Sumário executivo

Base Científica das Mudanças Climáticas

Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 1 09/09/13 15:33

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 2 09/09/13 15:33

pbmc

painel brasileiro de mudanças climáticas

SUMÁRIO EXECUTIVO

Base Científica das Mudanças Climáticas

Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

Brasília, DF
2013

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 3 09/09/13 15:33

Carlos Afonso Nobre
Presidente do Conselho Diretor

Suzana Kahn Ribeiro
Presidente do Comitê Científico

Andrea Souza Santos
Secretária-Executiva

Giovana Maria Tadaieski Arruda
Assessora Técnica do Grupo de Trabalho 1

Erico Leiva
Fabiana Soares
Unidade de Apoio Técnico do Grupo de Trabalho 1

Traço Design
Projeto gráfico

Ficha técnica/Referência deste Sumário:

PBMC, 2013: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1.
PBMC, Rio de Janeiro, Brasil.
24 p.

ISBN: 978-85-285-0208-4

Autores Coordenadores:

Tércio Ambrizzi; Moacyr Araujo.

Autores Principais:

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 e Valério de Patta Pillar.

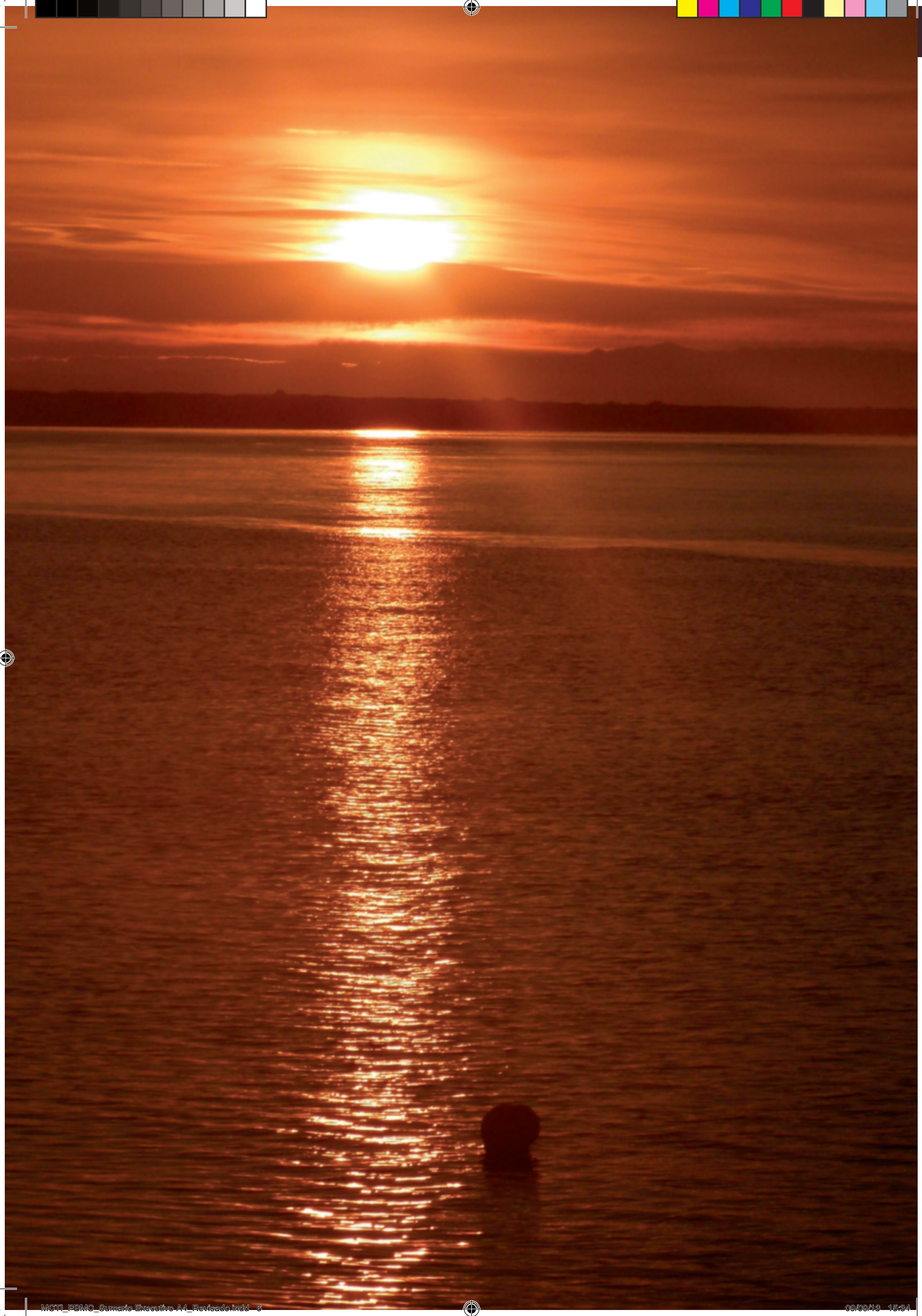
Autores Colaboradores:

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; Guilherme Ruas Medeiros; Guillermo Oswaldo Obregón Párraga; Henrique de Melo Jorge Barbosa; Ilana Elazari Klein Coaracy Wainer; 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; 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; 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 e 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; Jose Marengo Orsini; Ilana Elazari Klein Coaracy Wainer; Juan Carlos Ceballos; Marcelo de Paula Corrêa; Maria Assunção Faus da Silva Dias; Maria Cristina Forti; Maria Valverde; Paulo Artaxo; Pedro Leite da Silva Dias e Regina Luizão.

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - Secretaria-Executiva
Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Sala G-106. Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ.
CEP: 21.949-900. Tel.: (21) 2562-7030/2562-8326
www.pbmc.coppe.ufrj.br



MCTI_PBMG_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 8 09/06/13 15:34

INTRODUÇÃO

Este documento apresenta as principais contribuições do Volume 1 do RAN1, que foi estruturado de acordo com o escopo previamente definido pelos Autores Principais dos capítulos do Grupo de Trabalho 1 (GT1). Os levantamentos aqui sintetizados resultam de uma extensa avaliação da literatura científica existente, na qual se procurou: (i) evidenciar as implicações para o Brasil dos principais pontos do GT1 do Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês); (ii) registrar e discutir os principais trabalhos científicos publicados após 2007, com destaque para aqueles relacionados mais diretamente às mudanças climáticas na América do Sul e no Brasil.

OBSERVAÇÕES AMBIENTAIS ATMOSFÉRICAS E DE PROPRIEDADES DA SUPERFÍCIE

As séries temporais climáticas são um indicador das interações complexas do sistema climático terrestre, representando um efeito combinado de oscilações em diversas escalas de tempo que são naturais do sistema climático de ações antrópicas. A separação de variações naturais das alterações antrópicas geralmente é uma tarefa difícil, pois é muitas vezes baseada em séries temporais de observações feitas durante períodos relativamente curtos. Sendo assim, é necessária cautela na atribuição das causas das variações observadas.

O Brasil é um país de dimensões continentais, apresentando grande diversidade de regimes climáticos e de influências sobre seu clima, o que certamente dificulta a aquisição de séries de dados observacionais de mais longo período (cobrindo, por exemplo, o início do século XX). Na Figura SEF.1 são mostrados os regimes sazonais médios de precipitação da América do Sul. O ciclo sazonal das chuvas é afetado pelas variações interanuais, que pode produzir alterações no ciclo de chuvas, como, por exemplo, a ocorrência de seca durante a estação chuvosa, ou mesmo uma estação chuvosa abundante. Uma importante fonte de variabilidade interanual são os eventos El Niño e La Niña. [GT1 2.2.1]

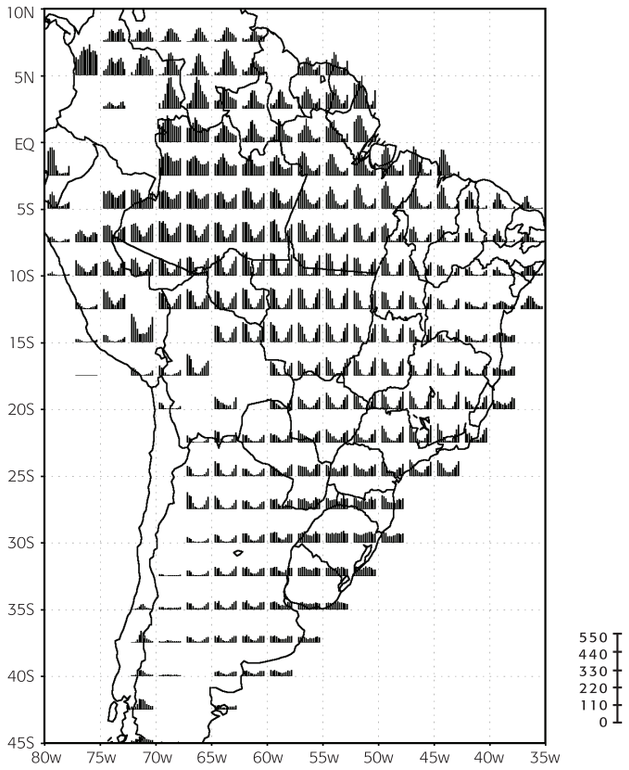


Figura SEF.1. Ciclos anuais de precipitação em regiões de 2,5°×2,5° latitude-longitude, calculados com pelo menos 25 anos de dados no período 1950-2005. [GT1 2.2.1]

