

# Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil

ANÁLISE CONJUNTA BRASIL-REINO UNIDO SOBRE OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA





Maio 2011

# Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil

ANÁLISE CONJUNTA BRASIL-REINO UNIDO SOBRE OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA

Projeto colaborativo realizado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido

## RISCOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

ANÁLISE CONJUNTA BRASIL-REINO UNIDO SOBRE OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA



[www.inpe.br](http://www.inpe.br)  
[www.ccst.inpe.br](http://www.ccst.inpe.br)

### AUTORES . BRASIL

**Jose A. Marengo** ( Coordenador )  
Ph.D, CCST-INPE, São Paulo, Brasil  
[jose.marengo@inpe.br](mailto:jose.marengo@inpe.br)

**Carlos A. Nobre**  
Ph.D, CCST-INPE, CEPED-MCT, São Paulo, Brasil  
[carlos.nobre@inpe.br](mailto:carlos.nobre@inpe.br)

**Sin Chan Chou**  
Ph.D, CPTEC-INPE, São Paulo, Brasil  
[chou.sinchan@cpotec.inpe.br](mailto:chou.sinchan@cpotec.inpe.br)

**Javier Tomasella**  
Ph.D, CCST-INPE, São Paulo, Brasil  
[javier.tomasella@inpe.br](mailto:javier.tomasella@inpe.br)

**Gilvan Sampaio**  
Ph.D, CCST-INPE, São Paulo, Brasil  
[gilvan.sampaio@inpe.br](mailto:gilvan.sampaio@inpe.br)

**Lincoln M. Alves**  
M.S, CCST-INPE, São Paulo, Brasil  
[lincoln.alves@inpe.br](mailto:lincoln.alves@inpe.br)

**Guillermo O. Obregón**  
Ph.D, CCST-INPE, São Paulo, Brasil  
[guillermo.obregon@inpe.br](mailto:guillermo.obregon@inpe.br)

**Wagner R. Soares**  
Ph.D, CCST-INPE, São Paulo, Brasil  
[wagner.soares@cpotec.inpe.br](mailto:wagner.soares@cpotec.inpe.br)



[www.metoffice.gov.uk](http://www.metoffice.gov.uk)

### AUTORES . REINO UNIDO

**Richard Betts** ( Coordenador )  
Ph.D, Met Office Hadley Centre  
[richard.betts@metoffice.gov.uk](mailto:richard.betts@metoffice.gov.uk)

**Gillian Kay**  
Ph.D, Met Office Hadley Centre  
[gillian.kay@metoffice.gov.uk](mailto:gillian.kay@metoffice.gov.uk)



### CAPA

Ana Cíntia Guazzelli (WWF)



# Índice

<b>07</b>	<b>Prefácio</b> John Hirst, UK Met Office	
<b>08</b>	<b>Prefácio</b> Gilberto Câmara, INPE	
<b>09</b>	<b>Prefácio</b> Carlos A. Nobre, SEPED MCT	
<b>10</b>	<b>Apresentação</b>	
<b>12</b>	<b>Parte 1   Sumário Executivo</b>	
	1. Introdução.....	<b>17</b>
	2. Variabilidade e tendências climáticas.....	<b>19</b>
	3. Eventos extremos sazonais: secas de 2005 e 2010 e enchentes de 2009.....	<b>21</b>
	4. Mudanças climáticas globais e regionais.....	<b>25</b>
<b>31</b>	<b>Parte 2   Nova ciência e desenvolvimento científico</b>	
	1. Como modelamos o clima.....	<b>33</b>
	2. Clima future e avaliação das incertezas sobre as mudanças climáticas na Amazônia.....	<b>39</b>
	3. Desmatamento, mudança no uso da terra e clima.....	<b>43</b>
	4. Resumo e conclusões.....	<b>48</b>
<b>67</b>	<b>Referências bibliográficas</b>	





# Prefácio

Foto: Laura Borma / INPE

Quando visitou o Reino Unido em março de 2006, o presidente Lula firmou um acordo de trabalho conjunto entre Reino Unido e Brasil sobre questões relativas às mudanças climáticas. Atualmente os dois países ainda continuam trabalhando juntos, com o mesmo senso de urgência que a visita do presidente inspirou, para avaliar os impactos das mudanças climáticas e os efeitos do desmatamento sobre o clima do Brasil. Este relatório destaca o que se conseguiu até agora por meio da cooperação e da engenhosidade do INPE e o Met Office Hadley Centre (MOHC).

A ocorrência de mudanças climáticas globais é inquestionável, mas o que é de fundamental importância para as nações, as comunidades e a população em geral é como o clima pode ser afetado em cada parte do mundo. Neste projeto, o INPE e o MOHC combinaram seus conhecimentos especializados sobre modelagem climática e o clima do Brasil para procurar entender melhor quais serão as condições climáticas no futuro. Os resultados mostram que pode haver aumento substancial da temperatura e queda significativa da precipitação pluvial em grandes áreas do Brasil, inclusive na Amazônia. Entre outros possíveis impactos, há o potencial de exercer pressão sobre a floresta tropical. A ameaça das mudanças climáticas não pode ser subestimada, mas a preocupação mais imediata é o desmatamento da Amazônia.

As florestas do mundo armazenam enormes quantidades de carbono, que é liberado para a atmosfera quando elas são derrubadas e queimadas, o que acelera as mudanças climáticas. O desmatamento é a terceira maior causa de emissão de gases de efeito estufa, ficando atrás somente da produção de energia e da indústria e à frente do setor de transportes. No entanto, a Floresta Amazônica vale muito mais do que todo o seu carbono. Precisamos valorizar as florestas existentes no mundo por todos os serviços que elas nos proporcionam. Parte essencial desse processo consiste em compreender plenamente o papel das florestas dentro do sistema climático, o que representa um importante desafio do ponto de vista científico.

Para lidar com essa questão, o INPE e o MOHC estão estudando os efeitos que a perda da Floresta Amazônica causaria sobre a temperatura e as chuvas da região. Os resultados dos modelos sugerem que o desmatamento pode causar elevação das temperaturas na Amazônia, ao passo que a precipitação pluviométrica pode diminuir, tornando a região mais seca do que atualmente. É importante ressaltar que a interação de um clima alterado com uma floresta fragmentada e enfraquecida intensificaria esses impactos.

A colaboração entre o INPE e o MOHC é fundamental para aumentar o conhecimento sobre os efeitos das mudanças climáticas e do desmatamento no Brasil e sobre como eles podem afetar os ecossistemas dos quais todos dependemos. Usando este projeto com base, continuaremos a trabalhar juntos para ajudar a ciência moderna a atingir esses objetivos. Com uma pesquisa conjunta como esta, podemos aceitar desafios científicos e fazer novas descobertas para auxiliar a tomada de decisões agora e no futuro.

**John Hirst**

*Diretor Executivo  
UK Met Office*






Foto: Laura Borma / INPE

O projeto de colaboração entre Reino Unido e Brasil sobre mudanças climáticas na Amazônia é um excelente exemplo da importância da cooperação internacional na ciência do século 21. Lançado em 2006, através de esforços conjuntos do Hadley Centre e INPE, o projeto tem produzido resultados significativos. Os estudos científicos gerados indicam que a floresta Amazônica é sensível às forças provenientes das mudanças climáticas. O aumento na temperatura e decréscimo das chuvas pode ser maior na Amazônia do que a variação global média esperada.

Os estudos mostram a importância da Amazônia para o clima global e como uma provedora de serviços ambientais para o Brasil. Eles fornecem evidências sobre um ponto de inflexão no ecossistema da floresta, a partir do qual poderá haver um colapso parcial desse ecossistema. O INPE agradece aos coordenadores (Jose Marengo e Carlos Nobre, do Brasil, e Richard Betts, do Reino Unido) que lideraram uma dedicada equipe de cientistas do Reino Unido e Brasil.

Desde o início do projeto em 2006, o desmatamento na Amazônia mudou. Através de um melhor monitoramento, rigorosas ações legais e práticas de mercado responsáveis, o desmatamento na Amazônia diminuiu de 27.000 km<sup>2</sup> em 2004 para 6.500 km<sup>2</sup> em 2010. Na conferência climática de Copenhague em 2009, o governo brasileiro fez uma promessa incondicional para conter o desmatamento na Amazônia em 80% em 2020, comparado a 2005. Dados recentes divulgados pelo INPE mostram que o Brasil está mantendo seus compromissos.

Ao reduzir o desmatamento na Amazônia, o Brasil tem evitado uma ameaça imediata. Como mostrado pelos resultados do projeto, se o ritmo do desmatamento tivesse continuado na tendência dos anos 2000, um colapso em médio prazo poderia suceder-se. No entanto, a Amazônia enfrenta uma ameaça que o Brasil sozinho não pode evitar. Se as nações desenvolvidas não assumirem suas responsabilidades históricas e reduzirem suas emissões per - capita de gases de efeito estufa, os ecossistemas amazônicos podem se colapsar. Portanto, o relatório traz uma importante mensagem e provê evidências adicionais de que nós devemos agir para deter as mudanças climáticas.

**Gilberto Câmara**

*Diretor Geral*

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

O projeto sobre Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil (DCC, na sigla em inglês) representa um exemplo muito valioso da colaboração entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido. Neste projeto, pudemos gerar conhecimento para fazer sofisticadas projeções, a fim de despertar a consciência dos principais interessados (cientistas pesquisadores e formuladores de políticas) com relação aos impactos das mudanças climáticas no Brasil. O objetivo é fornecer aos formuladores de políticas evidências científicas das mudanças climáticas e de seus possíveis impactos no Brasil, na América do Sul e em qualquer outro lugar do mundo.

A experiência do MOHC do Reino Unido, líder mundial em modelagem climática, aliada à experiência do INPE em estudos sobre mudanças climáticas na América do Sul, possibilitou a identificação de possíveis cenários e impactos, com projeções inovadoras dos efeitos das mudanças climáticas antrópicas na América do Sul. Os primeiros resultados indicam a possibilidade de aumento significativo das condições de seca em partes do Brasil. Com base nos novos conhecimentos gerados por este projeto, o INPE está procurando melhorar os cenários de mudanças climáticas na região da América do Sul para aplicação em estudos de vulnerabilidade e de adaptação.

Este projeto fez três contribuições fundamentais para apoiar o envolvimento do Brasil nas negociações internacionais sobre o tema das mudanças climáticas e para dar respaldo às pesquisas do INPE:

-Geração de conhecimento dentro do Brasil para a realização de avaliações das mudanças climáticas para a elaboração de políticas.

-Geração de informações específicas importantes para a elaboração de políticas relativas a questões de adaptação às mudanças climáticas e avaliação dos riscos dessas mudanças no Brasil para a 2ª Comunicação Nacional sobre Mudanças Climáticas, bem como para negociações e convenções internacionais.

-Aumento da colaboração científica na avaliação dos impactos das mudanças climáticas em setores-chave da sociedade e da economia.

Embora as projeções de mudanças climáticas geradas por esta colaboração abrangessem o Brasil todo, o foco deste relatório foi a Amazônia, região de interesse nacional, regional e global.

Como legado, este projeto gerou novos métodos para avaliação dos impactos das mudanças climáticas e dos impactos humanos diretos sobre a paisagem e a ecologia do Brasil, além de produzir um novo conjunto de dados de cobertura da terra para uso na modelagem climática regional. Este trabalho terá continuidade como parte do programa científico do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-Mudanças Climáticas) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas (Rede-CLIMA). Por fim, mas não menos importante, o projeto ajudou a fortalecer os laços científicos e culturais entre o Reino Unido e o Brasil.

**Carlos A. Nobre**

*Secretário de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Ministério de Ciência e Tecnologia do Brasil, MCT, Brasília, Brasil*





Foto: Laura Borma / INPE

# Apresentação

**Segundo o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR4 2007), é bem provável que a elevação da temperatura média global verificada nos últimos 50 anos tenha sido causada principalmente pelo aumento antrópico das concentrações de gases de efeito estufa.** Essas mudanças têm afetado o clima, o ciclo hidrológico e os eventos extremos, com impactos na disponibilidade dos recursos hídricos em âmbito global e regional. A Floresta Amazônica desempenha um papel crucial no sistema climático, ajudando a direcionar a circulação atmosférica nos trópicos ao absorver energia e reciclar aproximadamente metade das chuvas que caem nela. Estudos anteriores caracterizaram a variabilidade dos recursos hídricos na Amazônia, bem como sua dinâmica com o tempo e a distribuição na região, mas somente em razão das variações climáticas naturais e em escalas de tempo interanuais e decenais. Além disso, atividades econômicas humanas como a urbanização, a criação de gado e o cultivo da terra, assim como o desenvolvimento agrícola, afetaram a cobertura de vegetação, e as mudanças no uso da terra e em sua cobertura devido ao desmatamento intensivo e em larga escala podem ter impactos no clima regional e no clima global.

À medida que a frente agrícola se expande, a mudança no uso e ocupação do solo leva a alterações nos ecossistemas da Amazônia. O desmatamento e a subsequente queima de biomassa resultam na injeção de grandes volumes de gases de efeito estufa e aerossóis e podem exacerbar as mudanças já produzidas pela variação climática natural. Além disso, diante da perspectiva de aumento do desmatamento, há também as seguintes ameaças: extinção e/ou redução da diversidade de espécies de peixes em uma área considerada de grande importância para o setor pesqueiro; acúmulo de sedimentos e níveis tóxicos de mercúrio nos reservatórios; impactos nas populações ribeirinhas, nos povos indígenas e nas comunidades urbanas.

A Amazônia pode ser classificada como uma região sob grande risco em virtude das variações

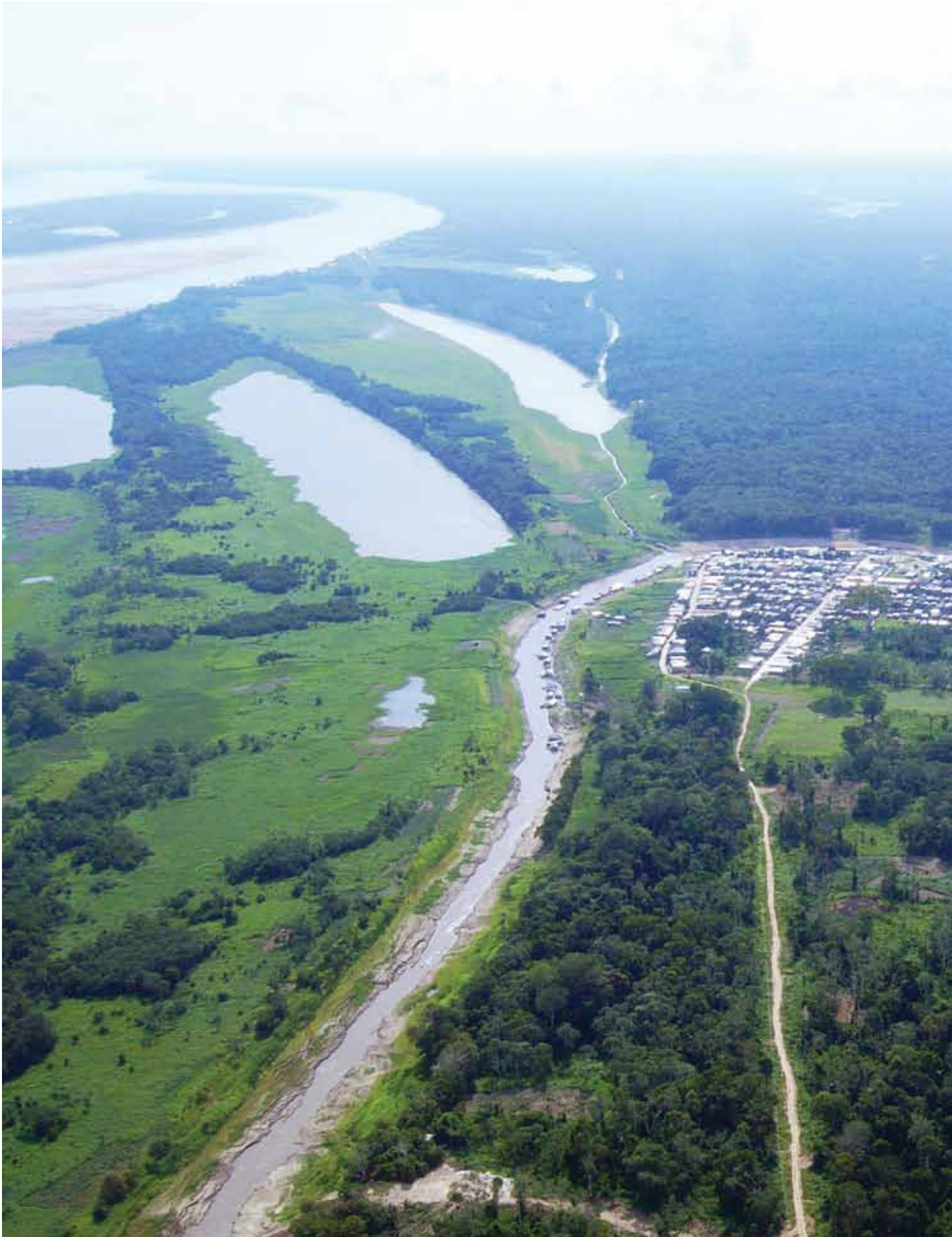
e mudanças do clima. O risco não é somente por causa das mudanças climáticas projetadas, mas também pelas interações sinérgicas com outras ameaças existentes, tais como o desmatamento, a fragmentação da floresta e as queimadas. Algumas projeções dos modelos têm mostrado que, nas próximas décadas, haverá o risco de uma mudança abrupta e irreversível em parte ou talvez em toda a Amazônia, com substituição da floresta por vegetação do tipo savana, perda da biodiversidade em grande escala e perda do meio de subsistência da população regional, com impactos climáticos nas regiões vizinhas e no mundo todo. Entretanto, as incertezas desses tipos de modelos ainda são grandes.

O Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido estão trabalhando em conjunto na avaliação das implicações das mudanças climáticas globais para o Brasil. Também estão avaliando o impacto do desmatamento no clima brasileiro. O projeto sobre os Riscos de Mudanças Climáticas no Brasil (DCC) usa um conjunto de modelos globais e regionais desenvolvidos pelo MOHC e o INPE para projetar os efeitos das emissões de gases de efeito estufa no clima do mundo todo e fornecer mais detalhes sobre o Brasil. Embora as projeções abranjam o Brasil todo, o foco deste relatório se concentra na Amazônia, região de preocupação nacional, regional e mundial. O relatório está dividido em duas seções: a primeira fornece o contexto para o trabalho e a segunda detalha a nova ciência levada a cabo e antecipa avanços científicos importantes para o planejamento e a política. O projeto DCC foi criado pelo Fundo para Programas Estratégicos do Governo do Reino Unido, antigo Global Opportunity Fund (GOF), e este trabalho continua como parte do programa científico do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-Mudanças Climáticas) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede-CLIMA).

*J. Marengo, R. Betts, C. Nobre, G. Kay, S. C. Chou, G. Sampaio*



Foto: Eduardo Arraut / INPE







# PARTE

## Sumário Executivo



# Sumário Executivo

## Parceria Brasil-Reino Unido em ciência do clima

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido trabalharam juntos para avaliar as implicações das mudanças climáticas globais para o Brasil e a Amazônia em particular – região de interesse nacional, regional e mundial. Além disso, avaliaram como o desmatamento dentro da Amazônia pode afetar o clima local e o regional.

O projeto empregou um conjunto de modelos climáticos desenvolvido pelo MOHC e pelo INPE para simular os efeitos das emissões de gases de efeito estufa e do desmatamento no clima do Brasil. O modelo climático global do MOHC foi usado para projetar mudanças climáticas no mundo todo e o modelo climático regional do INPE forneceu mais detalhes sobre o Brasil e a Amazônia para diferentes níveis de aquecimento global. Modelos climáticos regionais também foram utilizados para avaliar os efeitos do desmatamento da Amazônia sobre o clima local e o regional.

## Eventos extremos e impactos do clima na Amazônia

Só nos últimos cinco anos ocorreram duas grandes secas e uma das piores enchentes já vistas na Amazônia. Há indicações de que essas precipitações pluviométricas extremas podem estar relacionadas com as condições do Oceano Atlântico tropical, embora outros eventos recentes provavelmente estejam relacionados com as condições do Oceano Pacífico. O alto índice de precipitação pluviométrica de 2009 e os baixos índices de 2005 e 2010 foram posteriormente sentidos no nível dos rios da Bacia Amazônica. A alta recorde no nível dos rios em Manaus em 2009 (Fig. ES1) foi seguida, logo no ano seguinte, por uma baixa recorde (Fig. ES2).

Os impactos desses eventos foram fortes e se estenderam em várias esferas da vida e subsistência humana, afetando inclusive os ecossistemas de apoio. Agricultura, transporte, energia hídrica e saúde pública foram alguns dos setores afetados, com consequências significativas para a economia. Se o risco de eventos climáticos extremos aumentar com o aquecimento do clima, deverão ser adotadas medidas para mitigar seus impactos. Há indicações de que a ação do governo e uma nova legislação poderão ser eficazes nesse sentido.



**Fig ES1:** Enchentes na Amazônia; bairros alagados na cidade de Manaus, outubro de 2009 (Folha de São Paulo)

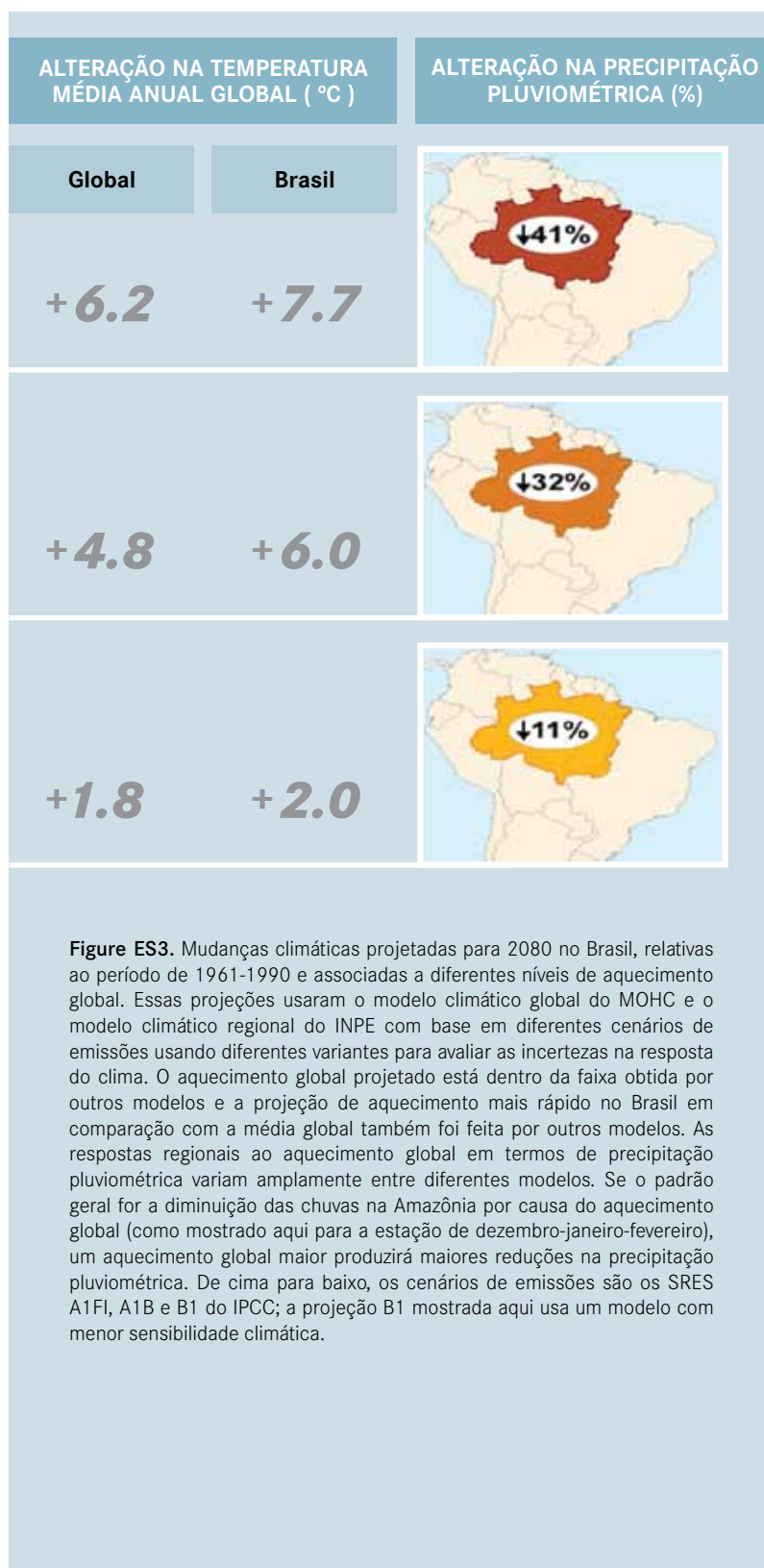


**Fig ES2:** Seca na Amazônia; leito seco do Rio Negro em Manaus, outubro de 2010 (Folha de São Paulo)

## Mudanças climáticas na Amazônia: impacto de diferentes cenários de emissões

A temperatura média global subiu aproximadamente 0,7 °C no século passado e esse aquecimento deve continuar em decorrência das contínuas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Os modelos climáticos projetados pelo MOHC-INPE são para grandes aumentos de temperatura do ar e reduções percentuais da precipitação pluviométrica na Amazônia, com mudanças mais acentuadas depois de 2040 (Fig. ES3). As diminuições na precipitação pluviométrica podem ser resultado das águas aquecidas nos oceanos Atlântico e Pacífico, que provocam alterações nos padrões de vento e no transporte de umidade na América do Sul. Isso poderia produzir impactos econômicos importantes no Brasil: mais de 70% da energia brasileira vem de usinas hidrelétricas, portanto uma redução na precipitação pluviométrica pode limitar o fornecimento de eletricidade, afetando as atividades industriais nas regiões mais importantes do país do ponto de vista econômico.

No entanto, esses impactos podem ser mitigados se forem tomadas providências para reduzir as emissões. Com menos GEEs liberados na atmosfera, o aquecimento é relativamente menor, tanto no Brasil como no mundo, e os impactos sobre a precipitação pluviométrica e a vazão dos rios também são menores. Isso fornece evidências científicas adicionais sobre a necessidade de estabilização das emissões de GEEs na atmosfera.



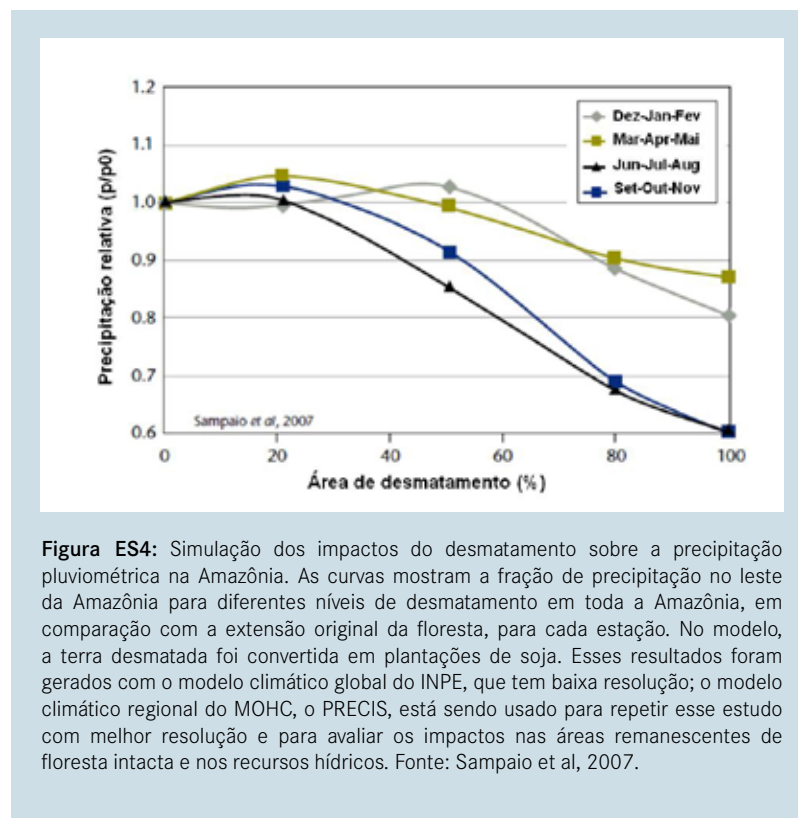


## Impactos do desmatamento sobre o clima do Brasil

Enquanto as mudanças climáticas são uma ameaça para a Floresta Amazônica a longo prazo devido ao aquecimento e às possíveis reduções da precipitação pluviométrica, o desmatamento é uma ameaça mais imediata. A Amazônia é importante para o mundo inteiro porque captura e armazena o carbono da atmosfera e também exerce um papel fundamental no clima da América do Sul por seu efeito sobre o ciclo hidrológico local.

A floresta interage com a atmosfera para regular a umidade dentro da Bacia Amazônica, mas acredita-se que sua influência se estenda muito além de suas fronteiras, atingindo outras partes do continente. O INPE estuda esse assunto desde a década de 1980; as observações e os modelos sugerem que, ao alterar o ciclo hidrológico regional, o desmatamento em grande escala pode produzir um clima mais quente e um tanto mais seco. Os resultados dessas simulações sugerem que, quando o desmatamento atinge mais de 40% da extensão original da Floresta Amazônica, a precipitação pluviométrica diminui de forma significativa no leste da Amazônia. O desmatamento poderia

provocar um aquecimento de mais de 4 °C no leste da Amazônia e as chuvas de julho a novembro poderiam diminuir em até 40%. E, o que é mais importante, essas mudanças viriam somar-se a qualquer mudança decorrente do aquecimento global. A redução do desmatamento poderia minimizar esses impactos, bem como reduzir as emissões de gases de efeito estufa.



**Figura ES4:** Simulação dos impactos do desmatamento sobre a precipitação pluviométrica na Amazônia. As curvas mostram a fração de precipitação no leste da Amazônia para diferentes níveis de desmatamento em toda a Amazônia, em comparação com a extensão original da floresta, para cada estação. No modelo, a terra desmatada foi convertida em plantações de soja. Esses resultados foram gerados com o modelo climático global do INPE, que tem baixa resolução; o modelo climático regional do MOHC, o PRECIS, está sendo usado para repetir esse estudo com melhor resolução e para avaliar os impactos nas áreas remanescentes de floresta intacta e nos recursos hídricos. Fonte: Sampaio et al, 2007.

# 1 Introdução

(J. Marengo, R. Betts – coordenadores do projeto sobre Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil (DCC) patrocinado pelo Global Opportunity Fund (GOF))

Com o aumento da temperatura global previsto para o próximo século<sup>1</sup>, os impactos associados às mudanças climáticas serão sentidos em todo o mundo e, provavelmente, terão implicações profundas para a população humana. Portanto, torna-se prioritário aumentar o conhecimento de como o clima da região pode mudar e avaliar o risco das mudanças climáticas regionais associadas aos diversos níveis de emissões de gases de efeito estufa. Essa informação é fundamental para servir de subsídio aos sistemas de tomada de decisão na formulação de estratégias de mitigação e planejamento de adaptação.

As atuais projeções de mudanças climáticas globais indicam que, assim como a maioria das regiões do mundo, o Brasil também estará vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas. Como a população e as atividades são sensíveis ao clima, a natureza e o nível das mudanças no futuro podem ser muito importantes para a vida no país. Alguns estudos mostraram que as mudanças climáticas podem resultar em *die-back* (colapso) da Floresta Amazônica, rica fonte de biodiversidade, oxigênio e água doce. Contudo, a característica de mudança climática na região não é o único processo sobre o qual é preciso atuar na floresta. O desmatamento direto é uma ameaça mais imediata e pode afetar o clima não só na Bacia Amazônica como também além de seus limites.

## A Amazônia nos sistemas terrestres regional e global

A Amazônia é importante para o balanço global de carbono por seu papel na captação do carbono proveniente da atmosfera e sua absorção pelas árvores e pelo solo. O setor florestal global responde atualmente por aproximadamente 17% das emissões de gases de efeito estufa, atrás apenas do fornecimento de energia (26%) e da indústria (19%)<sup>2</sup>. Mas ela é importante não apenas em escala global. A Floresta Amazônica também desempenha um papel crucial no clima da América do Sul por seu efeito no ciclo hidrológico regional. A floresta interage com a atmosfera para regular a umidade no interior da bacia. A umidade é transportada para a Região Amazônica pelos ventos alísios provenientes do Atlântico tropical. Depois da chuva, a floresta tropical produz evaporação intensa e reciclagem da umidade e, em seguida, grande parte dessa evaporação retorna à Região Amazônica na forma de chuva.(Fig.1). Estima-se que entre 30% e 50% das precipitações pluviométricas na Bacia Amazônica consistem em evaporação reciclada.<sup>3</sup> Além disso, a umidade originada na Bacia Amazônica é transportada pelos ventos para outras partes do continente e é considerada importante na formação de precipitações em regiões distantes da própria Amazônia.<sup>4</sup>

1. IPCC 2007a

2. IPCC 2007b

3. Molion 1975; Salati 1987; Eltahir and Bras 1998

4. Marengo et al. 2004





Figura 1: Ciclo hidrológico regional na Região Amazônica

Tanto o desmatamento direto quanto as mudanças climáticas podem prejudicar severamente o funcionamento da Amazônia como ecossistema florestal, reduzindo sua capacidade de reter carbono, enfraquecendo o ciclo hidrológico regional, aumentando a temperatura do solo e eventualmente impelindo a Amazônia a um processo gradual de savanização. A questão do *die-back* da Amazônia passou de projeção de mudança climática para preocupação ambiental em nível global com as secas intensas que ocorreram na região em 2005 e 2010. Secas e inundações fazem parte da variabilidade climática natural da Bacia Amazônica, e eventos individuais não podem ser atribuídos diretamente às mudanças climáticas ou assumidos como consequência do desmatamento em grande escala na bacia.

Contudo, as secas, as inundações e as consequentes perdas de vidas e de subsistência servem como lembretes da grande importância de pesquisas como o projeto DCC.

