumento de temperatura de 1° a 1,5°C hasta 2040, manteniéndose la tendencia de disminución de un 25% a un 30% en las lluvias y un aumento de temperatura de entre 3° y 3,5°C en el período 2041-2070, y merma de lluvias del 40% al 45% y aumento de 5° a 6° C en la temperatura al final del siglo (2071-2100). Mientras que las modificaciones del clima asociadas a los cambios globales pueden comprometer al bioma a largo plazo (a finales del siglo), la cuestión actual de la deforestación producto de las intensas actividades de uso de la tierra constituye una amenaza más inmediata para ese bioma.

Estudios observacionales y de modelado numérico sugieren que en caso de que el desmonte llegue al 40% en la región en el futuro, cabe estimar una alteración drástica en el patrón del ciclo hidrológico, con una disminución del 40% en las lluvias entre julio y noviembre, prolongando así la duración de la estación seca, sumada al calentamiento superficial de hasta 4°C. De este modo, los cambios regionales resultantes del efecto de la deforestación se suman a aquéllos ligados a los cambios globales y erigen las condiciones propicias para la sabanización de la selva amazónica, un problema que tiende a volverse crítico en su región oriental.

CAATINGA: Aumento de entre 0,5° y 1°C de la temperatura del aire y disminución de entre un 10% y un 20% de las precipitaciones durante las próximas tres décadas (hasta 2040), con aumento gradual de temperatura de 1,5° a 2,5°C y disminución situada entre el 25% y el 35% en los niveles de lluvias en el período 2041-2070. Al final del siglo (2071-2100), las proyecciones indican condiciones significativamente más cálidas (aumento de temperatura de entre 3,5° y 4,5°C) y agravamiento del déficit hídrico regional, con disminución a prácticamente la mitad (del 40% al 50%) de la distribución de las lluvias. Estos cambios pueden desencadenar el proceso de desertificación de este bioma.

CERRADO: Aumento de 1°C en la temperatura superficial, con disminución porcentual situada entre un 10% y 20% en las lluvias durante las próximas tres décadas (hasta 2040). Para mediados del siglo (2041-2070), se estima un aumento de entre 3° y 3,5°C en la temperatura del aire y una reducción entre 20% y 35% de las lluvias. Al final del siglo (2071-2100), el aumento de temperatura llegará a valores ubicados entre 5° y 5,5°C y la diminución de las lluvias será más crítica: entre un 35% y un 45%. Acentuación de las variaciones estacionales.

PANTANAL: Aumento de 1°C en la temperatura y diminución entre un 5% y un 15% en los niveles de lluvias hasta 2040, manteniéndose la tendencia a la merma de las lluvias en porcentajes entre un 10% y un 25% y un aumento de entre 2,5° y 3°C de la temperatura a mediados del siglo (2041-2070). A finales de siglo (2071-2100) predominan las condiciones de calentamiento intenso (entre 3,5° y 4,5°C), con diminución acentuada de los niveles de lluvias del 35% al 45%.

MATA ATLÂNTICA: Debido a que este bioma abarca áreas que atraviesan el sur, el sudeste y se extiende hasta el nordeste brasileño, las proyecciones apuntan dos regímenes distintos. ***Sector nordeste*** (NE): aumento relativamente bajo de las temperaturas de entre 0,5° y 1°C y disminución en los niveles de precipitaciones de alrededor de un 10% hasta 2040, manteniéndose la tendencia al calentamiento de entre 2° y 3°C y una disminución pluviométrica entre el 20% y el 25% a mediados del siglo (2041-2070). Para finales de siglo (2071-2100), se estiman condiciones de calentamiento intenso (aumento de 3°C a 4°C) y disminución del 30% al 35% en las lluvias. ***Sector sur/sudeste*** (S/SE): hasta 2040 las proyecciones indican aumento relativamente bajo de temperatura de entre 0,5° y 1°C, con aumento del 5% al 10% en las lluvias. A mediados de siglo (2041-2070), se mantienen las tendencias de aumento gradual del 1,5° al 2°C en la temperatura y de aumento de 15% al 20% en las lluvias, siendo que estas tendencias se acentúan aún más al final del siglo (2071-2100), con patrones de clima entre 2,5° y 3°C más cálido y entre un 25% y un 30% más lluvioso.

PAMPA: Durante el período que se extiende hasta 2040, prevalecen las condiciones de clima regional de un 5% a un 10% más lluvioso y hasta 1°C más cálido, manteniéndose la tendencia al calentamiento de entre 1° y 1,5°C e intensificación de las lluvias entre un 15% y un 20% hasta mediados del siglo (2041-2070). A finales del siglo (2071-2100), las proyecciones se agravan, con un incremento de temperatura de entre 2,5° y 3°C y entre un 35% y un 40% de lluvias por encima de lo normal.

Incertidumbre

La incertidumbre científica en las proyecciones de los cambios de clima es inherente al sistema climático, producto en primera instancia de las interacciones no lineales y complejas intrínsecas y propias de los fenómenos naturales. De esta forma, múltiples abordajes, que comprenden el modelado y la observación, se hacen necesarios a los efectos de minimizar tal incertidumbre; y deben emplearse conjuntamente.
Su bien durante la última década se han realizado avances sustanciales en la ciencia del sistema terrestre (con formulaciones más completas de los procesos físicos, químicos y biológicos, incluso en lo que hace a sus complejas interacciones, dentro de los modelos del sistema climático global), aliados a una significativa evolución tecnológica en la simulación computacional, las proyecciones climáticas y ambientales generadas por el modelado climático traen aparejadas diversos niveles de incertidumbre, cuyas categorías principales son:
Incertidumbre sobre los escenarios de emisiones Las emisiones globales de GEI son difíciles de prever, en virtud de la complejidad de factores socioeconómicos, tales como la demografía, la composición de las fuentes de generación de energía, las actividades de uso de la tierra y el propio curso del desarrollo humano en términos globales.
Incertidumbre sobre la variabilidad natural del sistema climático Los procesos fisicoquímicos de la atmósfera global son de naturaleza caótica, de manera tal que el clima puede ser sensible a cambios mínimos (variaciones no lineales) de difícil medición tanto en lo que hace a los datos observacionales como a los resultados de los modelos.
La incertidumbre de los modelos La capacidad de modelar el sistema climático global constituye un gran reto para la comunidad científica. Son factores limitantes la representación todavía incompleta de procesos tales como el balance de carbono global y regional, el papel de los aerosoles en el balance de energía global, la representación de los ciclos biogeoquímicos y factores antrópicos tales como el desmonte y los incendios (las nubes también constituyen importantes fuentes de incertidumbre en los modelos climáticos [*GT1* 6]). Por otro lado, aunque se empleen los mismos escenarios de emisiones, distintos modelos producen diferentes proyecciones de cambios climáticos, y esto se erige así en una nueve fuente de incertidumbre, que puede minimizarse mediante la aplicación de conjuntos de simulaciones (*ensembles*) de modelos globales y regionales. [*GT1* 8]

Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

Ministério do
Meio Ambiente

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

FUNDO CLIMA