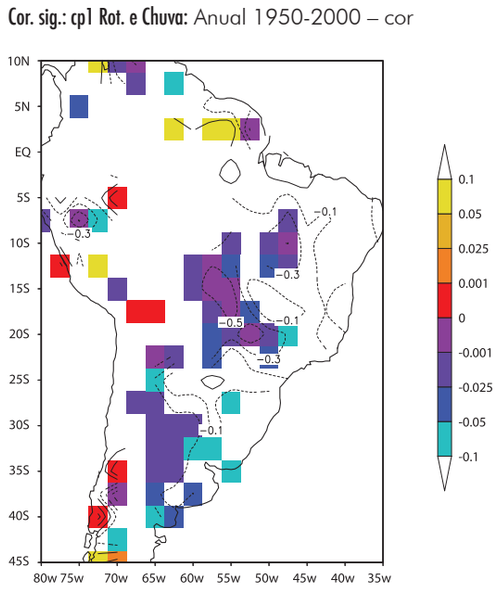
MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 7 09/09/13 15:34

O primeiro modo de variabilidade interdecenal da precipitação total anual indica que no período 1950-2000 houve oscilação da chuva no nordeste da Argentina e Centro-Oeste do Brasil, com oscilação mais fraca de sinal contrário no Norte do Brasil, sendo que a evolução temporal mostra uma variação interdecenal com tendência crescente da chuva no nordeste da Argentina e Centro-Oeste do Brasil, principalmente entre 1970 e 2000, período precedido por uma tendência de diminuição de chuvas nessas regiões de 1950 até 1970. Alguns estudos indicam que este modo é significativamente associado a um modo de variabilidade interdecenal de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Atlântico, denominado Oscilação Multidecenal do Atlântico (OMA). [GT1 2.2.3]

As correlações do modo de tendência da TSM com séries médias de precipitação (1950-2000) na América do Sul (Figura SEF.2A) sugerem um aumento de precipitação nas partes do Centro-Oeste do Brasil/Sul da Amazônia, do Sul do Brasil e outras regiões da baixa Bacia do Paraná/Prata, como o nordeste da Argentina e Uruguai. [GT1 2.2.4]

Este padrão é confirmado quando se analisa a tendência da precipitação para o período de 1951 a 2000 (Figura SEF.2B), onde se observa tendências negativas no norte e oeste da Amazônia, positivas no sul da Amazônia, no Centro-Oeste e Sul do Brasil e ausência de tendência no Nordeste.

A



B

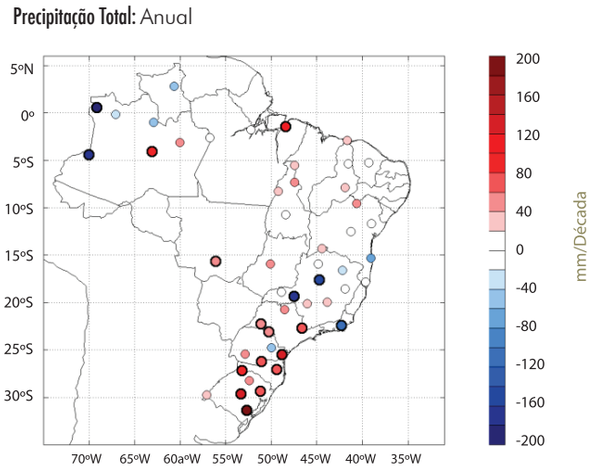


Figura SEF.2. (A) Coeficientes de correlação (isolinhas) entre o modo de variabilidade de TSM (modo de tendência) e a precipitação média anual no período 1950-2000. Coeficientes negativos (positivos) indicam aumento (diminuição) de precipitação no período. As cores representam os níveis de significância (para correlações positivas e negativas), (B) Tendência da precipitação total anual no período1951-2000 (mm década^{-1}). Círculos com contornos grossos indicam significância estatística do Teste Mann-Kendal ao nível de significância de 0,05.

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 8 09/09/13 15:34

Estudos de tendência da temperatura do ar utilizando dados de estação sobre a América do Sul limitam-se, na sua maioria, ao período entre 1960-2000. Os resultados mais significativos referem-se às variações de índices baseados na temperatura mínima diária, que indicam aumento de noites quentes e diminuição de noites frias na maior parte da América do Sul, com consequente diminuição da amplitude diurna da temperatura, especialmente na primavera e no outono. Esses resultados são mais robustos para as estações localizadas nas costas leste e oeste dos continentes e são confirmados para séries em períodos mais longos. [GT1 2.3.2]

Dados de reanálises desde 1948 fornecem evidência de que tem aumentado a temperatura em baixos níveis na atmosfera de forma mais acentuada em direção aos trópicos do que nos subtrópicos da América do Sul durante o verão austral, tendo a temperatura média anual junto da superfície nos trópicos apresentado tendência positiva. Como exemplo, a Figura SEF.3 mostra a tendência linear de expansão de área do aumento de temperaturas maiores que 18°C entre 1949 e 2009.

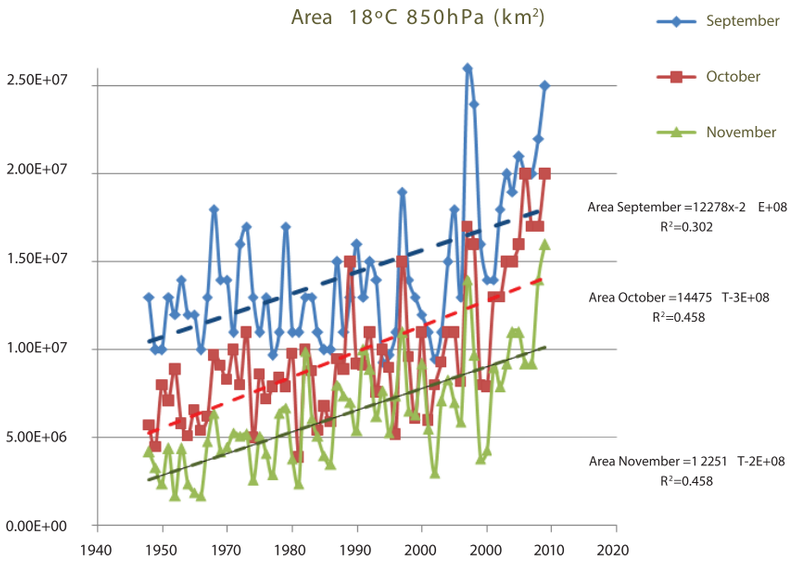


Figura SEF.3. Evolução temporal da área com temperaturas ≥ 18°C em 850 hPa sobre a América do Sul (1948-2009). Tendências lineares estão indicadas na figura.

Lacunas Científicas das Observações Atmosféricas e em Superfície

A avaliação acurada de tendências de temperatura e precipitação na América do Sul em escala decenal a multidecenal é limitada pela disponibilidade de dados e sua distribuição espacial não homogênea. Além disso, o controle de qualidade de dados e os métodos de medidas aumentam as incertezas nas avaliações. Essas limitações são ainda mais críticas em regiões tropicais como a Amazônia e o Pantanal Matogrossense, onde a escassez de dados é ainda um problema atual.

OBSERVAÇÕES COSTEIRAS E OCEÂNICAS

O oceano participa de forma decisiva no equilíbrio climático. Devido à sua grande extensão espacial e à alta capacidade térmica da água, é indiscutível que o aumento do conteúdo de calor dos oceanos e o aumento do nível do mar são indicadores robustos de aquecimento do planeta. Recentemente, vários esforços têm sido despendidos na reavaliação de dados históricos e indicadores de mudanças, permitindo interpretações mais confiáveis por mais longos períodos de tempo. [GT1 3.1]

Os estudos analisados pelo IPCC-AR4 (2007), dentre outros mais recentes, também apontam para variações no conteúdo de calor e na elevação do nível do mar, em escala global. Variações nessas propriedades

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 9 09/09/13 15:34

promovem alterações nas características das diferentes massas de água, o que resultam em alterações nos padrões de circulação do oceano. Consequentemente, mudanças na circulação levam a alterações na forma como o calor e outras propriedades biológicas, físicas e químicas são redistribuídas na superfície da Terra.

A grande maioria dos estudos científicos realizados nos últimos 5 anos tem confirmado, de forma indiscutível, o aquecimento das águas oceânicas. A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Atlântico tem aumentado nas últimas décadas. [GT1 3.2.1; 3.3.1]

Há indicações que a salinidade do Oceano Atlântico tropical e equatorial está aumentando nas últimas décadas [GT1 3.4], principalmente nas camadas acima da termoclina. No Atlântico Sul, há também indicações de aumento da salinidade no giro subtropical, reforçando a tendência de que a região subtropical está se tornando mais quente e mais salina. [GT1 3.2.3] Já em altas latitudes, onde se formam as massas d'água que ocupam o fundo dos oceanos globais, nota-se uma diminuição de 0,1 a 0,5 de salinidade ao norte de 45°N, da superfície até o fundo. Há também evidências de redução da salinidade nos primeiros 500 m do Oceano Atlântico austral, enquanto que, em médias latitudes, observa-se um aumento da salinidade associada do lado norte da Corrente do Atlântico Sul, dentro do giro subtropical, e diminuição da salinidade ao sul da mesma. Uma vez que não é observada uma tendência significativa da descarga fluvial no Atlântico, tais mudanças ocorrem aparentemente devido às mudanças na componente Evaporação-Precipitação (E-P) sobre os oceanos e às alterações no processo de formação de águas de fundo em altas latitudes.