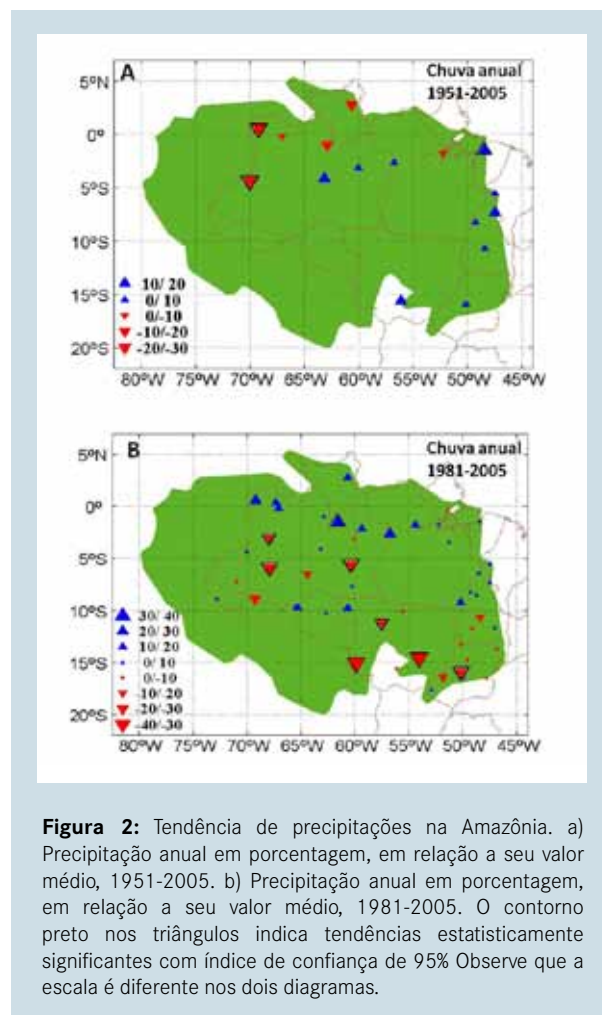
\* O sistema floresta-clima é complexo e interligado, exigindo melhor compreensão de como funciona e de como pode mudar no futuro devido aos impactos da ação do homem, inclusive mudanças climáticas e no uso da terra. Só assim podem ser tomadas decisões conscientes.

## 2 Variabilidade e tendências climáticas

(G. Obregon, J. Marengo)

O Brasil teve um aquecimento de cerca de 0,7 °C nos últimos cinquenta anos, valor mais alto que a melhor estimativa de aumento médio global, de 0,64 °C.<sup>5</sup> Mesmo considerando a evolução das temperaturas brasileiras apenas no inverno, a tendência é maior em 1°C. Para a Região Amazônica, onde existem informações disponíveis, também foram registradas temperaturas mais altas em períodos diurnos e noturnos. As tendências exatas variam dependendo do início e do fim do período observado<sup>6</sup>, mas todos os registros mostram aumento detectável.

Pesquisas observacionais não mostraram sinais evidentes de tendências negativas nas precipitações na Amazônia<sup>7</sup>, apesar de um estudo<sup>8</sup> ter detectado uma tendência significativa para condições mais secas na região sul da Amazônia nos últimos trinta anos do século XX. Contudo, a detecção de tendência unidirecional pode depender da duração da série temporal. A figura 2 mostra tendências de precipitações anuais em algumas estações na Região Amazônica com base em registros cujos dados estavam disponíveis: 1951-2005 e 1981-2005. É difícil detectar as tendências regionais, mas, pelo que mostram esses dados locais medidos na estação, há mais casos de ligeiro aumento das chuvas no norte da Amazônia a partir de 1980, enquanto uma diminuição das precipitações é uma característica mais ao sul da Amazônia (Fig. 2b). Essas tendências são condizentes com estudos anteriores.<sup>9</sup> Durante um período mais longo, 1951-2005 (Fig. 2a), a falta de regularidade das medições, assim como a mistura nas tendências em relação às condições mais secas ou mais úmidas, dificultam as conclusões sobre as tendências em toda a Amazônia.



Os estudos demonstram que não há sinal consistente nem para condições úmidas nem secas na Região Amazônica no registro observacional. Em geral, a extensão e a direção das tendências dependem do conjunto de dados sobre as precipitações: sua duração, se há interrupções no registro e se e como elas são compiladas. Em uma região onde as medições são muito raras, a incerteza quanto à extensão e à direção de quaisquer tendências deve ser grande.

5. IPCC 2007a

6. Victoria et al. 1998; Marengo 2003

7. Marengo 2004; 2009; Obregon and Marengo 2007; Satyamurty et al. 2009

8. Li et al. 2008

9. Marengo 2004; 2009; Obregon and Marengo 2007; Satyamurty et al. 2009



Obter estimativas confiáveis sobre a extensão e a direção das tendências das precipitações na Amazônia é um desafio significativo em uma região onde as medições são feitas muito raramente.

Outros estudos indicaram que, para a Amazônia, mais importante do que qualquer tendência linear é a presença de variações de uma década para outra nas precipitações<sup>10</sup>, conhecidas como escala de variabilidade decenal. A variabilidade decenal pode ajudar a explicar algumas das tendências das condições mais secas ou mais úmidas registradas. Por exemplo, o período de 1945-1976 foi relativamente úmido e o de 1977-2000, relativamente seco na Amazônia. Medições realizadas durante esse período mostraram uma transição de condições mais úmidas para mais secas e podem ajudar a explicar a aparente tendência de seca a curto prazo no sul da Amazônia no estudo acima<sup>11</sup>. Observou-se que a forte redução das precipitações na Amazônia Ocidental observada entre 1951 e 1990 foi modulada por uma oscilação decenal<sup>12</sup>. Variações como essas são atribuídas à variabilidade climática que ocorre a cada década no Oceano Pacífico<sup>13</sup>, que afeta as precipitações na Amazônia por meio de mudanças na circulação atmosférica. A variabilidade decenal observada no clima ocorre de forma natural, independentemente das mudanças causadas pelo homem no clima ou na terra.

Assim como a variabilidade decenal nas precipitações da Amazônia, há também variações de ano para ano, conhecidas como variabilidade climática interanual. Nas escalas interanuais, o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENSO) – cujo centro está no Oceano Pacífico tropical, mas tem alcance mundial – foi reconhecido como um dos maiores padrões que afetam o clima da Amazônia. Existem registros de secas durante alguns eventos intensos do El Niño, como em 1912, 1926, 1983 e 1998<sup>14</sup>. A seca de 2010 começou durante um evento do El Niño no início do verão austral daquele ano e depois tornou-se mais intensa durante o evento de La Niña. A precipitação abaixo da média no verão, que pode ser associada ao El Niño, fez baixar o nível dos rios no

outono austral<sup>15</sup>. Entretanto, durante a seca de 2010, também houve temperaturas mais altas do que o normal na superfície do mar no norte do Atlântico tropical, o que anteriormente havia sido associado a eventos de seca ocorridos durante os anos sem El Niño, como 1964 e 2005<sup>16</sup>. A Amazônia está ligada ao sistema climático global, influenciando-o e sendo por ele influenciada. A variabilidade climática em outras partes do planeta, mas particularmente nos Oceanos Pacífico ou Atlântico tropicais, podem acarretar variações no clima da Amazônia.<sup>17</sup>

Ainda não está muito claro se essas variações que ocorrem naturalmente no clima da Amazônia podem contrabalançar ou amenizar os efeitos do desmatamento ou das mudanças climáticas causadas pelo homem<sup>18</sup>. Não há razão para esperar que as variações naturais ocorram independentemente das mudanças climáticas causadas pelo homem. Pode ser que as variações naturais se sobreponham a uma tendência do clima ou que as mudanças climáticas possam afetar as características dos ciclos de variabilidade do clima. Por exemplo, é provável que as mudanças climáticas afetem os processos que controlam o comportamento do ENSO, o que pode modificar aspectos tais como a magnitude, a frequência ou o período dos episódios de El Niño/La Niña. As mudanças climáticas também podem afetar o modo pelo qual influências remotas, tais como o ENSO, estão relacionadas com as precipitações na Amazônia. Entretanto, os processos que controlam o comportamento e os impactos do ENSO interagem de modo complexo e podem intensificar ou contrabalançar um ao outro. Até agora, não está claro como o ENSO se comportará no futuro<sup>19</sup>. A relação entre mudanças climáticas e sistemas de variabilidade do clima, assim como seus impactos no comportamento das secas na Amazônia<sup>20</sup>, por exemplo, são temas das pesquisas em andamento.

10. Marengo 2004; 2009

11. Li et al. 2008

12. Obregón and Nobre 2003; Marengo 2004

13. Obregón and Nobre 2003; Marengo 2004

14. Ronchail et al. 2002; Marengo 2004; Marengo et al. 2008a

15. INPE 2010

16. Cox et al. 2008; Good et al. 2008; Marengo et al. 2008a; b; Tomasella et al. 2010a; b

17. Fu et al. 2001

18. Chen et al. 2001

19. Collins et al. 2010

20. Cox et al. 2008; Good et al. 2008; Marengo et al. 2008a; b; Tomasella et al. 2010a; b

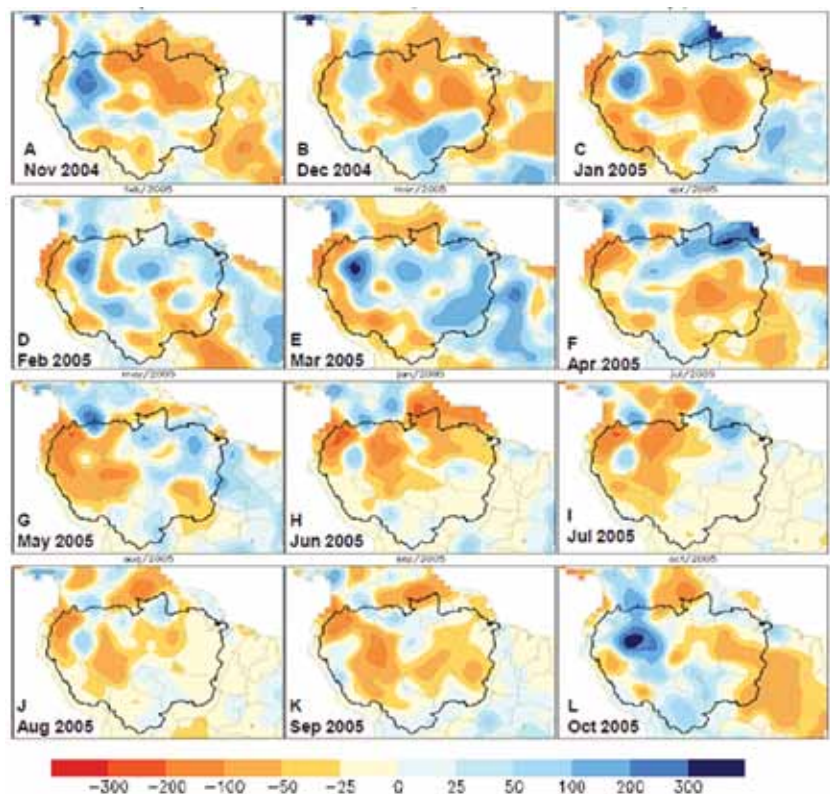


# 3 Eventos extremos sazonais: secas de 2005 e 2010 e enchentes de 2009

(J. Marengo, J. Tomasella, L. Alves, W. Soares)

## Seca de 2005

A seca de 2005 foi estudada a partir de perspectivas meteorológicas<sup>21</sup>, ecológicas<sup>22</sup>, hidrológicas<sup>23</sup> e humanas.<sup>24</sup> Grandes extensões do sudoeste da Amazônia sofreram uma das secas mais intensas dos últimos cem anos. A seca não afetou a Amazônia Central ou Oriental, um padrão diferente daqueles relacionados ao fenômeno El Niño dos anos de 1926, 1983 e 1997/1998. Em vez disso, foi provocada pelas temperaturas elevadas no Atlântico Norte tropical, o que efetivamente desloca os ventos alísios – e toda a umidade que carregam – para o norte, distante da Amazônia. A Figura 3 mostra que as chuvas anormais na Amazônia Ocidental e Meridional aproximaram-se de 100 mm por mês abaixo da média de longo prazo, de 200-400 mm/mês, durante o verão austral de 2005 na Amazônia Meridional, enquanto que, na mesma região, excessos acima de 100 mm por mês foram detectados durante o verão extremamente úmido de 2009 (Fig. 4).

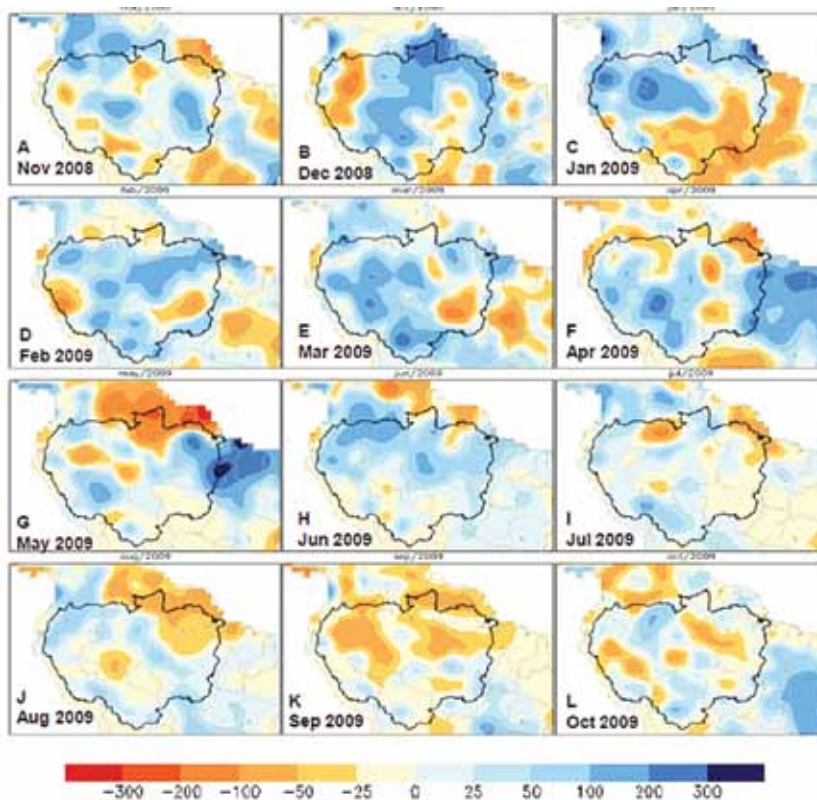


**Figura 3:** Anormalidades na precipitação pluviométrica mensal (em mm/mês, diferença da média de 1961-2009) durante a seca de novembro de 2004 a outubro de 2005. As cores vermelhas indicam condições mais secas que o normal; as azuis indicam condições mais úmidas. *Fonte: GPCC*

21. Zeng et al. 2008; Marengo et al. 2008 a, b; Cox et al. 2008
22. Saleska et al. 2007; Philips et al. 2009; Samanta et al. 2010
23. Tomasella et al. 2010a
24. Brown et al. 2006; Aragão et al. 2008; Boyd 2008; Tomasella et al. 2010b

## Enchentes de 2009

As enchentes foram o resultado de chuvas extraordinariamente fortes na Região Norte do Brasil e que estiveram, em geral, associadas às temperaturas mais altas que o normal na superfície do mar no Oceano Atlântico Sul tropical, condições quase opostas às observadas durante a seca de 2005. Essas águas excepcionalmente quentes retiveram por um período mais longo uma banda de convecção e precipitação chamada Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que leva umidade para a Bacia Amazônica. Dessa forma, o transporte intenso de umidade do Atlântico tropical para a Região Amazônica persistiu por mais tempo. A precipitação sobre a Amazônia Central e Ocidental (Fig. 4) foi quase 100% acima do normal durante o verão e parte do outono austral de 2009, o que elevou extraordinariamente o nível dos rios durante o outono e o inverno<sup>25</sup> (Fig. 6).



**Figura 4:** Anormalidades na precipitação pluviométrica mensal (em mm/mês, diferença a partir da média de 1961-2009) durante as enchentes de novembro de 2008 a outubro de 2009. As cores vermelhas indicam condições mais secas que o normal; as azuis indicam condições mais úmidas. Fonte: GPCP

## Seca de 2010

Apenas cinco anos após o evento de 2005, uma intensa seca atingiu a Amazônia. A seca de 2010 afetou uma grande área que compreendia o noroeste, centro e sudoeste da Amazônia, incluindo partes da Colômbia, do Peru e do norte da Bolívia. Poucas nuvens e menos chuvas também se traduziram em temperaturas mais altas e baixas históricas no nível do principal afluente, o Rio Negro. As secas de 2005 e 2010 foram semelhantes em termos de gravidade meteorológica, no entanto os impactos hidrológicos sobre os níveis das águas do último evento foram mais fortes. De modo análogo a 2005, há alguns indícios de que a seca de

2010 possa estar associada a temperaturas mais elevadas na superfície do Oceano Atlântico ao norte do Equador. As secas foram semelhantes, também, em termos de gravidade meteorológica, embora os impactos hidrológicos sobre os níveis das águas tenham sido mais graves durante o último evento. Além disso, a temperatura do ar na superfície da Amazônia em ambos os anos foi mais elevada que a média (apesar de ser consideravelmente mais elevada em 2010). Entretanto, as características espaciais da seca de 2010 (Fig. 5) foram diferentes daquelas de 2005 (Fig. 3). Em 2005, a seca foi mais intensa no sudoeste da Amazônia, enquanto que, em 2010, as condições de seca

foram mais pronunciadas na região que se estende da Amazônia Ocidental até a Amazônia Oriental.

✳ Contudo, as secas de 2005 e 2010 alinham-se bem às projeções de longo prazo de alguns modelos climáticos sobre seca e aquecimento da Amazônia até o final do século XXI.

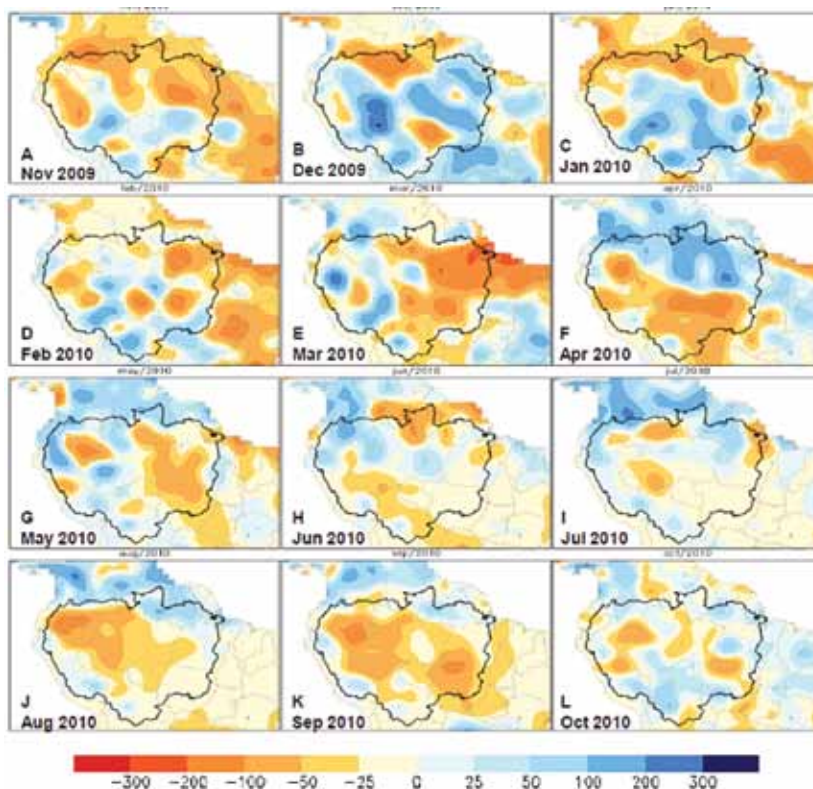
25. Marengo et al. 2008b



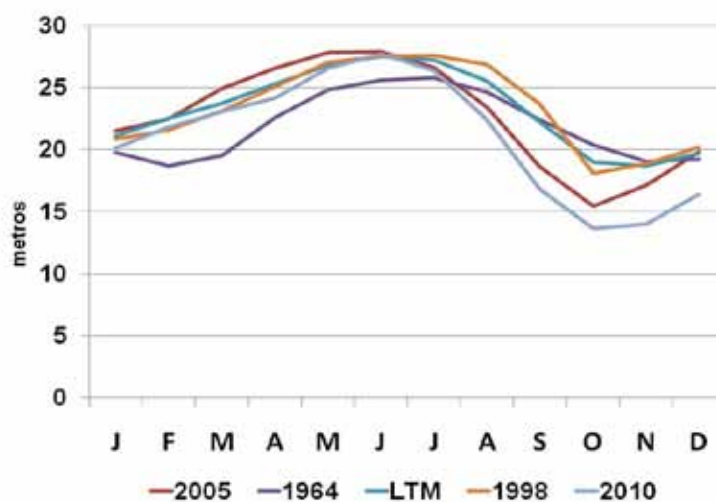
## Impactos dos eventos extremos

Desde que os registros tiveram início em 1903, as enchentes que ocorreram na Amazônia brasileira em julho de 2009 atingiram os níveis máximos, desalojando milhares de pessoas em toda a região. Os níveis de água chegaram a 29,75 m em uma estação no Rio Negro, em Manaus, a maior cidade do Amazonas, ultrapassando o recorde anterior de 29,69 m estabelecido em 1953<sup>26</sup>. As enchentes de 2009 vieram apenas cinco anos após a intensa seca de 2005, quando os níveis do Rio Negro baixaram em Manaus (Fig. 6). A elevação do nível das águas teve impacto direto e prolongado sobre a vida, a saúde e a economia das comunidades que vivem às margens do rio ou em áreas urbanas de cidades como Manaus. Houve graves problemas de saúde pública, como a ocorrência de casos de leptospirose e de doenças transmitidas pela água, danos à infraestrutura e às propriedades e, quanto à educação, crianças e professores ficaram incapacitados de chegar à escola. A biodiversidade da Amazônia foi igualmente afetada e muitas espécies ameaçadas de extinção atingiram o ponto crítico.<sup>27</sup>

No ano seguinte, 2010, houve outra seca intensa, e da alta recorde de 2009, o nível do Rio Negro caiu para 13,63 m em 24 de outubro em Manaus, um valor ainda menor que o anterior de 13,64 m em 1963<sup>28</sup>, o nível mais baixo até então registrado. A atividade pesqueira e o abastecimento de água na região ficaram seriamente comprometidos em consequência dos níveis extremamente baixos do



**Figura 5:** Anomalias na precipitação pluviométrica mensal (em mm/mês, diferença da média de 1961-2009) durante a seca de novembro de 2009 a outubro de 2010. As cores vermelhas indicam condições mais secas que o normal; as azuis indicam condições mais úmidas. Fonte: GPCC



**Figura 6:** Valores anuais dos níveis do Rio Negro em Manaus, Brasil (em metros), para alguns anos de seca extrema (1964, 2005, 1998 e 2010) em comparação com a média de 1903-1986. Fonte: CPRM

26. Marengo et al. 2010a
27. INPE 2010
28. CPRM 2010



rio. Os jornais locais informaram que a produção pesqueira, que normalmente é de cerca de 10 toneladas/mês, caiu para 1 tonelada/mês em razão da seca. Os impactos da seca de 2010 ainda estão sendo avaliados, mas se a experiência da seca de 2005 puder servir de indicação, eles provavelmente terão sido substanciais.

A seca de 2005 teve efeitos devastadores sobre as populações humanas ao longo do principal canal do Rio Amazonas e seus afluentes, tanto a oeste quanto a sudoeste: o Rio Solimões (também conhecido como Rio Amazonas em outros países amazônicos) e o Rio Madeira, respectivamente. Os níveis dos rios atingiram os menores valores observados em sua história e a navegação ao longo dos canais teve que ser suspensa. A queda nos níveis dos rios e a seca dos lagos das planícies aluviais levaram à alta mortalidade de peixes, o que afetou as populações para as quais a pesca constitui um meio de subsistência. A seca de 2005 foi mais grave nesse aspecto do que aquela associada ao El Niño de 1997/1998, porque as condições meteorológicas subjacentes favoreceram a evaporação mais intensa, aumentando a dessecação dos lagos.<sup>29</sup>

As condições muito secas tiveram impacto direto sobre a Floresta Amazônica, causando a mortalidade de árvores, mas a degradação provocada por eventos climáticos extremos poderia ser agravada pelo aumento da vulnerabilidade a fatores como vento, tempestades ou incêndios. Como exemplo, estimou-se que a série de tempestades que atravessou a Amazônia em 2005 matou en-

tre 0,3 e 0,5 milhão de árvores somente na região de Manaus, o equivalente a 30% do desmatamento observado e relatado em 2005 na mesma área.<sup>30</sup>

Além disso, as condições secas foram ideais para a propagação de incêndios florestais, que destruíram centenas de milhares de hectares de floresta. A extensa fumaça que se originou dos incêndios causou problemas de saúde nas pessoas e o fechamento de aeroportos.<sup>31</sup>

A seca de 2005 deixou milhares de pessoas sem alimentos. As redes de transporte, a agricultura e a subsistência foram seriamente afetadas e a geração de energia hídrica ficou comprometida.<sup>32</sup> A seca teve impactos imediatos, mas trouxe também problemas indiretos e prolongados para as populações e os ecossistemas.

Em suma, a Região Amazônica passou por dois períodos de extrema seca em apenas cinco anos. Isso não inclui a seca de 2006-2007, que afetou somente o sudeste da Amazônia e destruiu 10 mil km<sup>2</sup> de floresta na região (Tomasella et al. 2010a). No mesmo período, a população também teve de enfrentar a enchente recorde de 2009. A Amazônia está periodicamente sujeita a enchentes e secas, mas esses exemplos recentes destacam a vulnerabilidade das populações humanas e dos ecossistemas dos quais elas dependem aos atuais eventos climáticos extremos. Se o risco de eventos climáticos extremos aumentar com o aquecimento do clima como previsto e discutido em maiores detalhes na Seção 4, os tipos de impactos aqui descritos serão esperados com mais frequência.<sup>33</sup>

No entanto, a magnitude de um evento não representa necessariamente um conjunto de impactos diretos. Além das características físicas próprias do evento (magnitude, assinatura espacial, condições anteriores, etc.), a gravidade dos impactos pode depender das estruturas usadas para controlar o evento e suas consequências.



A Amazônia está periodicamente sujeita a enchentes e secas, mas exemplos recentes destacam a vulnerabilidade das populações humanas e dos ecossistemas dos quais elas dependem aos atuais eventos climáticos extremos.

Ao compararmos as secas de 2005 e de 2010 com a seca anterior, de 1996/1997, fica evidente que os impactos sociais e econômicos das secas mais recentes sobre a população local foram menos intensos (embora os impactos da seca de 2010 ainda não tenham sido completamente avaliados). Isso pode ser atribuído à ação mais eficaz do governo e à nova legislação. Para uma gestão eficaz, deve haver boas informações sobre o clima regional atual e como ele pode mudar no futuro.

29. Tomasella et al. 2010b

30. Negrón Juárez et al. 2010

31. Marengo et al. 2008b

32. Marengo et al. 2010a

33. IPCC 2007c

# 4 Mudanças climáticas globais e regionais

(C. Nobre, J. Marengo, G. Sampaio, R. Betts, G. Kay)

## O que é mudança climática?

O clima da Terra está sempre mudando com o tempo em decorrência de processos naturais como as variações de órbita, erupções vulcânicas e alterações na radiação solar. Mesmo se esses fatores fossem constantes, ainda assim haveria variabilidade no sistema climático. Uma certa variabilidade é natural – tais como as secas e enchentes descritas na seção anterior, ocorrendo a intervalos que vão de estações a séculos, o que significa que nunca se pode esperar que um ano ou década seja igual ao seguinte. Mas, no século passado, os níveis de gases de efeito estufa aumentaram rapidamente na atmosfera. O “efeito estufa” é um processo natural. Após absorver a energia solar, a terra emite calor no espaço e parte desse calor é absorvida pelos gases presentes na atmosfera. Sem esse efeito estufa natural, a temperatura média mundial seria muito mais baixa do que é hoje, e a vida

neste planeta não existiria da forma como a conhecemos. As atividades humanas, tais como a geração de energia a partir de combustíveis fósseis e o desmatamento, intensificaram esse processo natural ao introduzir mais gases de efeito estufa na atmosfera, que então passou a absorver mais calor. Assim, com o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, a temperatura global também se elevou. Devido à permanência prolongada dos gases de efeito estufa na atmosfera e a uma certa inércia dentro do sistema terrestre, já é possível se prever um certo nível de mudança climática no futuro, independentemente de como evoluirão as emissões. Caso elas continuem, as mudanças climáticas esperadas serão maiores. Os modelos climáticos são as ferramentas mais confiáveis para fazer projeções do clima futuro. Eles permitem que se façam projeções não apenas de como a temperatura global média pode aumentar no século XXI, mas também de como essas mudanças podem afetar o clima no mundo todo.



Foto: Stock.xchng

Foto: Stock.xchng



## Mudanças climáticas futuras

O Quarto Relatório de Avaliação (AR4, 2007) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) reuniu projeções de mais de vinte modelos sofisticados, desenvolvidos por instituições do mundo todo. Os modelos foram executados de acordo com diferentes cenários de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera – desde níveis altos até baixos (Relatório Especial sobre Cenários de Emissões do IPCC,<sup>34</sup> SRES). Como não podemos prever a trajetória futura dos gases de efeito estufa – que depende de fatores como as alterações demográficas e decisões sobre a produção de energia –, temos

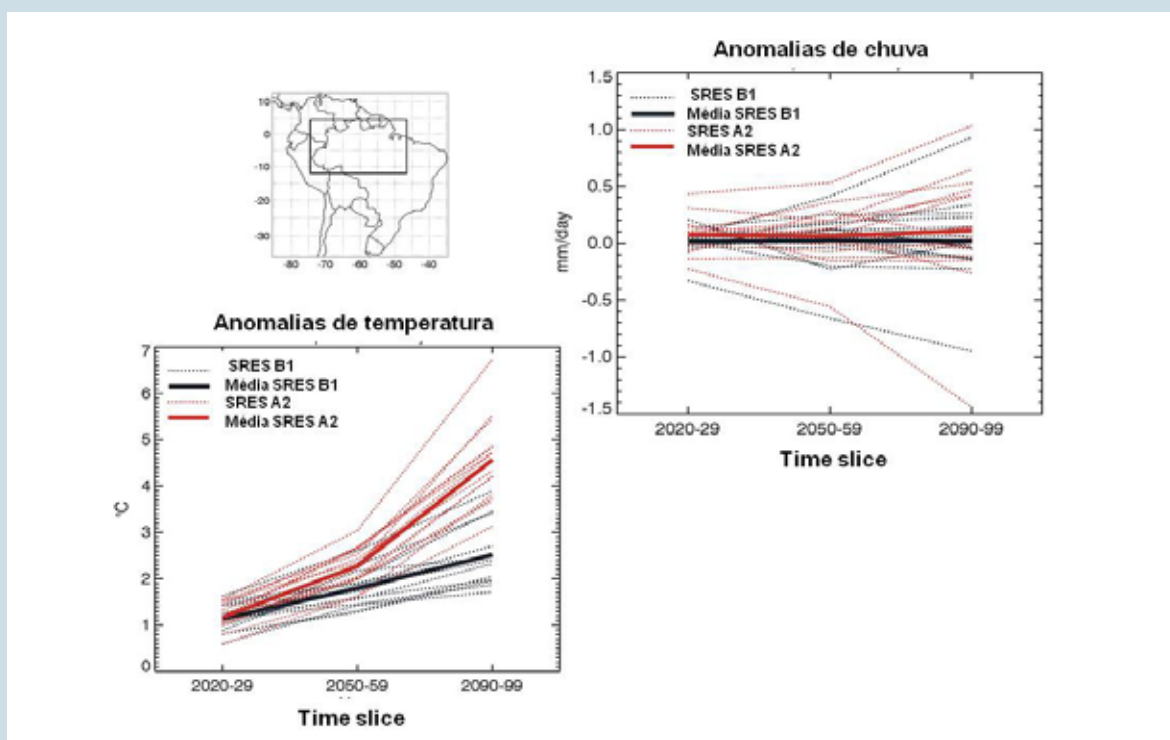
de nos basear em cenários que representem diferentes rotas das emissões. Cada modelo climático é diferente, por isso simula uma versão diferente de um possível clima futuro. Contudo, eles demonstram que, sob concentrações mais elevadas de gases de efeito estufa, maiores mudanças podem ser esperadas, as quais provavelmente produzirão impactos mais pronunciados.

Todos os modelos simulam elevações na temperatura global para o próximo século. Há alguns padrões gerais de mudança que são comuns a todos os cenários de emissões, diferindo quanto à intensidade. Por exemplo, segundo as projeções, as regiões polares devem se aquecer mais do que outras partes, devido

aos feedbacks do processo radiação-gelo e às respostas atmosféricas. As massas de terra deverão se aquecer mais rapidamente que os oceanos, já que a terra absorve mais radiação que a água, por isso, de forma geral, podemos esperar que qualquer país – tal como o Brasil – se aqueça mais do que a média global. As projeções de chuvas para o futuro são um pouco mais complicadas, pois existe uma certa divergência entre os modelos quanto aos padrões ou até mesmo, em alguns lugares, quanto à tendência da mudança. No entanto, elas indicam que as mudanças não serão uniformes no mundo: a modificação dos padrões de circulação produzirá mais umidade em algumas áreas e mais seca em outras.

34. Nakićenović et al. 2000





**Figura 7:** Alterações na precipitação pluviométrica (acima, à direita) e na temperatura (abaixo, à esquerda) para os períodos de 2020-2029, 2050-2059 e 2090-2099 em relação à média de 1961-1990, simuladas por 15 diferentes modelos climáticos apresentados no AR4 do IPCC para os cenários de altas emissões (vermelho) e baixas emissões (preto) (SRES A2 e B1). Os valores correspondem à média das alterações projetadas para toda a Amazônia (destaque no mapa). As linhas cheias mostram a média dos 15 modelos incluídos no estudo para cada cenário e as linhas pontilhadas, as projeções dos modelos individuais. Esses cenários não consideram a possibilidade de feedbacks da interação clima-ciclo de carbono, que aceleram as mudanças climáticas – esse é um ponto importante quando comparados com modelos que incorporam esses dados.