Nas camadas superiores do oceano, há evidências claras do aumento do conteúdo de calor. [GT1 3.3.1] Resultados recentes, baseados em um amplo conjunto de dados incluindo batitermógrafos descartáveis (XBT), flutuadores Argo e outros, no período 1993 – 2008, mostram que o conteúdo de calor na camada de 0 a 700 m do oceano global está aumentando a uma taxa média de $0{,}64 \pm 0{,}29$ W m^{-2} para todo o planeta. Esse aumento no armazenamento de calor em toda a profundidade coberta pelos flutuadores Argo é um indicativo de que o oceano está se aquecendo abaixo dos 700 m. Espera-se que fenômenos similares estejam ocorrendo no Atlântico Sul. De fato, as análises de dados obtidos por boias derivadoras parecem indicar que o Atlântico Sul apresenta uma tendência positiva na variação do conteúdo de calor oceânico nos últimos seis anos. Estudos baseados em dados de anomalias da elevação da superfície do mar obtidos por satélite e dados das boias fixas do Projeto PIRATA no Atlântico tropical, indicam igualmente uma tendência positiva na região da retroflexão da Corrente das Agulhas no período de 1993 a 2002. [GT1 3.3.1]

Há fortes indícios de que as características dos eventos de El Niño no Pacífico estão mudando nas últimas décadas. [GT1 3.6] Como consequência, tem havido uma mudança nos modos de variabilidade da TSM no Atlântico Sul. Essas alterações nos padrões de TSM favorecem precipitações abaixo da média ou na média sobre o Norte e Nordeste brasileiro, e mais chuvas no Sul e Sudeste do Brasil.

No Atlântico Sul, vários estudos nos últimos anos mostram que, em consequência à mudança nos padrões dos ventos, o transporte de águas do Oceano Índico para o Atlântico Sul, fenômeno conhecido como o "vazamento das Agulhas", vem aumentando nos últimos anos. [GT1 3.5.3] Essas alterações são observadas através de análises de dados obtidos por satélite, medidas *in situ* e de resultados de modelos.

O nível do mar está aumentando e variações de 20 a 30 cm esperadas para o final do século XXI já devem ser atingidas, em algumas localidades, até meados do século ou até antes disso. [GT1 3.7] Na costa do Brasil são poucos os estudos realizados com base em observações *in situ*. Mesmo assim, taxas de aumento do nível do mar já vêm sendo reportadas pela comunidade científica brasileira desde o final dos anos de 1980 e início dos anos de 1990. Estimativas encontradas na literatura para o Brasil são: Recife (1946-1987): 5,4 cm/déc (cm por década); Belém (1948-1987): 3,5 cm/déc; Cananeia-SP (1954-1990): 4,0 cm/déc; Santos-SP (1944-1989): 1,1 cm/déc. [GT1 3.7]

Em algumas áreas do litoral Sul e Sudeste, o aumento da frequência e intensidade de ciclones extratropicais pode levar a um aumento da recorrência de eventos extremos com ondas altas, ventos fortes e precipitações intensas. [GT1 3.7.3]

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 10 09/09/13 15:34

Ao longo da extensão da linha de costa brasileira são vários os trechos em erosão, distribuídos irregularmente e muitas vezes associados aos dinâmicos ambientes de desembocaduras. Reajustamentos das formas e dos sedimentos de praias em amplos trechos do litoral do Nordeste, causados pelo efeito das ondas sobre os arenitos de praia, bem como pelas mudanças no transporte litorâneo, implicará também em erosão e acumulação sedimentar localizada. [GT1 3.10]

Lacunas Científicas das Observações Costeiras e Oceânicas

A intensificação do processo erosivo observada em vários locais da costa brasileira na última década é decorrente de alterações dos padrões de ventos e de ondas que incidem sobre o litoral, bem como do aumento do nível médio do mar. Entretanto, não existe no Brasil um sistema de observação dessas variáveis que possibilite a obtenção de séries contínuas de dados de qualidade para a compreensão e quantificação dos fenômenos, e para a consequente proposição de medidas mitigadoras específicas.

A amplitude da linha de costa do Brasil, que atinge regiões tropicais e subtropicais, leva a uma variedade de feições fisiográficas onde se abrigam recifes de corais e manguezais, com diversidade de estruturas pouco monitoradas em escalas temporais. Essa diversidade de características, sob as quais se desenvolvem os recifes e manguezais, exige monitoramentos de médio e longo prazo, em pontos representativos ao longo da costa. No caso dos recifes de corais, apesar de indicadores privilegiados das mudanças climáticas, medições contínuas das alterações de diversidade e de mortalidade por estresse térmico ainda são muito limitadas no Brasil. Ao mesmo tempo, o fato de o manguezal ser um ecossistema extremamente adaptável às variações ambientais onde se insere, exige ainda mais tempo (décadas) de observações para diferenciar respostas consideradas normais em relação àquelas que estariam sendo manifestadas diante de novas condições ambientais.

INFORMAÇÕES PALEOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS

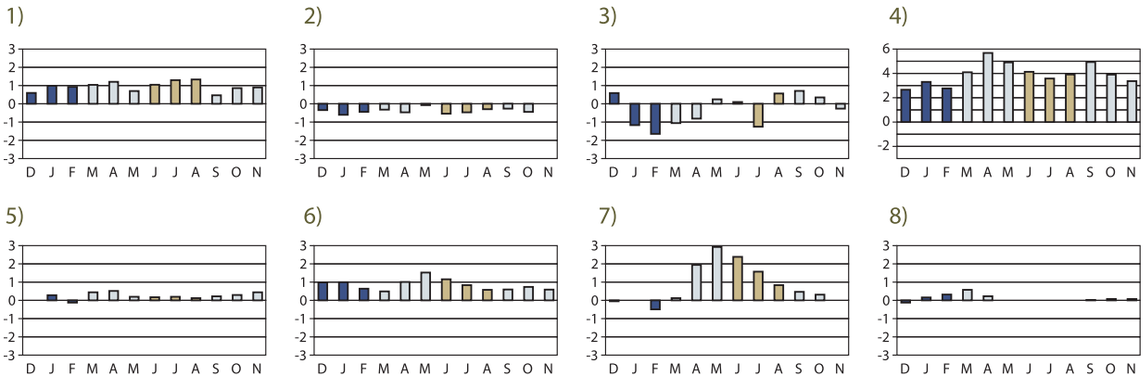
Os registros paleoclimáticos e paleoceanográficos disponíveis na literatura evidenciam fortes e abruptas oscilações no gradiente de temperatura entre as altas e médias latitudes do Atlântico Norte e a porção equatorial do mesmo oceano, que causaram variações abruptas de pluviosidade tanto no regime de chuva associado ao Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), quanto na área diretamente afetada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Na escala temporal milenar foram observadas fortes e abruptas oscilações no gradiente meridional de temperatura do Oceano Atlântico tropical, bem como na pluviosidade associada ao SMAS e à ZCIT. [GT1 4.2] As análises realizadas permitem afirmar que as mudanças na insolação recebida pela Terra em escala temporal orbital (i.e., dezenas de milhares de anos) foram a principal causa de modificações na precipitação e nos ecossistemas das regiões tropical e subtropical do Brasil, principalmente aquelas regiões sob influência do SMAS. Valores altos de insolação de verão para o Hemisfério Sul foram associados a períodos de fortalecimento do SMAS e vice-versa. [GT1 4.2.3]

As causas dessas mudanças climáticas abruptas (aquelas que se processam em grande escala geográfica) perduram tipicamente por várias centenas a poucos milhares de anos e ocorrem no intervalo de tempo de algumas décadas ou menos, causando rupturas substanciais nas sociedades humanas e sistemas naturais. [GT1 4.3.1] Estas parecem residir aparentemente em marcantes mudanças na intensidade da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC, do inglês *Atlantic Meridional Overtuning Circulation*). Períodos de enfraquecimento dessa célula foram associados a um aumento na precipitação das regiões tropicais e subtropicais do Brasil.

As informações paleoclimáticas a respeito do último milênio no Brasil são extremamente fragmentadas e esparsas. A Pequena Idade do Gelo (de aproximadamente 1400 a 1700 AD) foi caracterizada nas porções tropicais e subtropicais da América do Sul ao sul da linha do Equador por um aumento na precipitação, que provavelmente está associado a um fortalecimento do SMAS, possivelmente controlado pela diminuição da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Norte, e a uma desintensificação da AMOC. [GT1 4.8.1]

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 11 09/09/13 15:34

A Figura SEF.4 mostra uma seleção de reconstituições de precipitação para o Último Máximo Glacial (UMG) e diferenças de precipitação entre as simulações correspondentes ao UMG e aos dias atuais. [GT1 4.9.3] A maior parte dos registros paleoclimáticos selecionados mostra condições mais áridas (círculos laranja) no período. Algumas regiões, todavia, apresentam condições mais úmidas (círculos azuis). Os círculos com ambas as cores indicam diferenças nas interpretações dos dados de reconstituições paleoclimáticas. Para cada registro também é mostrado um histograma, o ciclo sazonal da precipitação simulada. Os valores foram normalizados por seu desvio-padrão. As melhores correspondências entre os dois conjuntos de dados sõa notadas nos pontos 11, 13, 14 e 15, indicando condições mais secas para o UMG em relação ao presente, e nos sítios 3, 4, 7 e 12 mostrando condições mais úmidas durante o UMG.