## As mudanças climáticas e a Amazônia

Utilizando os mesmos modelos, porém com enfoque na Amazônia, podemos obter mais informações de como as mudanças climáticas globais podem alterar o clima na Região Amazônica (Fig. 7). Aqui, mais uma vez, os modelos são todos diferentes, portanto o nível de aquecimento na Amazônia varia de um modelo para outro.<sup>35</sup> A melhor estimativa do IPCC sobre a elevação da temperatura entre o final do século XX (1980-1999) e o final do século XXI (2090-

2099) para o cenário de baixas emissões (SRES “B1”) é de 2,2 °C (provavelmente a faixa varia de 1,8 °C a 2,6 °C) e a melhor estimativa para o cenário de altas emissões (SRES “A2”) é de 4,5 °C (provavelmente a faixa varia de 3,9 °C a 5,1 °C).

As projeções de temperatura para a Amazônia (Fig. 7, abaixo, à esquerda) mostram uma faixa de magnitudes de aquecimento descrita pelos modelos individuais. Entretanto, todos os modelos projetam temperaturas em elevação e demonstram claramente o efeito – maiores aumentos – de um cenário de altas emissões (as linhas vermelhas são as pro-

jeções do cenário de maiores emissões). Conforme descrito acima, as projeções de precipitação pluviométrica para o mundo todo são mais diversificadas entre os modelos que as de temperatura, e esse é o caso da Região Amazônica.

As médias desses modelos apresentam alterações muito pequenas (linhas cheias na Fig. 7, acima, à direita), não porque nenhum deles esteja projetando grandes mudanças, mas porque algumas dessas mudanças são para maior umidade no futuro ao passo que outras são para mais seca. Isso é verdadeiro a despeito do cenário de emissões. Ao contrário

35. Vera et al. 2006; Li et al. 2006; Christensen et al. 2007; Meehl et al. 2007

da temperatura, as projeções de precipitação pluviométrica parecem ser independentes do cenário nesse conjunto de múltiplos modelos.

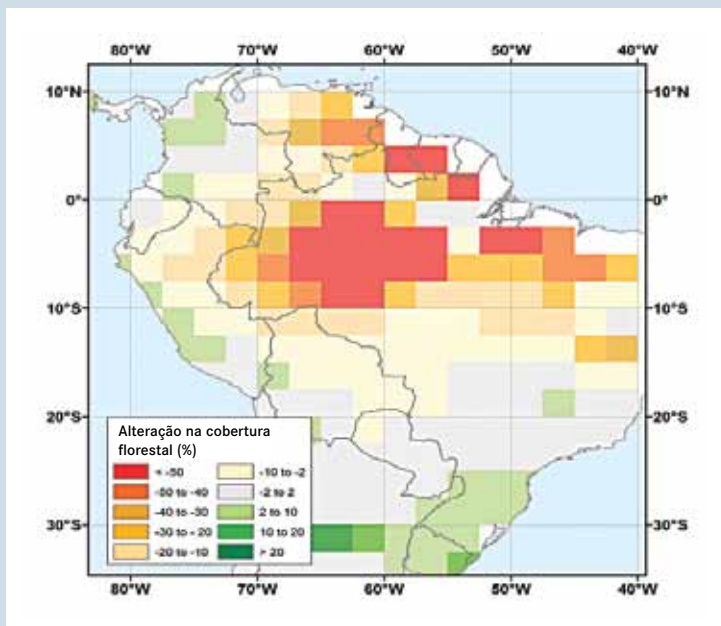
Os modelos globais HadCM3 do MOHC projetam um clima bem mais quente e seco na Amazônia durante o século XXI. Além das implicações diretas que as temperaturas mais altas e a menor precipitação pluviométrica têm para a população, é possível que elas afetem a própria viabilidade da Floresta Amazônica e, em consequência, o clima regional e o clima global.

Uma versão posterior do modelo do MOHC, chamada HadCM3LC, inclui os feedbacks do ciclo de carbono e a dinâmica da vegetação.<sup>36</sup> Essa versão possibilita que o clima afete a floresta e que quaisquer alterações subsequentes na vegetação – tais como a liberação de carbono após a

morte das árvores – influenciem o balanço de carbono global e as mudanças climáticas globais e regionais. Nesse modelo, as mudanças climáticas projetadas inicialmente causaram a morte de parte da floresta, que acabou liberando para a atmosfera o carbono que havia sido armazenado pelas árvores e pelo solo. Com isso, reduziu-se a área florestal disponível para captar o carbono da atmosfera. Assim, as concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera se elevaram, intensificando ainda mais o efeito estufa no clima do mundo e as mudanças correspondentes. No Brasil, essas mudanças causaram a morte de uma parte maior da floresta, criando um círculo vicioso (Fig. 8).<sup>37</sup> A perda de floresta também teve efeitos sobre o clima local e o regional, conforme descrito na Seção 1.

O que interessa não é somente

como as temperaturas médias e a precipitação pluviométrica média podem mudar no futuro, mas também os eventos extremos que produzem grandes impactos. Até o fim do século XXI, as mudanças climáticas deverão aumentar a frequência e a intensidade das precipitações pluviométricas extremas na Amazônia, principalmente na parte oeste.<sup>39</sup> Usando a projeção de um modelo climático do Centro Hadley, um estudo estimou qual a probabilidade de um ano como 2005 se repetir na Amazônia no futuro. O estudo sugere que, nas condições atuais, a seca de 2005 foi um desses eventos que ocorrem aproximadamente uma vez em 20 anos (uma seca igual à de 2005 seria esperada em um período de 20 anos), mas até 2025 pode passar a ocorrer uma vez em 2 anos e, até 2060, 9 vezes em 10 anos. Em outras palavras, pode tor-



**Figura 8:** Alteração percentual na cobertura florestal no fim do século XXI em comparação com as condições pré-industriais, tendo como base o modelo HadCM3LC do Centro Hadley incorporando dados de clima-carbono em cenário de emissões usuais de gases de efeito estufa. As cores avermelhadas indicam redução na cobertura florestal. Elas demonstram o *die-back* (colapso) da floresta na simulação de um clima mais quente e seco no futuro. De acordo com Cox et al. 2000

36. Cox et al. 2000, 2004
37. Betts et al. 2004, 2008
38. Cox et al. 2008
39. Marengo et al 2010a, b



nar-se a norma em vez de um evento extremo. Se secas intensas como a de 2005 se tornarem mais comuns no futuro, serão necessárias medidas de adaptação para evitar que os impactos sentidos naquele ano aconteçam mais frequentemente com igual devastação. Existem evidências de que os tomadores de decisão podem adotar medidas eficazes nesse sentido, conforme discutido a respeito da seca na Amazônia (Seção 3). Mas, mesmo assim, alguns impactos cumulativos podem se intensificar. Por exemplo, é possível que o processo de “savanização”, que começa no leste da Amazônia, se estenda mais rapidamente para o oeste, provocando seca na parte ocidental.



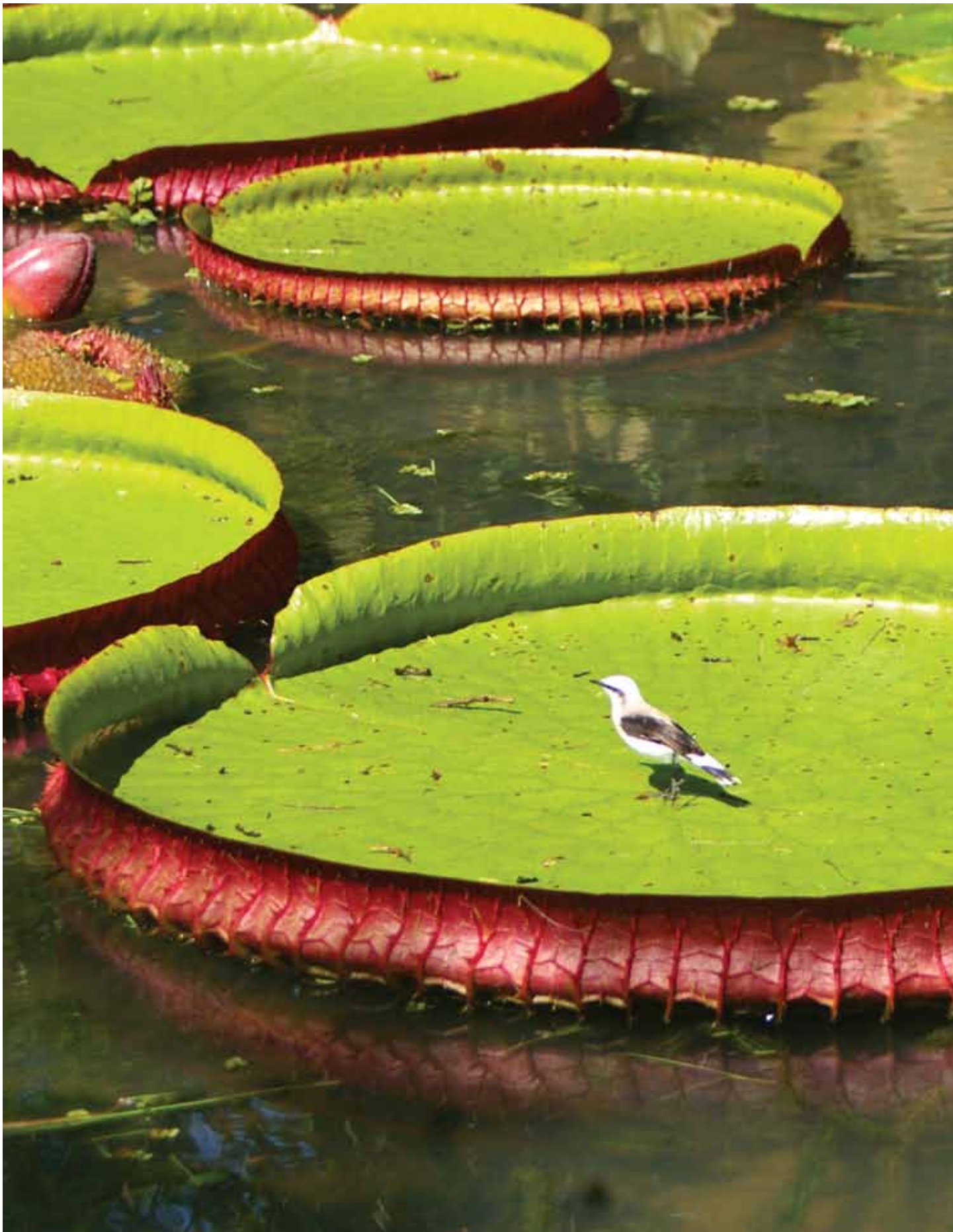
Se secas intensas como as de 2005 e 2010 se tornarem mais comuns no futuro, serão necessárias medidas de adaptação para evitar que os impactos sentidos naquele ano aconteçam mais frequentemente com igual devastação. Existem evidências de que os tomadores de decisões podem adotar medidas eficazes para mitigar os efeitos da seca meteorológica.

Deve-se ter em mente que essas são simples projeções e não refletem um resultado definitivo no que se refere às mudanças climáticas e aos impactos na Amazônia. A forte elevação da temperatura e a diminuição da precipitação pluviométrica que poderiam levar ao *die-back* da floresta

segundo os modelos HadCM3 do Centro Hadley não são tão nítidas em outros modelos climáticos; na verdade, alguns deles indicam aumento da umidade na Amazônia. Deve-se reconhecer, no entanto, que os modelos do Centro Hadley estão entre os melhores em termos de simulação do clima do presente e do passado recente na região da América do Sul, portanto o aumento da temperatura e das secas projetado para a Amazônia deve ser considerado plausível. Porém, toda projeção de mudança climática não passa de uma simples projeção, devendo ser tratada com critério.

Outro ponto a levar em conta é que a incorporação de modelos de vegetação aos modelos climáticos é um pouco prematura, pois fornece uma representação grosseira da vegetação. Os modelos que contribuíram para o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC não incluíam modelos de dinâmica da vegetação e somente alguns dos apresentados no próximo relatório de avaliação incorporarão esse componente. No entanto, os modelos que já incorporam o ciclo de carbono (que não incluem a dinâmica da vegetação) estão se tornando o padrão entre os modelos de sistemas terrestres mais sofisticados e, para o futuro, deverão incorporar também a dinâmica da vegetação. A avaliação do comportamento da Floresta Amazônica e de sua interação com o balanço de carbono global e o clima regional em modelos provenientes de outros centros será de grande valor informativo.

Photo: Stock.xchng







# PARTE

Nova ciência e  
desenvolvimento  
científico



# 1 Como modelamos o clima

(R. Betts, C. Nobre, G. Kay, G. Sampaio, S. Chou)

## Modelagem climática global

Os modelos climáticos são as principais ferramentas para fazer projeções do clima futuro. Eles representam o sistema climático por meio de números e assim como as interações com forçantes externas como o sol e outras fontes. Em um modelo climático, o mundo é dividido em uma grade com células que abrangem toda a superfície do planeta, a atmosfera e os oceanos. Nessa grade, o modelo faz cálculos matemáticos com base em leis da física bem estabelecidas que descrevem o movimento do ar, mudanças na pressão atmosférica, temperatura e a formação de chuva. Em outras palavras: o tempo e o clima. Paralelamente à melhora no desempenho computacional, os modelos climáticos foram se tornando cada vez mais complexos ao longo dos anos, à medida que mais e mais componentes foram sendo acrescentados, como a dinâmica dos oceanos, as trocas na superfície da terra e os aerossóis. Apesar disso, não é possível representar todos os detalhes que existem no mundo real e, portanto, determinados processos têm de ser incluídos no modelo por meio de aproximações baseadas em conhecimento especializado.

No mundo todo, muitas instituições desenvolveram modelos climáticos. As variações na configuração dos diferentes modelos causam diferenças nas simulações da variabilidade e das mudanças climáticas conforme descrito na Seção 4. Os modelos climáticos são avaliados quanto à sua capacidade de simular o clima atual e o passado com relação às condições médias e suas variações. Se um modelo consegue simular bem

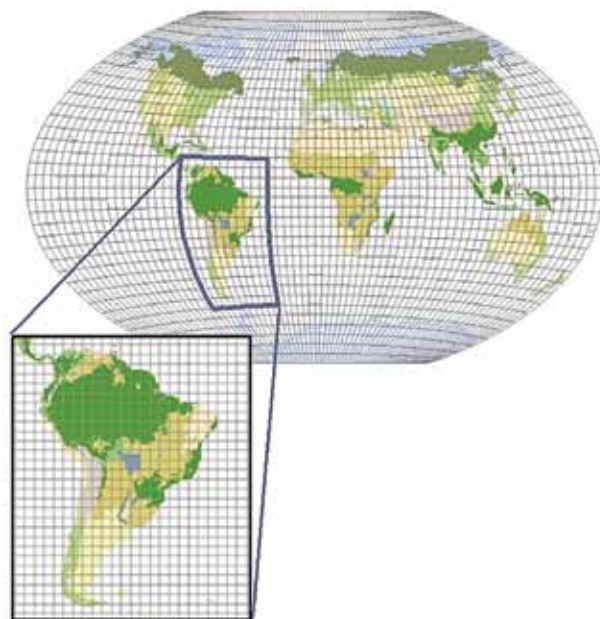
o clima do século XX até o presente, as projeções climáticas futuras podem ser consideradas plausíveis.

## Modelagem climática regional

Para simular o complexo sistema climático, o modelo precisa ter uma grande quantidade de recursos computacionais, o que restringe o número de cálculos que podem ser feitos e, consequentemente, o tamanho da grade. Atualmente, as células da grade de um modelo climático global são bastante largas - da ordem de 100 a 300 km quadrados. Mesmo nessa resolução, elas fornecem uma boa ideia de como as mudanças podem se manifestar em grande escala. Porém, para observar como as mudanças climáticas ocorrem em nível de país e como os diferentes níveis de concentrações de gases de efeito estufa podem afetá-las, é preciso ter acesso a informações mais detalhadas. Uma das formas de fazer isso é aumentando a resolução espacial do modelo climático na área de interesse, por exemplo, a América do Sul, o que é possível em termos computacionais dado o tamanho limitado da região. A maior resolução espacial proporciona uma representação mais realística de características como a região costeira e as montanhas e de processos atmosféricos de menor escala. Portanto, um modelo climático regional deve ser mais eficiente em representar o clima de um país específico do que um modelo global.

O modelo regional mais detalhado está “aninhado” no modelo climático global (Fig. 9) e

precisa receber dados do GCM nas fronteiras do domínio regional. Por meio deste projeto, foram preparados e disponibilizados conjuntos de dados de fronteiras dos modelos globais do MOHC para a execução do modelo regional Eta-CPTEC<sup>40</sup> do INPE até o ano 2100. Há muitos anos, o Eta-CPTEC tem sido usado no INPE<sup>41</sup> como modelo operacional de previsão de tempo e previsão climática sazonal. Para o projeto DCC, foram feitas algumas modificações no Eta-CPTEC a fim de adaptá-lo para executar as mudanças climáticas e permitir que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) varie de acordo com o modelo de referência. Esse processo fornece projeções de mudanças climáticas no Brasil a uma resolução bastante aumentada de 40 km no modelo regional Eta-CPTEC.



**Figura 9:** O modelo climático regional de alta resolução está “aninhado” no modelo climático global, utilizando dados das fronteiras do modelo global.

**\*** Compreender os possíveis impactos das mudanças climáticas sob diferentes cenários de emissões em uma escala regional de boa resolução é fundamental quando o objetivo é adotar medidas para mitigar as mudanças, assim como planejar as adaptações.

É preciso observar que o desempenho de um modelo climático regional depende substancialmente do desempenho do modelo global original. Se esse modelo global não simular bem os processos importantes em grande escala, então o modelo regional não conseguirá capturar corretamente o clima em maior resolução. Acrescentar detalhes regionais à projeção de um modelo global de mudanças climáticas, seja por modelagem climática regional – como é o caso deste projeto – ou por técnicas estatísticas, aumenta a complexidade e a incerteza das projeções. Mesmo assim, é fundamental compreender os possíveis impactos das mudanças climáticas em escala regional quando o objetivo é adotar medidas para mitigar os efeitos das mudanças, assim como planejar as necessárias adaptações.

## Avaliação das incertezas sobre as mudanças climáticas

Nenhum modelo pode prever com certeza um evento climático futuro. Isso se deve a diversos motivos, que podem ser divididos nas seguintes categorias:

- **Incerteza sobre as emissões:** Não é possível prever as mudanças nas emissões de gases de efeito estufa no futuro. Isso depende de vários fatores socioeconômicos, entre eles as mudanças demográficas, a composição das fontes de energia no futuro e o curso do desenvolvimento.
- **Concentrações de gases de efeito estufa:** As emissões não se equiparam de maneira simples às concentrações presentes na atmosfera. O CO<sub>2</sub> não sofre reações químicas na atmosfera, o que significa que tem vida relativamente longa e é eliminado apenas pelos “sumidouros”

40. Chou et al. 2002

41. Seluchi and Chou 2001; Chou et al. 2005; Bustamante et al. 2006

de carbono – os oceanos e a vegetação. Portanto, a projeção das concentrações futuras de gases de efeito estufa depende das emissões do passado, assim como das do futuro, da modelagem dos fluxos e sumidouros de carbono e de como eles podem mudar.

- **Variabilidade natural do tempo e clima:** O sistema atmosférico é caótico por natureza, o que significa que é muito sensível a mudanças mínimas que podem não ser mensuráveis. A forma como as variações naturais se desenvolvem em um modelo depende muito das condições iniciais empregadas no modelo, que não é possível conhecer perfeitamente. No entanto, à medida que nos encaminhamos para o próximo século, o ponto de partida exato deixa de ter importância com respeito às mudanças climáticas causadas pelo aumento na concentração de gases de efeito estufa.
- **Incertezas da modelagem:** Nosso conhecimento e compreensão sobre o sistema climático, assim como a nossa capacidade de modelá-lo, são limitados. Modelos construídos de forma diferente – por exemplo, com diferentes configurações de grade ou parâmetros de entrada -- produzem diferentes magnitudes e padrões de mudanças climáticas. Da mesma forma, fazer modificações na representação dos processos de um único modelo pode criar diferentes cenários climáticos no futuro.

Esses fatores, denominados “incertezas” pela comunidade científica, fazem parte de qualquer projeção de mudança climática. Por isso é importante avaliar os efeitos das incertezas listadas acima sobre a magnitude e/ou os padrões das mudanças climáticas. Uma forma de fazer isso é elaborar ou utilizar conjuntos de simulações de modelos – chamados ensembles – por meio dos quais os efeitos de diferentes fontes de incerteza possam ser analisados. Neste projeto, o foco está na avaliação dos efeitos de diferentes cenários de emissões sobre o clima do Brasil e na modelagem das incertezas.



“Incertezas” são componentes que fazem parte de qualquer projeção de mudança climática. Por isso, é importante avaliar os efeitos das incertezas sobre a magnitude e/ou os padrões das mudanças climáticas.

## Os cenários de emissão SRES (Relatório Especial sobre Cenários de Emissões)

A quantidade de gases de efeito estufa emitidos na atmosfera é de fundamental importância para as mudanças climáticas do futuro e dependerá da população e de como a produção de energia e o uso da terra são usados para manter seu estilo de vida. Esses fatores podem variar de diversas maneiras; a comunidade internacional já está analisando como as necessidades e a produção de energia podem ser alteradas de modo a gerar menos emissões, mas a implementação dessas medidas dependerá tanto do processo político internacional quanto de ações individuais. Mesmo se não forem adotadas medidas específicas para reduzir as emissões, os índices futuros são incertos, uma vez que é difícil, se não impossível, prever as mudanças que podem ocorrer em termos de população, tecnologia e situação econômica. Portanto, em vez de fazer previsões sobre as emissões futuras, os cientistas do clima analisam diversos possíveis cenários para poder avaliar as implicações de cada um deles sobre a redução de emissões e/ou sobre como lidar com as consequências.

Os modelos climáticos do IPCC utilizam um conjunto de cenários conhecido como “SRES” (Relatório Especial sobre Cenários de Emissões<sup>42</sup>). Esses cenários baseiam-se em possíveis descrições do futuro socioeconômico humano, com diferenças nas áreas econômica, tecnológica e populacional, mas sem a inclusão explícita de políticas de redução das emissões. Esses cenários estendem-se até o ano de 2100 e variam significativamente quanto às projeções de emissões que devem ocorrer até essa época (Fig. 10, à esquerda). O cenário A1FI descreve um mundo futuro de

42. Nakićenović et al. 2000

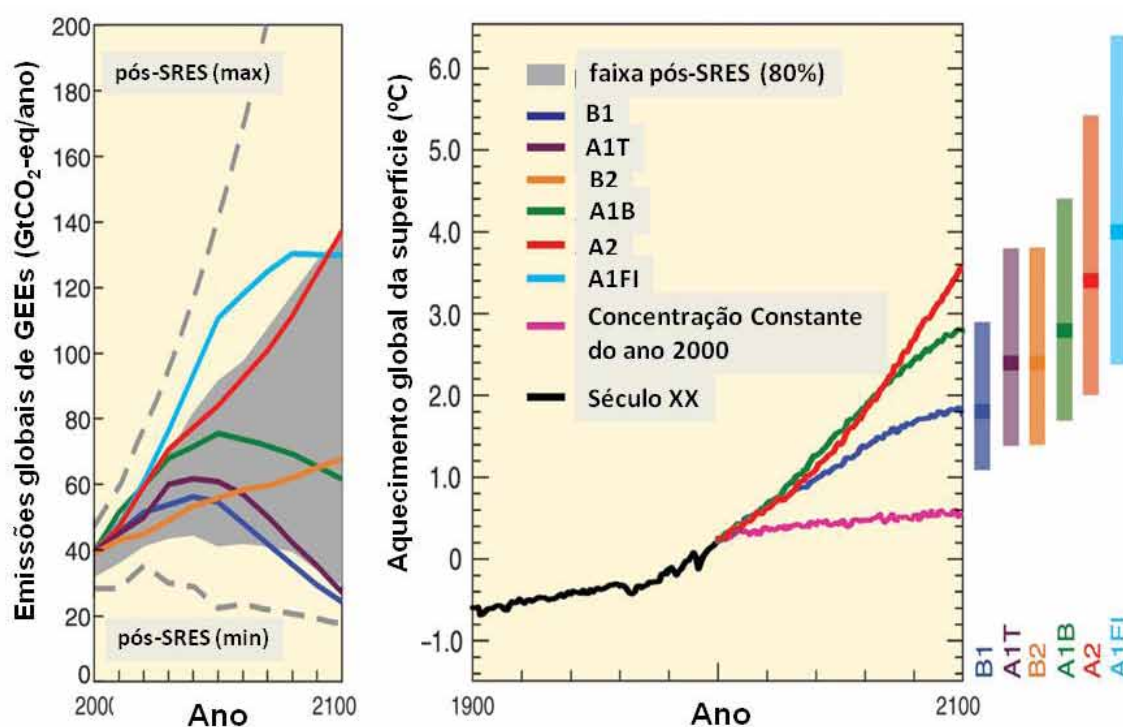


crescimento econômico muito rápido, população global que atinge o pico no meio do século e que começa a diminuir depois, com convergência entre regiões e diminuição das diferenças globais na renda per capita. Novas tecnologias são introduzidas rapidamente, porém mantendo-se o uso intensivo de combustíveis fósseis. Os cenários A1B e B1 descrevem o mesmo padrão de mudança populacional do cenário A1FI, porém, enquanto em A1B o desenvolvimento se baseia no equilíbrio das diferentes fontes de energia, o cenário B1 dá ênfase muito maior a tecnologias limpas e uso eficiente de recursos. As emissões no cenário A1FI desenvolvem-se mais rapidamente durante o século XXI, as emissões do cenário B1 são relativamente baixas e as do cenário A1B situam-se num meio termo. O efeito de adotar esses diferentes cenários de emissões (isto é, forçando os modelos com concentrações de GEEs, convertidos dos cenários de emissões a concentrações por modelos ciclo de carbono) leva a diferentes aumentos projetados na temperatura média global da superfície no século XXI (Fig. 10, à direita).

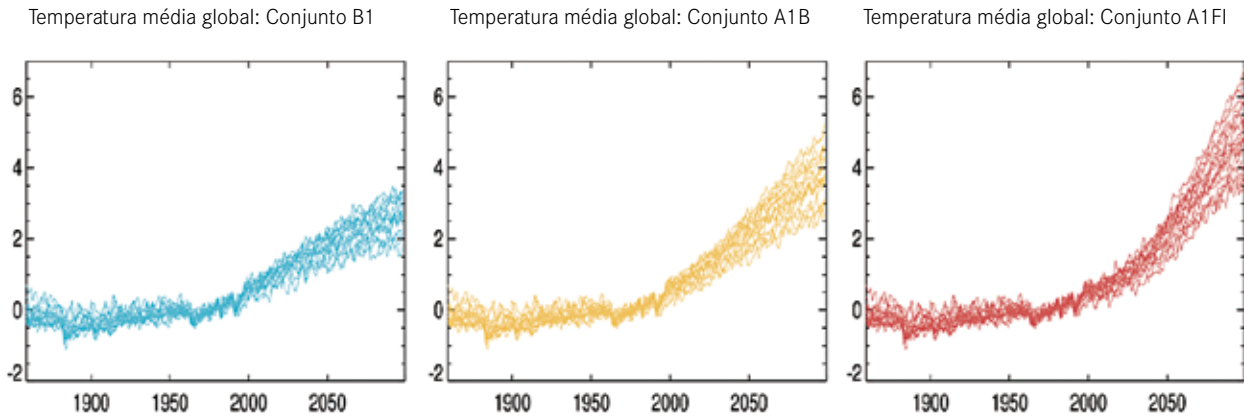
## As incertezas da modelagem

Uma forma de compreender os possíveis cenários climáticos futuros resultantes de diferentes modelos foi exemplificada pelo processo IPCC, que criou efetivamente um conjunto (ensemble) de modelos provenientes de diversos centros de pesquisa do mundo todo. Cada centro de pesquisa climática desenvolve seus modelos de forma diferente, por exemplo, quanto à representação da física do modelo ou a resolução da grade. As projeções resultantes podem ser comparadas e/ou combinadas para que se possa compreender como essas diferenças afetam a simulação do clima em todo o globo.

Desenvolvidos pelo MOHC e utilizados para simulações do clima futuro de acordo com diferentes cenários SRES de concentrações de gases de efeito estufa, os PPEs (Perturbed Physics Ensembles) também fazem parte dos conjuntos de múltiplos modelos do IPCC. Trata-se de uma abordagem inovadora de como avaliar sistemati-



**Figura 10:** Painel à esquerda: Emissões globais de GEEs (em GtCO<sub>2</sub>) na falta de políticas climáticas: seis cenários ilustrativos de SRES (linhas coloridas) e a faixa de percentil 80 de cenários recentes publicados desde o SRES (pós-SRES) (área cinza sombreada). As linhas pontilhadas mostram a gama completa de cenários desenvolvidos pós-SRES. As emissões incluem CO<sub>2</sub>, metano, óxido nitroso e gases fluorados. Painel à direita: As linhas cheias representam as médias globais de aquecimento da superfície usadas em diversos modelos nos cenários A2, A1B e B1, exibidas como continuação das simulações do cenário do século XX. Essas projeções levam em consideração também as emissões de GEEs de curta duração e de aerossóis. A linha rosa não representa um cenário, mas sim simulações de GCMs (modelos climáticos globais) em que as concentrações atmosféricas são mantidas constantes em valores do ano 2000. As barras do lado direito da figura indicam a melhor estimativa (linha cheia dentro de cada barra) e a provável faixa avaliada para os seis cenários SRES de 2090 a 2099. Todas as temperaturas referem-se ao período de 1980 a 1999. Fonte: IPCC AR4 Synthesis Report, sua Figura SPM.5.



**Figura 11:** Aumento da temperatura média global (em °C, relativo aos valores basais de 1961 a 90) em três cenários de emissões: B1 (esquerda), A1B (centro) e A1FI (direita). O histórico das simulações é idêntico em todos os três casos: cenários de emissões são aplicados a partir do início do século 21. As linhas individuais indicam execuções de modelos com diferentes combinações de parâmetros. Existem 17 variantes do mesmo modelo climático (HadCM3) e cada uma delas foi executada em três cenários de emissões. Algumas variantes mostram maior sensibilidade (isto é, maior aquecimento com o mesmo forçamento de gases de efeito estufa) que outras, produzindo propagação do aquecimento. Em cenários de concentrações mais altas, as mudanças nas temperaturas médias globais são maiores do que em cenários de concentrações mais baixas.

camente as incertezas da modelagem, diferente do processo do IPCC, que pode ser considerado uma maneira mais adequada de analisar as incertezas. Cada PPE é composto de variantes de um único modelo global. Como mencionado anteriormente, nem todos os processos podem ser simulados em detalhes em um modelo climático, e seus efeitos gerais têm de ser aproximados. Um processo (por ex., a taxa de queda de gelo de uma nuvem) é representado por um parâmetro que é definido pelos especialistas como um valor específico, mas que, na realidade, poderia situar-se dentro de um intervalo de valores possíveis. Em um PPE, que é um projeto experimental envolvendo o uso intenso do computador, os valores dos parâmetros-chave são ajustados dentro de suas possíveis faixas, gerando diferentes combinações. O efeito de executar o modelo com essas diferentes combinações causa variações nas projeções de mudanças climáticas. As variantes do modelo que são mais sensíveis ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa simulam maiores aumentos na temperatura global do que as variantes menos sensíveis. Isso significa que, para um único cenário SRES de concentrações de gases de efeito estufa, existe uma faixa no nível de aquecimento global (Fig. 11).

Cada PPE do MOHC abrange o modelo climático padrão HadCM3 juntamente com 16 variantes desse modelo, fornecendo conjuntos com 17 membros. Três conjuntos foram produzidos e executados de acordo com um cenário de emissões baixas (SRES B1), médias (SRES A1B) e altas (SRES A1FI) de concentração de gases de efeito de estufa. Por meio deste projeto experimental, é possível analisar a incerteza tanto na trajetória das emissões como nas configurações dos parâmetros do modelo.

O reconhecimento da existência e a inclusão de incertezas nas projeções das mudanças climáticas não eliminam sua utilidade. Pelo contrário, essas projeções fornecem informações altamente valiosas se forem comunicadas de maneira eficiente aos usuários. As pessoas que tomam decisões em geral têm de lidar com informações incertas ou incompletas. Portanto, para tomar decisões fundamentadas, é importante compreender melhor as fontes de incerteza. Além disso, é preciso garantir respaldo para a avaliação dos efeitos dessas incertezas, impondo limites à faixa das possíveis condições climáticas do futuro para expressar os riscos do clima. A inclusão das incertezas não apenas representa mais adequadamente o estado atual do conhecimento sobre o clima futuro como também fornece a base para a tomada de decisões sobre mitigação dos efeitos, assim como a estrutura para o planejamento das adaptações necessárias.



A inclusão das incertezas representa de forma mais adequada o estado atual do conhecimento sobre o clima futuro, fornecendo também a base para a tomada de decisões sobre mitigação dos efeitos, assim como a estrutura para o planejamento das adaptações necessárias.

## A avaliação da incerteza nas projeções de modelos regionais

Uma simulação de modelo regional do Eta-CPTEC, baseada no modelo global HadCM3 do MOHC, fornece uma projeção plausível das mudanças climáticas na região, com resolução espacial potencialmente valiosa para a avaliação dos impactos. O estágio seguinte é considerar os efeitos que as incertezas conhecidas têm sobre as projeções de mudanças climáticas no Brasil.

Uma forma de avaliar qualitativamente os efeitos das incertezas sobre as projeções é executar conjuntos de modelos climáticos regionais. Porém, além dos custos computacionais, existem limitações significativas para isso. Além disso, uma vez que o modelo regional requer o uso de dados do entorno obtidos dos modelos globais, a execução dos conjuntos depende de haver dados apropriados na resolução temporal correta.

Durante o projeto DCC, selecionou-se um subconjunto de quatro modelos globais do modelo HadCM3 A1B PPE do Centro Hadley para servir de orientação ao modelo regional do Eta-CPTEC. Esses modelos foram selecionados durante a visita de um cientista do INPE ao Centro Hadley. Em primeiro lugar, eles foram selecionados do cenário A1B apenas porque os dados dos outros cenários não estavam disponíveis. Uma vez que havia apenas um cenário de emissões disponível, era importante selecionar modelos que abrangessem a faixa de incertezas presentes naquele conjunto (Fig. 8) e, ao mesmo tempo, simulassem razoavelmente bem o clima atual do Brasil. Com essa finalidade, foram selecionados modelos de alta, média e baixa sensibilidades, juntamente com o modelo “não perturbado” padrão.