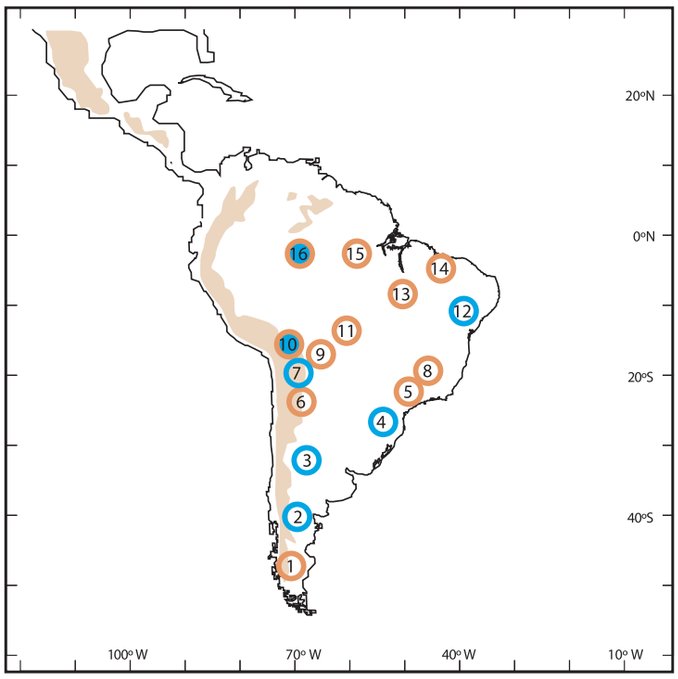
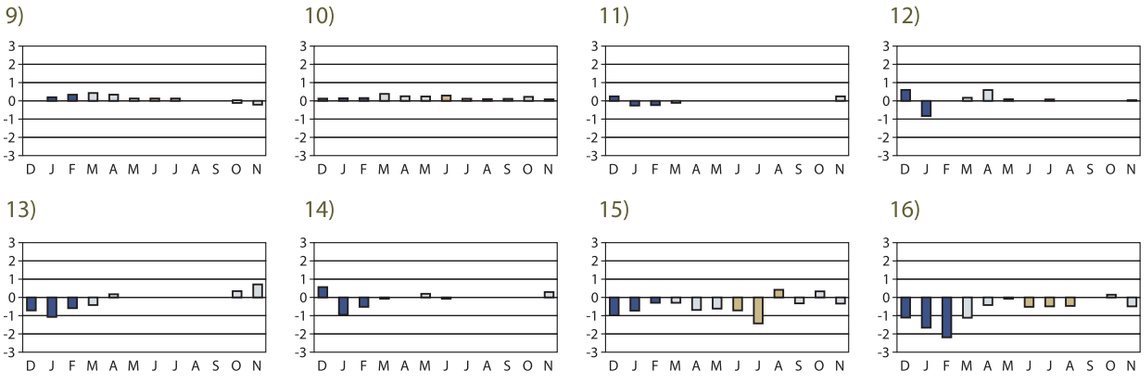


Figura SEF.4. Distribuição de reconstituições paleoclimáticas (círculo laranja: seco; círculo azul: úmido) e histogramas simulados de precipitação normalizados pelo desvio-padrão mostrando as anomalias entre o Último Máximo Glacial e o período atual. As barras em azul e em laranja dos histogramas denotam o verão e o inverno austral, respectivamente. [GT1 4.9.3]



MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 12 09/09/13 15:34

Lacunas Científicas das Informações Paleoclimáticas Brasileiras

O conhecimento a respeito das mudanças na paleocirculação da porção oeste do Atlântico Sul é ainda bastante restrito e fragmentado. Extensas regiões da margem continental leste da América do Sul não apresentam praticamente nenhum estudo com resolução temporal mínima e modelo de idades confiáveis. Adicionalmente, a ausência praticamente completa de estudos que abordem as mudanças abruptas da última glaciação e que tratem do último interglacial representa uma importante barreira no sentido de utilizar cenários pretéritos de circulação da porção oeste do Atlântico Sul como análogos para estudos de climas futuros.

Os estudos de indicadores do nível relativo do mar na plataforma continental são igualmente escassos. Isso deixa uma lacuna que precisa ser preenchida para que se possa entender quando e como o nível relativo do mar inundou a plataforma e se encaminhou para a Elevação Máxima do Holoceno (EMH), bem como períodos de rápida elevação do nível relativo do mar típicos da última deglaciação. Ressalta-se que existem também ocorrências de recifes que podem fornecer informações adicionais sobre o comportamento do nível relativo do mar. Estudos que tenham produzido curvas detalhadas do comportamento do nível relativo do mar na plataforma continental setentrional são inexistentes e precisam ser desenvolvidos. Ainda, a utilização de modelos climáticos, juntamente com os dados de campo, representa um avanço na abordagem das variações do nível relativo do mar que permitirá identificar e quantificar os fatores locais e regionais com maior eficácia.

Os mecanismos climáticos associados ao do último milênio no Brasil não estão consolidados e o número de registros paleoclimáticos e paleoceanográficos disponíveis em ambientes tropicais (e subtropicais) é particularmente reduzido. Para preencher as lacunas existentes e para melhorar nosso entendimento a respeito das variações climáticas naturais multidecenais e seculares, faz-se necessária a busca, coleta, análise e interpretação de novos registros paleoambientais.

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

No Brasil são esperadas mudanças profundas e variáveis no clima conforme a região do País. [GT1 5.1] É esperado que essas mudanças afetem os ecossistemas aquáticos e terrestres do Brasil. O País engloba seis biomas terrestres (Amazônia, Mata Atlântica, Pantanal, Caatinga, Cerrado e Pampas), que englobam alguns dos maiores rios do mundo, como o Amazonas, o Paraná e o São Francisco, e uma costa com cerca de 8.000km, contendo pelo menos sete grandes zonas estuarinas e toda a plataforma continental.

Em termos de estoque de carbono e nitrogênio abaixo do solo, observamos que os maiores estoques, até 1 metro de profundidade do solo, foram encontrados na Mata Atlântica, seguindo-se a Amazônia e o Cerrado. É importante salientar que há um decréscimo exponencial das concentrações de carbono e nitrogênio em relação à profundidade do solo.

Quanto aos estoques de carbono e nitrogênio acima do solo, em termos de ecossistemas, destacam-se a Mata Atlântica e, especialmente, a Amazônia como tendo os maiores estoques. Apenas na Amazônia e no Pantanal, os estoques de carbono e nitrogênio são mais elevados na biomassa acima do solo em relação aos estoques do solo; nos outros biomas, os maiores estoques se concentram efetivamente nos solos. Destacam-se as observações de que a Amazônia está absorvendo carbono da atmosfera a uma taxa de 0,11 a 0,50 $MgCha^{-1}Ano^{-1}$. Essa absorção de carbono é muito significativa e constata um importante serviço ambiental que a Floresta Amazonica está realizando ao remover o CO_2 da atmosfera em altas taxas. O Cerrado também está mostrando absorção CO_2 atmosférico a uma taxa de 0,1 a 0,3 $MgCha^{-1}Ano^{-1}$. Observa-se também a melhor quantificação do estoque de biomassa acima do solo para todos os biomas, em particular para a Amazônia, com estoques de carbono que variam de 95 a 250 $MgCha^{-1}$. Trabalho significativo também foi feito na contabilidade de carbono armazenado no solo para todos os biomas brasileiros, com destaque para os altos valores observados na Mata Atlântica com valores de 190 a 280 $MgCha^{-1}$. [GT1 5.4]

A transferência de nitrogênio é significativamente maior nos sistemas florestados da Amazônia e Mata Atlântica em relação aos sistemas herbáceo-arbustivos como o Cerrado e a Caatinga. A despeito das grandes

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 13 09/09/13 15:34

diferenças nos estoques de carbono do solo, as variações nos fluxos de CO_2 para a atmosfera (quando o carbono que foi fixado através do processo de fotossíntese retorna à atmosfera) não foram elevadas entre os biomas, principalmente se excluirmos a Amazônia, onde os fluxos de CO_2 foram claramente maiores. O fluxo de N_2O do solo para a atmosfera é também considerado uma perda de nitrogênio do sistema. Nesse caso, as diferenças são mais acentuadas entre os biomas, tendo a Amazônia os maiores fluxos, seguido da Mata Atlântica; enquanto fluxos muito baixos foram detectados no Cerrado. No caso da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), as maiores entradas estão associadas aos sistemas florestais da Amazônia e Mata Atlântica, seguidas do Cerrado e, finalmente, do Pantanal e da Caatinga com uma quantidade de nitrogênio fixada anualmente significativamente menor que os três biomas citados acima. Quanto à deposição atmosférica de nitrogênio, os valores foram semelhantes entre os biomas e, na maioria dos casos abaixo dos valores que entram via FBN e ligeiramente mais elevados em relação aos fluxos de N_2O para a atmosfera.

Os estoques de nitrogênio no solo e na biomassa foram quantificados para a maior parte dos biomas brasileiros, onde observamos a baixa quantidade de nitrogênio nos solos amazônicos (da ordem de 1 $MgNha^{-1}$), enquanto que na Mata Atlântica os estudos mostram estoques e de nitrogênio no solo da ordem de 14 a 20 $MgNha^{-1}$. Ainda não foi possível determinar os valores de fixação biológica de nitrogênio para todos os ecossistemas, onde se observa que para o Pantanal e a Caatinga os valores variam de 2,6 a 11 $KgN\ ha^{-1}ano^{-1}$.

A projecão mais crítica para a região Amazônica é a possível "savanização" da floresta (*Amazon dieback*) que acarretaria perdas significativas nos estoques de carbono tanto do solo como da vegetação. Nesse cenário, previsto pelo modelo HadCM3 do Hadley Center, a região leste da Amazônia poderia ser substituída por uma vegetação tipo savana. [GT1 5.5.1] No entanto, outros autores, utilizando uma compilação maior de modelos climáticos globais, se contrapõem à ocorrência da "savanização" da Floresta Amazônica, ao apresentar simulações que não reproduzem as condições ambientais e de resposta da floresta para que este processo seja estabelecido. Caso ocorra o processo de savanização em parte da Amazônia, tais mudanças se refletiriam não apenas no ciclo do carbono, como também no ciclo do nitrogênio e no clima regional.

A Mata Atlântica estoca quantidades apreciáveis de carbono e nitrogênio em seus solos, principalmente em maiores altitudes. Os aumentos previstos para a temperatura do ar na região Sudeste do Brasil levariam a um aumento nos processos de respiração e decomposição, gerando um aumento nas perdas de carbono e nitrogênio para a atmosfera.

Nos campos sulinos dos Pampas, similarmente à Mata Atlântica, os solos detêm um apreciável estoque de carbono. Portanto, aumentos na temperatura previstos para o futuro aumentariam as emissões de CO_2 para a atmosfera.

A produtividade primária do Cerrado pode potencialmente ser reduzida frente às mudanças climáticas projetadas para esse bioma. O aumento da temperatura provavelmente resultará em uma redução do processo fotossintético nas plantas do Cerrado, implicando em um possível decréscimo de sua biomassa. Adicionalmente, na estação seca, o Cerrado passa a ser uma fonte de carbono para a atmosfera, devido ao estresse hídrico. Portanto, um aumento na duração desse período implicaria também em uma redução na produtividade primária do Cerrado, bem como, pode potencialmente resultar em um aumento na vulnerabilidade ao fogo. Aumentando-se a ocorrência de eventos de fogo, resultaria em uma diminuição nos estoques de biomassa e nutrientes através de escoamento profundo, erosão, transporte de partículas e volatilização. [GT1 5.5.3]

As projeções mostram uma redução no valor total e aumento da variabilidade nos padrões de precipitação para o bioma Caatinga; além de um aumento no número de dias secos e aumento da temperatura do ar. Trata-se do bioma onde é esperada maior alteração no regime de precipitação, com uma significativa redução das chuvas, podendo resultar em profundas alterações no funcionamento deste ecossistema. As possíveis consequências dessas mudanças no clima são as ocorrências de secas mais intensas e frequentes. [GT1 5.5.4] Ressalta-se que esse ecossistema já sofre pronunciado estresse hídrico com baixas taxas de estoques de carbono, que poderão ser reduzidas com a intensificação das estiagens. [GT1 5.5.4]

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 14 09/09/13 15:34

Lacunas Científicas no conhecimento dos Ciclos Biogeoquímicos

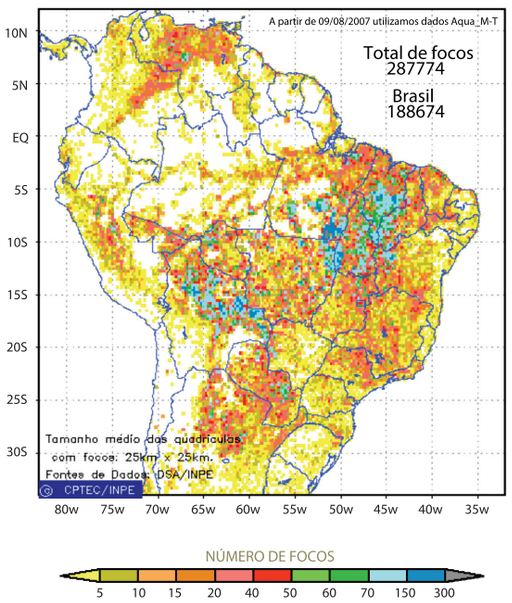
Faltam observações de curto e longo prazo dos processos que regulam os estoques e os fluxos que regulam o funcionamento dos ecossistemas brasileiros. Há uma carência crítica de informações para determinados biomas como os Pampas, o Pantanal e a Caatinga. Um volume maior de informações se encontra na Amazônia e, secundariamente, no Cerrado. Somente recentemente estudos têm sido desenvolvidos na Mata Atlântica, mas ainda concentrados em algumas poucas áreas.

Os estoques de carbono e de nitrogênio são muito sensíveis às mudanças climáticas e os mecanismos de estresse hídrico e de aumento de temperatura não são bem conhecidos para nenhum dos biomas brasileiros. Os possíveis mecanismos biológicos de compensação ainda precisam ser melhor estudados para todos os biomas brasileiros. Não há ainda informações suficientes sobre os impactos das mudanças climáticas sobre o funcionamento dos campos sulinos, ou Pampas, os quais guardam apreciáveis estoques de carbono em seus solos. As baixas temperaturas contribuem para o acúmulo de matéria orgânica no solo; portanto, um aumento nas temperaturas como previsto, levaria a um aumento nas taxas de decomposição, aumentando as emissões de CO_2 para a atmosfera. Da mesma forma que o observado para a Mata Atlântica, não é possível ainda prever se esse aumento nas emissões seria compensado por um aumento na produtividade primária líquida do sistema.

AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS E NUVENS

Foi observado através dos vários estudos realizados no Brasil, que partículas de aerossóis atmosféricos têm fortes efeitos no balanço de radiação atmosférico e nos mecanismos de formação e desenvolvimento de nuvens.

A maior parte dos estudos brasileiros sobre aerossóis atmosféricos e nuvens foi realizada na Amazônia, sobre o papel das emissões de queimadas de floresta no balanço radiativo e nos mecanismos de formação e desenvolvimento de nuvens. Foi observado que queimadas emitem enormes quantidades de particulado para a atmosfera como pode ser observado na figura SEF.5 abaixo, referente ao ano de 2010. À esquerda, é mostrado o número total de focos de queimadas e, à direita, a distribuição espacial da profundidade óptica de aerossóis (AOD, comprimento de onda = 550 nm), obtida pelo sensor MODIS. Observamos uma forte associação entre focos de queimadas e distribuição de aerossóis não só na Amazônia, mas em larga escala no território brasileiro. A espessura ótica de aerossóis observada é extremamente elevada e, nestes níveis, os aerossóis têm fortes efeitos sobre o desenvolvimento da precipitação e sobre as taxas fotossinteticas. [GT1 6.3.1]



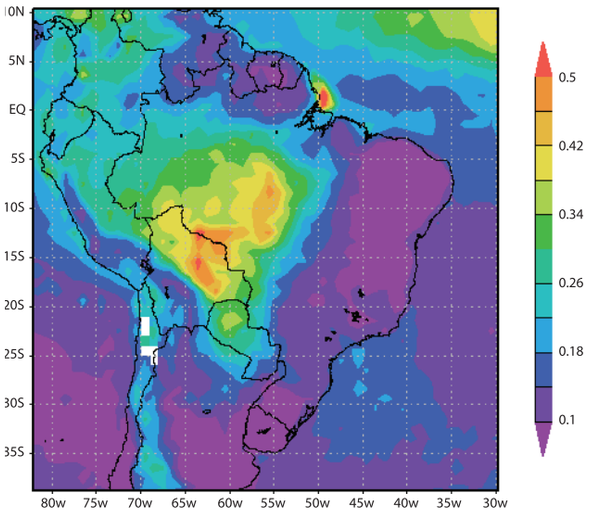


Figura SEF.5. Acima (esquerda), número de focos de queimada no ano de 2010. [GT1 6.3.1]

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 15 09/09/13 15:34

Diversos estudos foram realizados na Amazônia para quantificar fatores de emissão de partículas de aerossóis por queimadas, entretanto, ainda não existe formalmente um inventário nacional completo de emissões de partículas por queimadas, emissões industriais ou naturais.