## Redimensionamento de padrões: Avaliação das implicações das incertezas sobre as emissões e a sensibilidade climática

Ao mesmo tempo que um pequeno conjunto de projeções do modelo regional Eta-CPTEC regional era executado de acordo com o cenário de emissões A1B do SRES, este projeto buscava desenvolver uma forma de colocar limites às projeções do modelo regional que abrangiam a gama completa de incertezas nos PPEs do modelo global. Para isso, adotou-se uma abordagem eficiente de avaliação das incertezas das projeções regionais de mudanças climáticas. Denominada “redimensionamento de padrões (pattern scaling)”, essa abordagem baseia-se na premissa de que um padrão regional de mudança de uma determinada variável climática de interesse – por exemplo, a temperatura ou a precipitação pluviométrica – tem relação com a mudança na temperatura média global.<sup>43</sup> Dessa forma, se mudarmos o nível de aquecimento médio global, poderemos redimensionar a resposta regional de maneira correspondente. É preciso ter em mente que, como técnica estatística, o redimensionamento de padrões tem suas falhas. Uma delas é que a técnica pode não refletir a faixa de resposta regional e outra é que talvez ela não capture as não linearidades significativas ou o comportamento limiar no sistema terrestre que poderiam ocorrer durante o aquecimento global, tais como os feedbacks de grande escala da superfície terrestre-atmosfera. Porém, o uso das técnicas de redimensionamento está aumentando, suas aplicações estão sendo definidas e refinadas, e é provável que sejam usadas intensamente no próximo relatório do IPCC (Quinto Relatório de Avaliação) para serem intercaladas entre as simulações do modelo global.

Este projeto contou também com uma faixa de mudanças de temperaturas globais dos PPEs do modelo global do MOHC, que abrange a incerteza nos cenários de emissões e nas configurações dos parâmetros do modelo (Fig. 12). Um desses modelos globais (forçado com o cenário A1B de concentração de gases de efeito estufa) serviu

43. Huntingford and Cox 2000; Mitchell 2003; Harris et al. 2006; Giorgi 2008

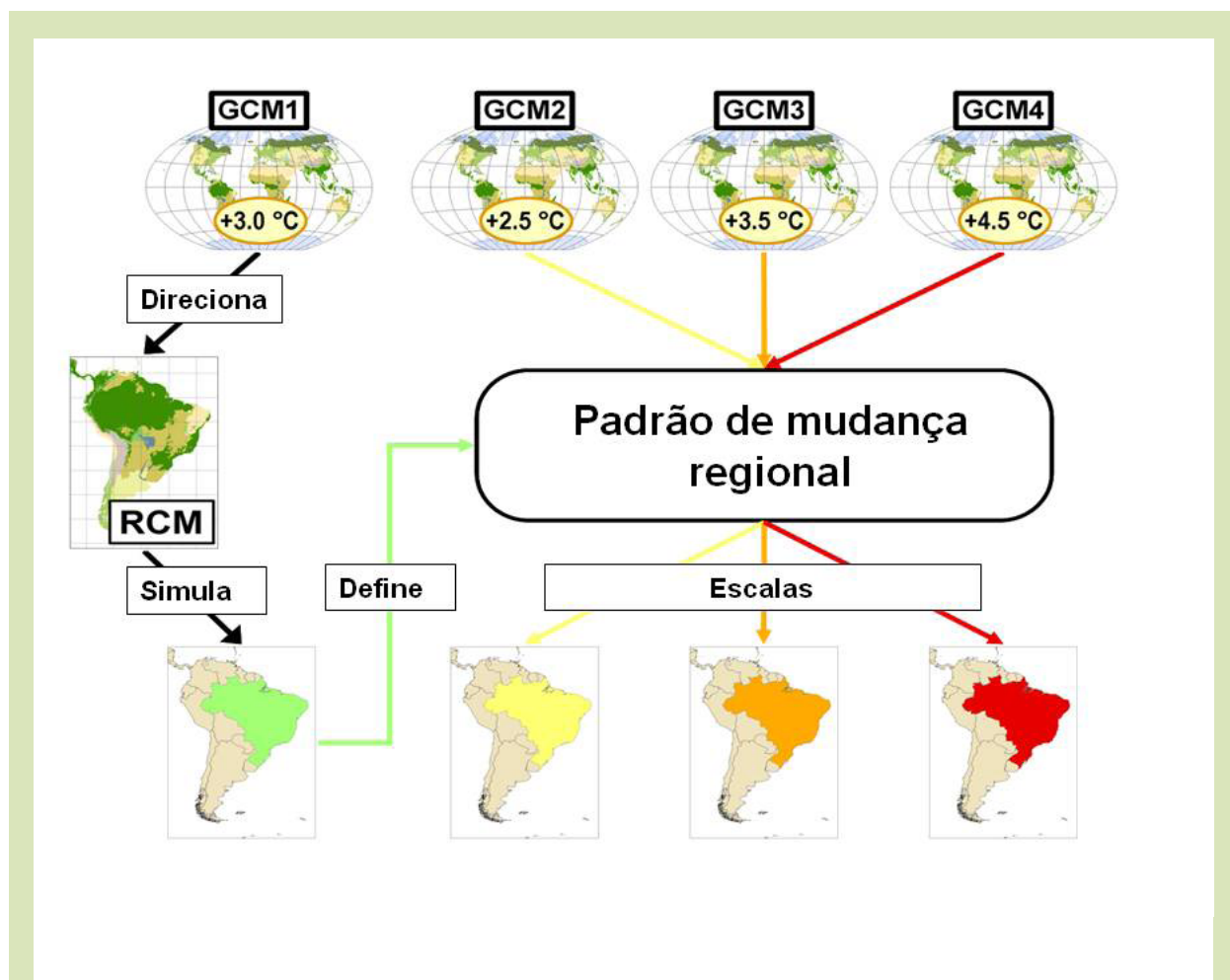


de orientação para o modelo regional, e o uso da mudança na temperatura global naquele modelo, juntamente com as mudanças regionais simuladas pelo Eta-CPTEC, gerou um padrão de mudança que faz a conexão entre os dois. Em seguida, esse padrão foi redimensionado para o aquecimento global nos outros modelos. Esse processo, resumido na Figura 10, for-

nece três conjuntos (cenários de emissões baixas, médias e altas) de 17 projeções de mudanças regionais redimensionadas.

Uma vez que depende do redimensionamento de uma resposta regional a diferentes níveis de aquecimento global, essa técnica de ajuste dos padrões não pode substituir a capacidade das combinações GCM-RCM de simular as pos-

síveis variações nas respostas regionais. No entanto, a técnica pode ser vista como um valioso complemento que permite a avaliação da incerteza resultante de diferentes cenários de emissões e níveis de aquecimento global. O resultado é uma faixa de projeções de mudanças climáticas necessária para a avaliação dos riscos climáticos.



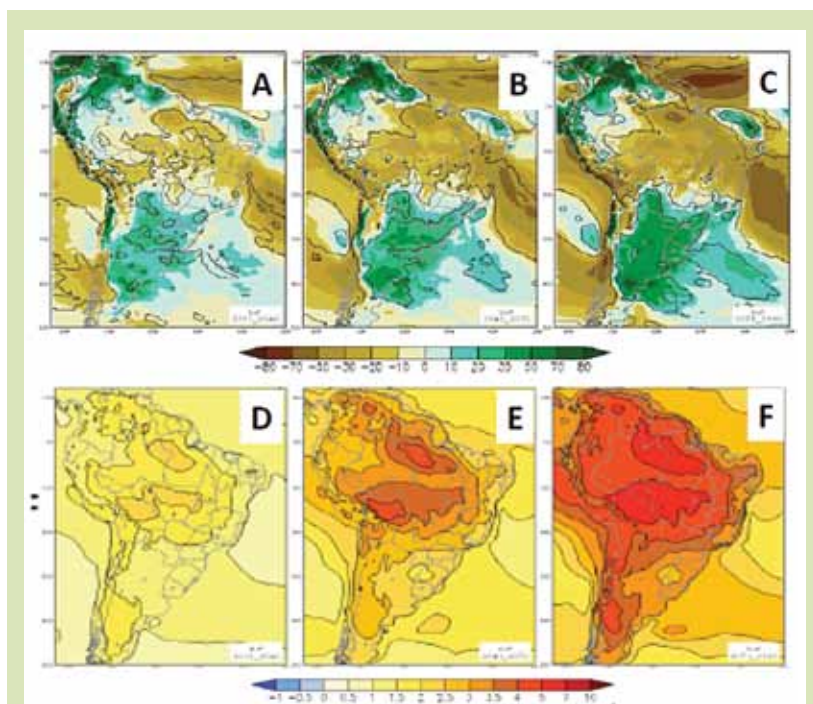
**Figura 12:** Desenho esquemático da abordagem de redimensionamento de padrões desenvolvida para este projeto. Primeiro, os dados do GCM 1 (MOHC) são usados para servir de orientação a um RCM ou Modelo Climático Regional) de alta resolução (Eta-CPTEC) que simula as mudanças climáticas durante o século XXI. A relação entre as mudanças regionais e o aquecimento de larga escala em GCM 1 (neste exemplo, 3,0 °C) é resumida pelo cálculo de um "Padrão de Mudança Regional". Uma vez estabelecido, o Padrão de Mudança Regional pode ser aplicado ao aquecimento nos outros GCMs para produzir uma faixa de mudanças regionais redimensionadas. Os valores do aquecimento global são apenas ilustrativos.

## 2 Clima futuro e avaliação das incertezas sobre as mudanças climáticas na Amazônia

(J. Marengo, S. Chou, G. Kay, L. Betts, L. Alves)

### Projeções das mudanças climáticas na Amazônia

A Figura 13 mostra as mudanças nas precipitações pluviométricas e nas temperaturas da região da América do Sul projetadas para o século XXI pelo modelo climático de alta resolução do Eta-CPTEC. À medida que avançamos no século, as mudanças projetadas se tornam maiores. No domínio da América do Sul, a previsão é de que, no futuro, certas áreas se tornarão mais úmidas e outras, mais secas (Fig. 13a-c). Com relação à Amazônia, as projeções são de grandes reduções percentuais nas precipitações pluviométricas e de elevação da temperatura do ar, com mudanças mais acentuadas depois de 2040. Quanto às temperaturas (Fig. 13 d-f), a projeção de aquecimento para as regiões tropicais varia de 1 °C a 2 °C em 2010-40 até 6 °C a 8 °C em 2071-2100, com os maiores aumentos ocorrendo na Região Amazônica.

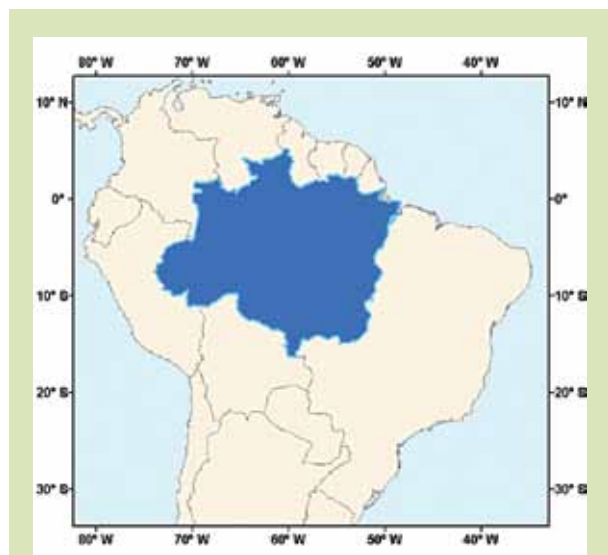


**Figura 13:** Mudanças nas precipitações pluviométricas (a-c, %) e nas temperaturas do ar (d-f, °C) na América do Sul, em dezembro-janeiro-fevereiro de 2010-40 (coluna 1), 2041-70 (coluna 2) e 2071-2100 (coluna 3) em comparação com os dados de 1961-90 extraídos da regionalização (downscaling) do modelo HadCM3, usando-se o modelo regional Eta-CPTEC com resolução de 40 km. Os mapas representam a média de 4 das 17 projeções de mudanças regionais redimensionadas. Fonte: Marengo et al. 2010b.

\* Na Amazônia, as projeções são de grandes reduções percentuais na precipitação pluviométrica e de elevações da temperatura do ar, com mudanças mais acentuadas depois de 2040.

## Avaliação das incertezas sobre as mudanças climáticas

A abordagem de redimensionamento de padrões (pattern scaling) para avaliar as incertezas descritas na Seção 5 é aplicada aqui às projeções do Eta-CPTEC de mudanças climáticas médias na bacia hidrográfica da Amazônia brasileira (Fig. 14).

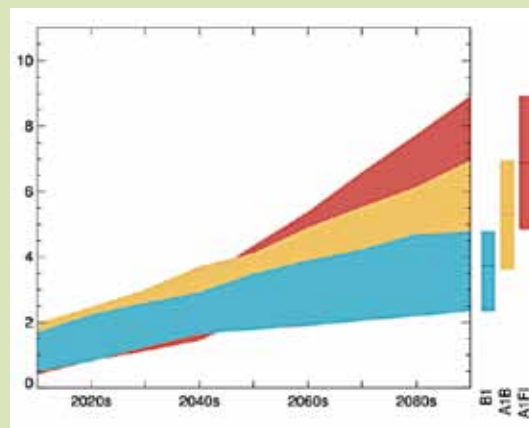


**Figura 14:** Bacia hidrográfica da Amazônia brasileira, na qual se baseia a avaliação das incertezas sobre as projeções de mudanças climáticas.

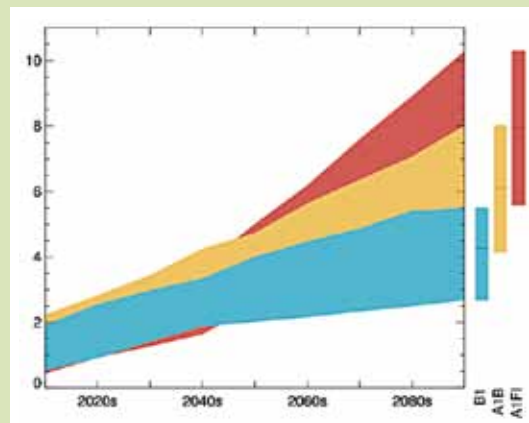
A análise gerou quatro conjuntos de 17 projeções ao longo do século XXI para a bacia hidrográfica da Amazônia brasileira. O diagrama abaixo (Fig. 15) mostra as mudanças nas temperaturas anuais médias, máximas e mínimas em relação às condições médias dos anos de 1961 a 1990.

Os exemplos aqui apresentados referem-se às mudanças na temperatura média anual; são simulados aumentos em todos os casos para cada estação do ano. Observa-se que as temperaturas máximas durante o dia aumentam mais que as temperaturas mínimas durante a noite. A previsão é de maiores elevações de temperatura nos cenários de emissões mais altas do que nos cenários de emissões mais baixas. Existe um certo nível de sobreposição entre as faixas de projeção (Fig. 15), significando que os modelos de maior sensibilidade de um cenário de emissões baixas geram mudanças similares às dos modelos de um cenário de emissões mais altas. No entanto, o aumento da concentração de gases de efeito estufa deve ser considerado um fator gerador de mudanças no conjunto completo de projeções.

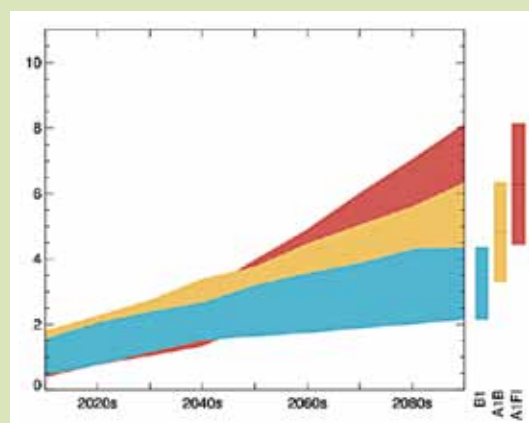
a)



b)



c)



**Figura 15:** Projeções de mudança na a) temperatura média anual (°C), b) média de temperatura máxima diária e c) média de temperatura mínima diária na bacia do Rio Amazonas durante o século XXI, em comparação com dados de 1961 a 1990. A cor azul indica a faixa gerada pelos 17 modelos do conjunto de cenários de emissões baixas (B1); a cor laranja, o cenário de emissões médias (A1B) e a cor vermelha, o cenário de emissões altas (A1FI). As barras laterais representam a faixa de incerteza das projeções ao final do século 21, e a linha horizontal mais escura indica o valor médio do conjunto.



**Tabela 1:** Limites inferiores e superiores da faixa das elevações projetadas na temperatura média anual (°C) na Amazônia na década de 2090 comparados aos valores de 1961-90 em cada cenário de emissões, conforme mostra a Fig. 15 (a).

CENÁRIO	AQUECIMENTO MÍNIMO	AQUECIMENTO MÁXIMO
B1	2,3	4,8
A1B	3,6	7,0
A1FI	4,9	8,9

Tomando-se como exemplo as elevações da temperatura média anual na Bacia Amazônica, a incerteza nas mudanças projetadas com base na física do modelo e no cenário de emissões gera uma faixa de possíveis aumentos até o final do século, correspondendo a pouco mais de 2 °C sobre os valores de referência no limite inferior e de 9 °C no limite superior (Tabela 1). As elevações de temperatura podem começar a ter impactos sobre diferentes aspectos das atividades e do bem-estar das pessoas em diferentes limiares, como saúde, infraestrutura e demanda de energia elétrica.