Um destaque importante no caso brasileiro é a grande quantidade de estudos que foram realizados analisando o papel de aerossóis na formação e desenvolvimento de nuvens, tanto na região amazônica quanto em outras regiões. Esses trabalhos científicos permitiram analisar com cuidado o papel dos aerossóis na formação e desenvolvimento de nuvens. Mais difícil é quantificar o papel dos aerossóis na taxa de precipitação, pois essa questão está em aberto não só no Brasil, mas também no mundo. Foram observados resultados contraditórios na literatura (aumento ou diminuição da precipitação) devido ao aumento da quantidade de aerossóis de queimadas, que pode ser devido a diferentes condições termodinâmicas atmosféricas dos diferentes experimentos. Esse balanço entre efeitos termodinâmicos atmosféricos e o papel dos aerossóis continua em aberto na literatura científica nacional e internacional.

Há uma importante contribuição de emissões de material particulado em regiões urbanas, fruto principalmente de emissões veiculares. Ainda que não sejam majoritárias no conteúdo total de emissões, as partículas de aerossol das emissões urbanas exercem papel importante no clima urbano e na saúde pública das metrópoles brasileiras. [GT1 6.3.1] A Tabela ST.2 abaixo sintetiza as informações referentes a concentrações de aerossóis em algumas localidades brasileiras. Observamos que a Região Metropolitana de São Paulo apresenta altas concentrações de material particulado fino, acima do atual padrão de qualidade do ar para PM2.5, e também acima do padrão recomendado pela Organização Mundial da Saúde, de concentração média anual de 10 $\mu g/m^3$. Esse padrão da WMO também é excedido em várias regiões metropolitanas brasileiras.

Tabela STD.1. Concentração média, em $\mu g/m^3$, de material particulado inalável, fino e BC medidos em seis capitais brasileiras de 2007 a 2008, e em áreas sujeitas a queimadas com a contribuição relativa de BC no PM2.5. = partículas inaláveis finas de diâmetro inferior a 2,5 micrómetros (μm).

	PM10	PM2.5	BC	%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±3,3	31±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±55	7±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]

Majoritariamente, tanto nas regiões urbanas, como sob influência de queimadas, ocorre um acréscimo significativo na massa de particulado na moda fina. Aliado a isso, o particulado fino tem tempo de residência mais elevado, o que torna eficiente seu transporte a distâncias muito grandes da sua fonte. Em particular, no caso de queimadas, as plumas oriundas da queima de biomassa na Amazônia atingem porções significativas da América do Sul, tendo um grande efeito na forçante radiativa direta e indireta. [GT1 7] Além disso, como parte significativa do material particulado ocorre na forma de *Black Carbon*[1], quando em suspensão, essa

1 O *Black Carbon*, que em português tem diversos nomes (p.ex. "negro de fumo", ou "carbono negro"), é a fração do material particulado que tem a propriedade de ser forte absorvedor de radiação. Corresponde à chamada *fuligem*, e tipicamente é associada a processos de combustão como motores a combustão e queima de biomassa.

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 16 09/09/13 15:34

pluma tem a capacidade de aquecer os níveis médios da troposfera, gerando estabilidade atmosférica e inibição da convecção rasa.

Medidas realizadas na bacia amazônica durante o experimento LBA/SMOCC (*Smoke Aerosols, Clouds, Rainfall and Climate*) em 2002 [GT1 6.3.3] em região de pastagem em Rondônia cobriram um período com intensa atividade de queimadas (setembro), transição (outubro) e o início da estação chuvosa (novembro). Foi observado um aumento do número total de partículas de 450 na estação chuvosa para 5.260 na estação seca, devido às fortes emissões de queimadas em Rondônia. [GT1 6.3.3] Observa-se também que esse grande aumento no número de partículas ocorre principalmente a partir de 50 nm de diâmetro, uma faixa de tamanho na qual a partícula de aerossol já tem significativa capacidade de atuar como NCN. Observou-se um forte aumento na concentração de NCN na Amazônia como consequência das emissões de queimadas. A comparação entre dias poluídos e dias limpos mostra uma concentração de NCN pelo menos cinco vezes maior para os dias poluídos. Valores médios de concentrações menores que 200 cm^{-3} para as regiões limpas, e maiores que 1200 cm^{-3} para as regiões poluídas foram registrados. Por sua vez, estudos mostraram que partículas finas, faixa em que predominam os NCN, são predominantemente compostas de material orgânico secundário formado pela oxidação de precursores biogênicos, enquanto que partículas grossas, importantes nucleadores de gelo, consistem de material biológico emitido diretamente pela floresta. [GT1 6.3.3]

Vários estudos dos efeitos de aerossóis na formação e desenvolvimento de nuvens trabalharam com a hipótese de que se os efeitos indiretos (e também o semidireto) se manifestarem, em condições poluídas, como consequência da redução nos processos de colisão e coalescência ou aumento na estabilidade, deveria haver uma diminuição na precipitação estratiforme em comparação com condições mais limpas no mesmo ambiente. Comparando amostras sem chuva, com chuva e com chuva intensa (>5 mm h^{-3}), concluíram, porém, que as condições atmosféricas de maior escala são mais importantes para o desenvolvimento da precipitação do que a concentração de aerossóis. Os resultados de estudos de eletrificação na Amazônia sugerem que a ausência de distinção entre os parâmetros elétricos dos regimes poluído e limpo na bacia amazônica, coloca em dúvida o papel dos aerossóis na intensificação da eletrização de nuvens e reforça a ideia de um papel preponderante da dinâmica. [GT1 6.4]

No que tange especificamente sobre os aerossóis no Brasil e na América do Sul, utilizando modelagem regional (RegCM3 e BRAMS), têm evidenciado potenciais impactos dos aerossóis provenientes de queimadas sobre a circulação atmosférica de grande escala, com modificações no comportamento da monção da América do Sul devido ao aumento da estabilidade termodinâmica sobre o sul da Amazônia. Esses autores propõem que aumentos na estabilidade e pressão à superfície, bem como um escoamento divergente nessa região, podem levar ao reforço de atividade ciclônica e aumento da precipitação no Sudeste do Brasil, Paraguai e nordeste da Argentina.

Foi observado que o transporte de poeira do Saara tem impacto sobre a concentração de núcleos de gelo na Amazônia Central, contribuindo para a formação e desenvolvimento de nuvens convectivas na Amazônia. [GT1 6.2]

Lacunas na Questão de Aerossóis e Nuvens

De modo geral, é necessário aumentar nosso conhecimento sobre os processos de produção e transporte de aerossóis sobre o continente sul-americano, incluindo fontes naturais e antrópicas locais e remotas. Também é fundamental melhorar nosso entendimento na influência de aerossóis na formação de nuvens, ao servirem como núcleos de condensação (NCN) e de gelo (IN), incluindo o papel de sua variabilidade espacial e temporal. Nosso conhecimento também é limitado no que se refere às propriedades microfísicas das nuvens sobre o continente sul-americano, incluindo observações em nuvens quentes e de fase mista já realizadas sobre território brasileiro, e as possíveis implicações sobre as propriedades radiativas e sobre o ciclo hidrológico. A atribuição dos efeitos dos aerossóis e das alterações termodinâmicas da atmosfera nos mecanismos de

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 17 09/09/13 15:34

formação e desenvolvimento de nuvens é importante, bem como, à representação das mesmas em modelos numéricos de circulação geral e de área limitada. Em áreas urbanas, no Brasil, não há trabalhos que reportem medidas de concentração de número de nanopartículas. É importante que tal tipo de medida seja realizada para que seja possível estudar melhor os efeitos de partículas na saúde da população e a influência de nanopartículas de emissões urbanas na microfísica de nuvens.

FORÇANTE RADIATIVA NATURAL E ANTRÓPICA

É importante conhecer qual a contribuição quantitativa de cada agente climático para as variações de temperatura na superfície no Brasil. No entanto, os modelos climáticos mais modernos e sofisticados ainda precisam de muito desenvolvimento para que forneçam resultados consistentes para previsões de mudanças climáticas: ainda há grandes divergências entre previsões de temperatura, cobertura de nuvens, precipitação, etc. elaboradas com modelos diferentes, não só para o Brasil, mas para todo o planeta.

O conceito de forçante radiativa, definida no Painel SEP.1, é um passo intermediário que não necessita, em princípio, de modelos climáticos para seu cálculo, por isso, os valores de forçante radiativa podem ser mais objetivamente interpretáveis.

Painel SEP.1 – Definição de forçante radiativa

A forçante radiativa devido a um agente climático é definida como a diferença em irradiância líquida na tropopausa, entre um estado de referência e um estado perturbado devido ao agente climático. As temperaturas de superfície e da troposfera são mantidas fixas, mas permite-se que a estratosfera atinja o equilíbrio radiativo. O estado de referência pode ser a ausência do agente climático, ou seu impacto em uma dada situação ou época, como, por exemplo, no início da Revolução Industrial (aproximadamente 1750) adotado pelo IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Forster *et al.*, 2007).

Os efeitos climáticos mais significativos em escalas de dezenas a centenas de anos, no Brasil, são os efeitos radiativos de nuvens, a forçante radiativa dos gases de efeito estufa, a forçante de mudança de uso do solo, e a dos aerossóis (fumaça) emitidos em queimadas por fontes antrópicas. A Tabela SET.2, apresenta uma compilação de resultados, encontrados na literatura científica, sobre os principais efeitos radiativos de agentes climáticos no Brasil.

Os resultados compilados mostram que as nuvens constituem o agente climático mais importante do ponto de vista de balanço de radiação sobre a Amazônia, reduzindo em até 110 Wm^{-2} o fluxo radiativo na superfície, e contribuindo com uma forçante radiativa de cerca de -9.8 Wm^{-2} no topo da atmosfera. Isso significa que as nuvens na Amazônia nas condições atuais estão tendo um forte papel de resfriamento do sistema climático.

Vários estudos quantificaram essa forçante de aerossóis antrópicos, sobretudo na Amazônia. Uma média ponderada de alguns dos resultados compilados neste capítulo resultou em uma forçante radiativa média de $-8{,}0 \pm 0{,}5$ Wm^{-2}, indicando que, em média, a fumaça emitida em queimadas contribui para resfriar o planeta, contrapondo-se parcialmente ao aquecimento causado por gases de efeito estufa antrópicos. É muito importante, no entanto, ressaltar que aerossóis e gases de efeito estufa têm escalas de tempo e espaço muito diferentes. Enquanto partículas de aerossóis tem vida média na baixa atmosfera de alguns dias a semanas, os gases de efeito estufa podem ter meia vida de dezenas a milhares de anos.

A Tabela SET.2 coloca uma compilação de resultados de determinações de forçante radiativa em várias

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 18 09/09/13 15:34

regiões brasileiras, para diversas condições. Observamos a forte alteração no balanço de radiação observado ou modelado, com valores médios diários de resfriamento na superfície de até -110 watts por m^2, enquanto que, no topo da atmosfera, valores de -10 a -20 w/m^2 foram reportados. A coluna atmosférica, por causa do efeito do *black carbon* emitido em queimadas, pode apresentar valores de aquecimento de +30 a +40 w/m^2. Esse forte aquecimento em geral no topo da camada limite planetária altera o perfil vertical normal de temperatura, inibindo a convecção, processo crítico para a formação e desenvolvimento de nuvens.

Tabela SET.2 Quantificação da forçante radiativa do aerossol antrópico, da mudança no uso do solo e do efeito radiativo de nuvens sobre o Brasil e a América do Sul.

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 Solo	Amazônia	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 tropical	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 Sul	TDA, 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 Sul	TDA, 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 tropical	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 a posição vertical na coluna atmosférica (TDA: topo da atmosfera; SUP: superfície; ATM: coluna atmosférica) para a estimativa em questão, o domínio temporal de cálculo (valor instantâneo, média de 24h ou média anual), e o componente do efeito indireto analisado (alb: albedo; ind: total dos efeitos indiretos); b) Valores entre colchetes indicam intervalos de mínimo e máximo apresentados nas referências. Quando disponíveis, as incertezas apresentadas pelos autores são indicadas; c) Domínio temporal presumido (não informado explicitamente na referência); d) Estado de referência com profundidade óptica de aerossóis de 0,11; e) Estado de referência com profundidade óptica de aerossóis de 0,06.

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 19 09/09/13 15:34

O uso do solo nas várias regiões brasileiras altera o albedo de superfície, causando uma forçante radiativa pela alteração da refletividade da superfície comparada com a superfície natural. A análise de alteração do albedo, devido ao desmatamento na Amazônia, é estimada em -7,3±0,9 Wm^{-2}, valor alto se comparado com o aquecimento dos gases de efeito estufa (aprox. 2 Wm^{-2}), mostrando que ao trocar uma área de floresta por áreas de pastagens ou cultivo agrícola, temos uma forte alteração no balanço radiativo atmosférico. Note-se que esse valor é semelhante à forçante de aerossóis antrópicos, porém, é importante salientar que o desmatamento na Amazônia tem caráter virtualmente "permanente" (*i.e.* a maioria das áreas degradadas em geral não volta a ser recomposta como floresta primária), enquanto aerossóis de queimada têm vida média da ordem de dias.

Lacunas identificadas no tópico de forçante radiativa natural e antrópica

A maior parte dos trabalhos regionais realizados no Brasil foi focada na região Amazônica. Estudos nos demais biomas brasileiros são necessários para um entendimento das complexas interações entre o balanço de radiação atmosférico e o aumento da concentração de gases de efeito estufa e aerossóis, bem como, o efeito da mudança no albedo de superfície. Estudos de modelagem em larga escala também precisam ser realizados, com modelos químicos dinâmicos acoplados a códigos de transferência radiativa para estudos em larga escala.

AVALIAÇÃO DE MODELOS GLOBAIS E REGIONAIS CLIMÁTICOS

A modelagem climática global e regional tem tido grandes avanços nos últimos anos, em termos da representação de processos e fenômenos críticos para estudo das mudanças do clima. O Brasil tem se destacado nessa área, pelo desenvolvimento de modelos atmosféricos regionais e globais, atmosféricos e acoplados oceano-atmosfera.

Os padrões de variabilidade sazonal a interanual do ENOS (El Nino/Oscilacao Sul) são bem simulados pelo Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) do CPTEC/INPE. Nesse caso, o modelo reproduz o padrão observado de anomalias de precipitação sobre a América do Sul associado ao ENOS, com excesso de precipitação no Sul do Brasil e déficit no Nordeste, sendo que a taxa de sucesso dos resultados depende do tipo de ENOS. [GT1 3.6.3] Quando o sinal de ENOS é forte, ou seja, quando as anomalias de TSM são intensas no Oceano Pacífico Equatorial, as anomalias de precipitação simuladas sobre a Região Sul do Brasil correspondem mais fielmente às observações. [GT1 8.4.1]

O deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) observado sobre o Oceano Atlântico é, em geral, bem reproduzido pelos modelos brasileiros, havendo, todavia, uma deficiência na correta representação da sua migração sazonal. Os mais recentes avanços implementados no Modelo Brasileiro do Sistema Climático (BESM-Brazilian Environmental Modeling System), entretanto, resultaram numa melhora substantiva na representação da convecção atmosférica e da precipitação sobre a Amazônia e Atlântico tropical, com notável impacto na reprodução da migração sazonal da ZCIT. [GT1 8.4.2] O padrão da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um dos principais componentes do SMAS, é também bem representado numericamente na escala de tempo interanual e intrassazonal. [GT1 8.4.2] As características atmosféricas associadas à ZCAS, em casos extremos de precipitação no Sudeste, obtidas em análises observacionais, são igualmente reproduzidas nas análises de casos extremos, realizadas a partir de resultados numéricos. [GT1 8.4.4]

De forma geral, verifica-se que o clima presente em regiões como o Nordeste, a Amazônia, o Sul do Brasil, o noroeste do Peru-Equador e o sul do Chile é mais bem reproduzido, se comparado com regiões como o Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Supondo que a capacidade para simular o clima no futuro seja a mesma que no presente, então podemos dar maior credibilidade às projeções de clima para o futuro nas áreas de menores erros. [GT1 8.6]

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 20 09/09/13 15:34

Incertezas nas Simulações dos Modelos Globais e Regionais Climáticos

A incerteza nas formulações dos modelos numéricos para resolver o sistema climático se reflete na magnitude dos erros sistemáticos das simulações. Esta avaliação dos erros, por sua vez, também contém as incertezas oriundas da qualidade das observações, cuja rede sobre a América do Sul é deficiente do ponto de vista espacial e temporal. As incertezas sobre as medidas observacionais afetam diretamente a robustez da avaliação dos modelos climáticos.

Em termos específicos, o conhecimento da eficiência dos modelos climáticos globais e regionais em reproduzir corretamente o padrão sazonal de precipitação e os vários sistemas importantes para o clima da América do Sul e do Brasil, tais como ZCAS, ZCIT, entre outros, depende da expansão e da manutenção de sistemas observacionais que permitam a obtenção de séries contínuas de dados meteorológicos e climatológicos de qualidade.

MUDANÇAS AMBIENTAIS DE CURTO E LONGO PRAZO: PROJEÇÕES, REVERSIBILIDADE E ATRIBUIÇÃO

Os resultados das projeções regionalizadas de clima nos diferentes biomas do Brasil, considerando os períodos de início (2011-2040), meados (2041-2070) e final (2071/2100) do século XXI, são resumidos na Figura SEF.6. [GT1 9] As mudanças percentuais na chuva e temperatura (°C) são relativas aos valores do clima atual (final do século XX). A Figura SEF.6 mostra projeções de mudanças na chuva e temperatura para os períodos de verão (Dezembro a Fevereiro – DJF) e inverno (Junho a Agosto – JJA). Dependendo do cenário futuro de aquecimento global, com baixa ou alta emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), tais valores podem respectivamente oscilar entre ~5% e ~20% em precipitação e ~1°C e ~5°C na temperatura. As projeções indicam diminuição significativa das chuvas em grande parte do Centro-Norte-Nordeste do território brasileiro. [GT1 9] Os cenários climáticos futuros sugerem aumento dos eventos extremos de secas e estiagens prolongadas, principalmente nos biomas da Amazônia, Cerrado e Caatinga, sendo que tais mudanças acentuam-se a partir da metade e final do século XXI. No que se refere à temperatura do ar na superfície, todas as projeções indicam condições de clima futuro mais quente. [GT1 9]

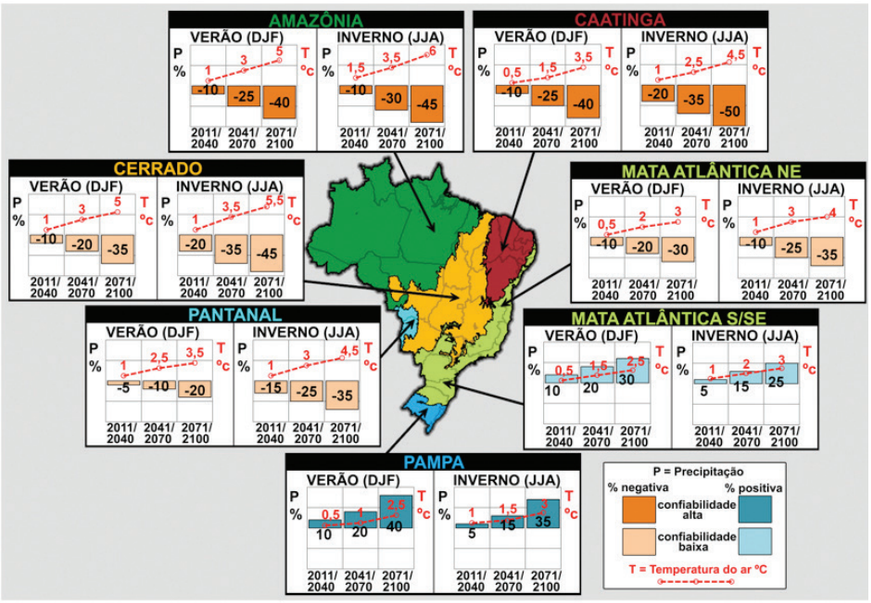


Figura SEF. 6. Projeções regionalizadas de clima nos biomas brasileiros da Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pantanal, Mata Atlântica (setores Nordeste e Sul/Sudeste) e Pampa para os períodos de início (2011-2040), meados (2041-2070) e final (2071/2100) do século XXI, baseadas nos resultados científicos de modelagem climática global e regional. As regiões com diferentes cores no mapa indicam o domínio geográfico dos biomas. A legenda encontra-se no canto inferior direito. [GT1 9]

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 21 09/09/13 15:34

Em geral, as projeções climáticas possuem desempenho (skill) relativamente melhor nos setores Norte/Nordeste (Amazônia e Caatinga) e Sul (Pampa) do Brasil, e desempenho inferior no Centro-Oeste e Sudeste (Cerrado, Pantanal e Mata Atlântica). Conforme ilustra a Figura SEF.6, **as projeções para os biomas brasileiros**, baseadas nos resultados científicos de modelagem climática global e regional, são as seguintes:

AMAZÔNIA: Reduções percentuais de 10% na distribuição de chuva e aumento de temperatura de 1° a 1,5°C até 2040, mantendo a tendência de diminuição de 25% a 30% nas chuvas e aumento de temperatura entre 3° e 3,5°C no período 2041-2070, e redução nas chuvas de 40% a 45% e aumento de 5° a 6° C na temperatura no final do século (2071-2100). Enquanto as modificações do clima, associadas às mudanças globais, podem comprometer o bioma em longo prazo (final do século), a questão atual do desmatamento, decorrente das intensas atividades de uso da terra, representa uma ameaça mais imediata para a Amazônia. Estudos observacionais e de modelagem numérica sugerem que caso o desmatamento alcance 40% na região no futuro, estima-se mudança drástica no padrão do ciclo hidrológico com redução de 40% na chuva durante os meses de Julho a Novembro, prolongando a duração da estação seca, além do aquecimento superficial em até 4°C. Assim, as mudanças regionais decorrentes do efeito do desmatamento somam-se àquelas provenientes das mudanças globais, constituindo condições propícias à savanização da Amazônia, um problema que tende a ser mais crítico na região oriental.

CAATINGA: Aumento de 0,5° a 1°C da temperatura do ar e decréscimo entre 10% e 20% da precipitação durante as próximas três décadas (até 2040), com aumento gradual de temperatura de 1,5° a 2,5°C e diminuição entre 25% e 35% nos padrões de chuva no período de 2041-2070. No final do século (2071-2100) as projeções indicam condições significativamente mais quentes (aumento de temperatura entre 3,5° e 4,5°C) e agravamento do déficit hídrico regional com diminuição de praticamente metade (40 a 50%) da distribuição de chuva. Essas mudanças podem desencadear o processo de desertificação da caatinga.

CERRADO: Aumento de 1°C na temperatura superficial com diminuição percentual entre 10% a 20% da chuva durante as próximas três décadas (até 2040). Em meados do século (2041-2070) estima-se aumento entre 3° a 3,5°C da temperatura do ar e redução entre 20% e 35% da chuva. No final do século (2071-2100) o aumento de temperatura atinge valores entre 5° e 5,5°C e a diminuição da chuva é mais crítica, entre 35% e 45%. Acentuação das variações sazonais.

PANTANAL: Aumento de 1°C na temperatura e diminuição entre 5% e 15% nos padrões de chuva até 2040, mantendo a tendência de redução das chuvas para valores entre 10% e 25% e aumento de 2,5° a 3°C da temperatura em meados do século (2041-2070). No final do século (2071-2100) predominam condições de aquecimento intenso (entre 3,5° e 4,5°C) com diminuição acentuada dos padrões de chuva de 35% a 45%.

MATA ATLÂNTICA: Como este bioma abrange áreas desde o Sul, Sudeste até o Nordeste brasileiro, as projeções apontam dois regimes distintos. ***Porção Nordeste*** *(NE)*: aumento relativamente baixo nas temperaturas entre 0,5° e 1°C e decréscimo nos níveis de precipitação em torno de 10% até 2040, mantendo a tendência de aquecimento entre 2° e 3°C e diminuição pluviométrica entre 20% e 25% em meados do século (2041-2070). Para o final do século (2071-2100) estimam-se condições de aquecimento intenso (aumento de 3° a 4°C) e diminuição de 30% e 35% das chuvas. ***Porção Sul/Sudeste*** *(S/SE)*: até 2040 as projeções indicam aumento relativamente baixo de temperatura entre 0,5° e 1°C com um aumento de 5% a 10% das chuvas. Em meados do século (2041-2070) mantêm-se as tendências de aumento gradual de 1,5° a 2°C na temperatura e de aumento de 15% a 20% das chuvas, sendo que essas tendências acentuam-se ainda mais no final do século (2071-2100) com padrões de clima entre 2,5° e 3°C mais quente e entre 25% a 30% mais chuvoso.

PAMPA: No período até 2040 prevalecem condições de clima regional de 5% a 10% mais chuvoso e até 1°C mais quente, mantendo a tendência de aquecimento entre 1° e 1,5°C e intensificação das chuvas entre 15% e 20% até meados do século (2041-2070). No final do século (2071-2100) as projeções são mais agravantes com aumento de temperatura de 2,5° a 3°C e 35% a 40% de chuvas acima do normal.

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 22 09/09/13 15:34

Incertezas

As incertezas científicas nas projecões das mudanças do clima são inerentes ao sistema climático, resultado, em primeira instância, das interações nãolineares e complexidades intrínsecas próprias aos fenômenos naturais. Dessa forma, múltiplas abordagens envolvendo modelagem e observações são necessárias para minimizar as incertezas, e devem ser empregadas em conjunto.

Embora na última década tenha havido melhorias substanciais na ciência do sistema terrestre (com formulações mais completas dos processos físicos, químicos e biológicos, incluindo suas complexas interações, dentro dos modelos do sistema climático global), aliado ao significativo avanço tecnológico em simulação computacional, as projeções climáticas e ambientais geradas pela modelagem climática trazem consigo diversos níveis de incertezas, cujas categorias principais são: **Incerteza sobre os cenários de emissões:** as emissões globais de GEE são difíceis de prever, em virtude da complexidade de fatores socioeconômicos, como demografia, composição das fontes de geração de energia, atividades de uso da terra e do próprio curso de desenvolvimento humano em termos globais; **Incerteza sobre a variabilidade natural do sistema climático:** os processos físicos e químicos da atmosfera global são de natureza caótica, de forma que o clima pode ser sensível às mudanças mínimas (variações nãolineares) que são difíceis de serem mensuradas, tanto nos dados observacionais como nos resultados dos modelos; **Incertezas dos modelos:** a capacidade de modelar o sistema climático global é um grande desafio para a comunidade científica, sendo fatores limitantes a representação ainda incompleta de processos como o balanço de carbono global e regional, o papel dos aerossóis no balanço de energia global, a representação dos ciclos biogeoquímicos e fatores antrópicos como desmatamento e queimadas (as nuvens também são importantes fontes de incerteza nos modelos climáticos [GT1 6]). Por outro lado, ainda que sejam usados os mesmos cenários de emissões, diferentes modelos produzem diferentes projeções das mudanças climáticas, constituindo assim outra fonte de incerteza, a qual pode ser minimizada através da aplicação de conjuntos de simulações (*ensembles*) de modelos globais e regionais. [GT1 8]

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 23 09/09/13 15:34

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 24 09/09/13 15:34

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A1_Revisado.indd 26 09/09/13 15:34

pbmc

Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

MCTI_PBMC_Sumario Executivo A4_Revisado.indd 28 09/09/13 15:34