Esta análise gera uma faixa do possível aquecimento da Amazônia até o final do século, que corresponde a pouco mais de 2 °C sobre os valores de referência no limite inferior e de 9 °C no limite superior. As elevações de temperatura podem começar a afetar as atividades e o bem-estar das pessoas em diferentes limiares, como saúde, infraestrutura e demanda de energia elétrica.

Para a tomada de decisões quanto às mudanças climáticas, é fundamental ter acesso a informações não apenas sobre as alterações de temperatura, mas também de possíveis mudanças nas precipitações pluviométricas e suas implicações para os recursos hídricos no futuro. O resultado gerado por esse modelo em particular (Fig. 13) indica reduções percentuais significativas das chuvas no verão (dezembro a fevereiro) por volta do final do século XXI. Entretanto, as diminuições na quantidade de chuvas são projetadas para o ano todo, não apenas para o verão. É sempre importante analisar os resultados no contexto das projeções geradas por outros modelos,

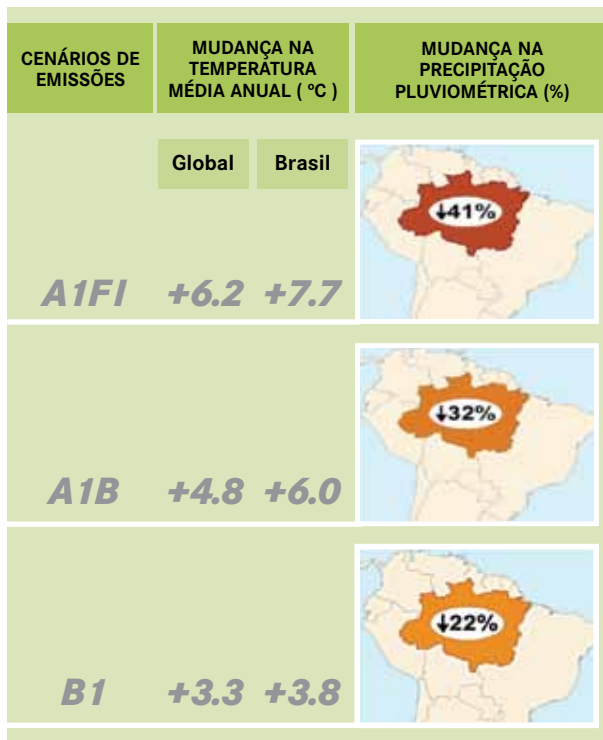
bem como observar que, ao contrário de outros modelos climáticos globais (GCMs), o modelo HadCM3 simula seca intensa em toda a Amazônia durante o século XXI. Como mostra a Figura 7, as projeções de precipitações pluviométricas na Amazônia geram grande incerteza, uma vez que variam de grandes aumentos a grandes reduções no volume de chuvas. O modelo HadCM3 situa-se no limite extremo de seca do grupo de projeções de multimodelos.

**Tabela 2:** Limites inferiores e superiores da faixa das mudanças percentuais projetadas para as precipitações médias anuais na Amazônia na década de 2090 em comparação com os valores de 1961-90, em cada cenário de emissões.

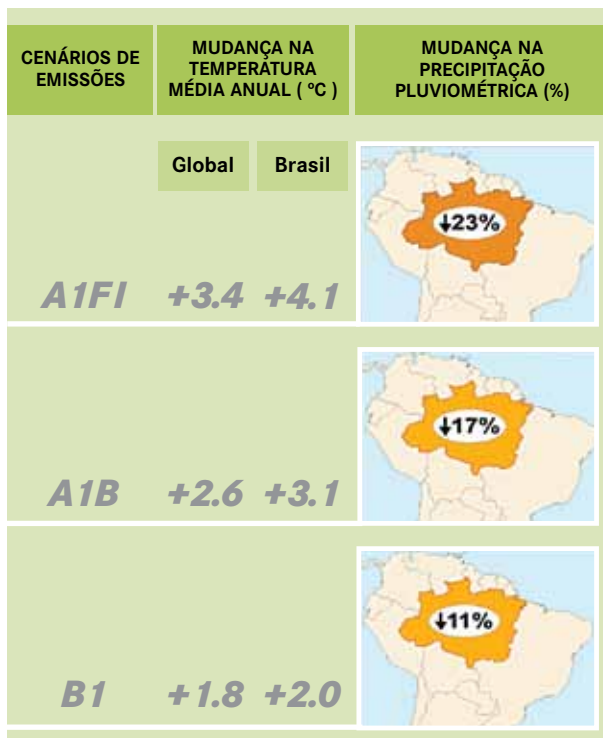
CENÁRIO	% MÍNIMA DE MUDANÇA NA PRECIPITAÇÃO	% MÁXIMA DE MUDANÇA NA PRECIPITAÇÃO
B1	-11,4	-22,2
A1B	-17,0	-31,8
A1FI	-22,5	-40,6

Na Amazônia, a redução nas precipitações pluviométricas anuais fica entre aproximadamente 10% e 20% na última década do século, no cenário de baixas emissões. No cenário A1FI de concentrações de gases de efeito estufa, esses números sobem para uma redução de 20% a 40% nas chuvas (Tabela 2). A Figura 16 mostra as mudanças no volume de chuvas na Amazônia na década de 2090 em um modelo de alta sensibilidade (figura superior) e um modelo de baixa sensibilidade (figura inferior) desses três conjuntos (cenários de altas, médias e baixas emissões) de projeções redimensionadas. Essas projeções são apresentadas juntamente com a projeção de aquecimento global do conjunto de modelos globais (ensemble) e a correspondente elevação de temperatura redimensionada em todo o Brasil. A noção descrita acima de uma mudança no conjunto de projeções em diferentes cenários de emissões é clara, com os modelos de alta sensibilidade projetando mudanças maiores que os modelos de baixa sensibilidade. Tomados em conjunto, os valores demonstram a faixa completa das incertezas analisadas neste trabalho: do “cenário de melhor caso” (cenário B1, modelo de baixa sensibilidade) ao “cenário de pior caso” (cenário A1FI, modelo de alta sensibilidade).

a)



b)



**Figura 16:** Mudança climática média anual projetada para o Brasil para a década de 2090 comparada com os valores de 1961-1990 em a) modelo de alta sensibilidade e b) modelo de baixa sensibilidade, associados a diferentes cenários de emissões: altas (A1FI, fileira 1), médias (A1B, fileira 2) e baixas (B1, fileira 3).

Essas mudanças projetadas podem ter profundas implicações para o futuro dos recursos hídricos, a ocorrência e propagação de incêndios e os correspondentes impactos no Brasil.

Essas informações fornecem subsídios para os sistemas de tomada de decisões. A variação dentro de um cenário de emissões oferece parâmetros sobre possíveis mudanças que podem funcionar como uma estrutura para o planejamento de diferentes ações de resposta. Por exemplo, diversos setores como energia, indústria ou saúde podem ser sensíveis a determinadas características ou extremos climáticos. Por essa razão, ter acesso a uma variedade de possíveis futuros climáticos permite avaliar cuidadosamente as medidas de adaptação apropriadas para o nível da mudança.



À medida que aumentam as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera nos cenários de emissões altas, as mudanças climáticas projetadas para o Brasil tornam-se mais acentuadas.

À medida que aumentam as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera nos cenários de emissões altas, as mudanças climáticas projetadas para o Brasil tornam-se mais acentuadas. As diferenças nas respostas às concentrações de gases de efeito estufa em cada cenário de emissões tornam-se acentuadas apenas na segunda metade do século (Fig. 15), o que indica que os benefícios das decisões de mitigação adotadas agora podem ser sentidos só mais para o final do século.

As projeções climáticas futuras que incluem incertezas representam uma dupla vantagem para a tomada de decisões. Em primeiro lugar, demonstram possíveis futuros climáticos em ambos os extremos do intervalo, o que poderia servir de subsídio para as políticas de mitigação. Em segundo lugar, servem como estrutura sobre a qual é possível elaborar estratégias de adaptação apropriadas ao nível de resposta climática.


# 3 Desmatamento, mudança no uso da terra e clima

(C. Nobre, G. Sampaio, G. Kay, R. Betts)

## Mudanças climáticas, *die-back* da Floresta Amazônica e impactos

Como mostram os resultados do projeto DCC descrito acima, as mudanças climáticas podem ter sérias consequências para a Floresta Amazônica e para as populações – locais e remotas – que dependem dela. Trabalhos anteriores indicam que, com as alterações climáticas, a floresta pode desaparecer e ser substituída por um tipo de vegetação diferente. Esses experimentos foram feitos de maneiras diferentes. Conforme descrito na Seção 4, a integração de um modelo de dinâmica da vegetação a um modelo climático é uma ciência nova e, à medida que mais modelos da nova geração incluem esse componente, melhor se pode entender a dinâmica entre as alterações climáticas e a vegetação. Outros estudos utilizaram as projeções de mudanças climáticas como dados de entrada em modelos de vegetação

independentes para descobrir que tipo de vegetação seria esperado – a “vegetação potencial” – em um novo clima.

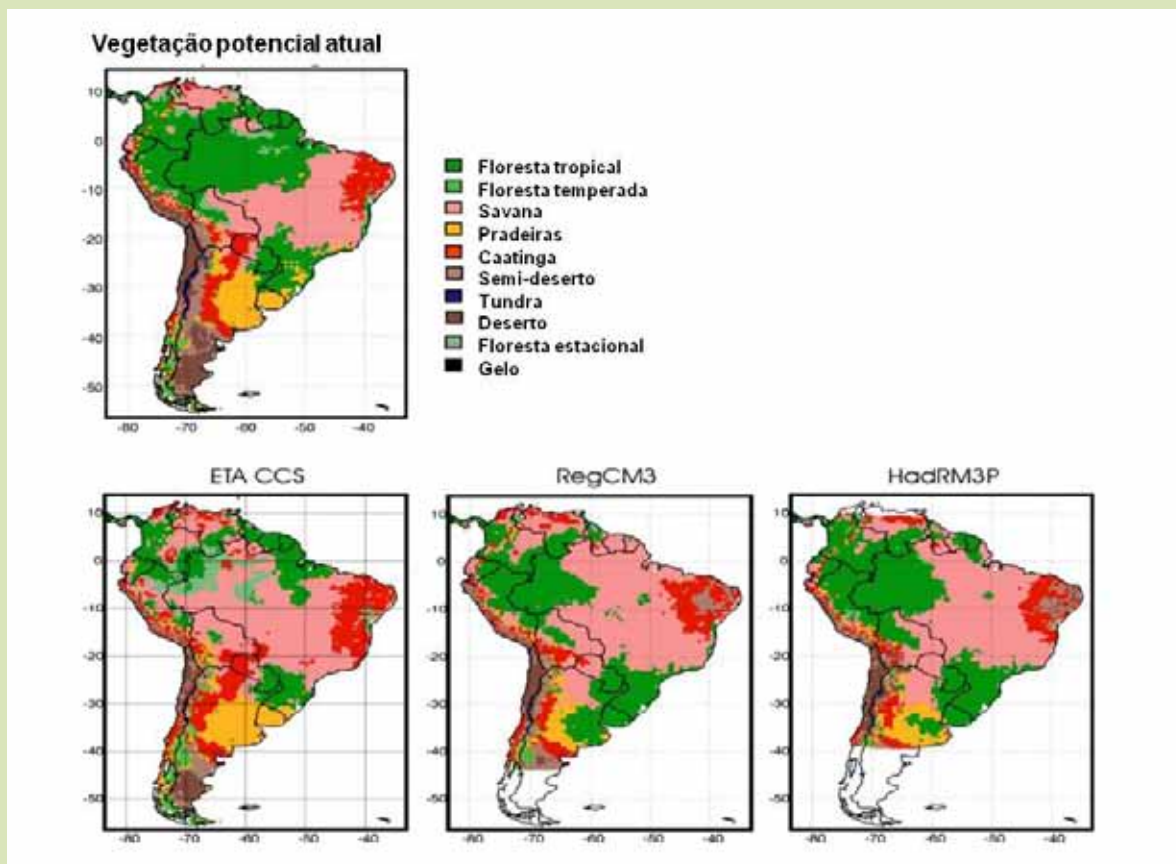
 Como mostram os resultados do projeto DCC descrito acima, as mudanças climáticas podem ter sérias consequências para a Floresta Amazônica e para as populações – locais e remotas – que dependem dela.

A Figura 17 mostra os resultados de um desses estudos <sup>44</sup>, que usou o Modelo de Vegetação Potencial do CPTEC/INPE (CPTEC-PVM) com as projeções de três modelos climáticos diferentes (para avaliar o grau de incerteza nas projeções dos modelos, consulte a Seção 5: Avaliação do grau de incerteza dos modelos de mudanças climáticas) a partir de um cenário de altas emissões (SRES A2). O estudo compara

a distribuição dos tipos de vegetação simulados sob o clima atual com a que ocorreria no final do século (2070-2099). Todos esses modelos mostram, em maior ou menor grau, que a floresta tropical (cor verde na Fig. 17) desapareceria na Amazônia sob as condições do novo clima, sendo substituída pela savana (cor rosa). Essas mudanças poderiam ser explicadas pelos efeitos do aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, elevação da temperatura e redução da precipitação pluviométrica, de modo que a estação de seca se tornaria mais longa. Sob essas condições, a floresta tropical torna-se menos viável e é substituída no modelo por vegetação do tipo savana. No entanto, esse modelo de vegetação não inclui o efeito fertilizante do CO<sub>2</sub>.

44. Salazar 2009





**Figura 17:** Distribuição projetada dos biomas na América do Sul para o período de 2070-2099 a partir de três modelos climáticos: ETA CCS, RegCM3 e HadRM3P executados em um cenário de emissões A2. O gráfico de cima, à esquerda, representa os biomas potenciais atuais (biomas em equilíbrio com o clima observado). Fonte: Salazar, 2009.

As interações entre floresta, clima e CO<sub>2</sub> são complexas. Há indicações de que a floresta ganhou biomassa nas últimas décadas, possivelmente por causa da fertilização da vegetação sob maiores concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>.<sup>45</sup>

Pesquisas posteriores, que atualizaram os experimentos descritos acima usando uma nova versão do modelo de vegetação (CPTEC-PV2) com base em uma faixa de modelos climáticos globais (GCMs), indicam que os efeitos de fertilização do CO<sub>2</sub> podem ser maiores.<sup>46</sup> O novo estudo mostra que, quando a fertilização pelo CO<sub>2</sub> é incluída junto com as mudanças no clima, a distribuição resultante dos biomas simulados não é muito

diferente da atual. Contudo, quando a estação de seca excede quatro meses na simulação, como é o caso do modelo HadCM3, a Floresta Amazônica é amplamente substituída por biomas mais secos como a savana ou o cerrado, independentemente do efeito fertilizante do CO<sub>2</sub>. O modelo do Centro Hadley que projetou o *die-back* (colapso) da Amazônia, o HadCM3LC, e que tem um modelo de dinâmica da vegetação integrado, mostra que a floresta provavelmente continuará ganhando biomassa por algum tempo no futuro, pois as concentrações de CO<sub>2</sub> continuam a aumentar. Entretanto, nesse modelo em particular, as projeções indicam que as mudanças

climáticas causadas pelas emissões de gases de efeito estufa começam a suplantam o efeito de fertilização e as árvores começam a morrer (Fig. 8).

✳ A degradação ou diminuição da Floresta Amazônica em decorrência das mudanças climáticas provavelmente trará sérias consequências para os habitantes locais e das imediações – perda de biodiversidade, regulação das chuvas, influência sobre o balanço de carbono e todos os serviços de ecossistema que a floresta oferece.

45. Phillips et al. 2008

46. Lapola et al. 2009

A degradação ou diminuição da Floresta Amazônica em decorrência das mudanças climáticas provavelmente trará sérias consequências para os habitantes da região e de fora – perda de biodiversidade, regulação das chuvas, influência sobre o balanço de carbono e todos os serviços de ecossistema que a floresta oferece (Seção 1). É preciso lembrar, no entanto, que esses modelos de clima e vegetação estão sujeitos a grandes incertezas e, embora os modelos HadCM3 do Centro Hadley da Agência de Meteorologia tendam à intensificação do aquecimento e das secas na Amazônia, outros modelos não.



As mudanças climáticas poderão ter efeitos prejudiciais graves – ainda que incertos – sobre a Floresta Amazônica no longo prazo, mas o desmatamento direto representa uma ameaça imediata.

As mudanças climáticas poderão ter efeitos prejudiciais graves – ainda que incertos – sobre a Floresta Amazônica no longo prazo, mas o desmatamento direto representa uma ameaça imediata.



Foto: Stock.xchng

## Desmatamento na Amazônia

A redução do desmatamento traria benefícios imediatos em termos de mitigação das emissões globais de gases de efeito estufa. Além disso, efeitos similares sobre o clima regional, possíveis nos cenários de *die-back* (colapso) da floresta, podem se aplicar ao desmatamento direto. Assim como influencia o ciclo hidrológico na região, a remoção de grandes áreas de floresta alteraria as trocas de calor na superfície, de modo que a temperatura superficial também seria alterada. Tanto as observações quanto os estudos de modelagem indicam que o desmatamento em grande escala deixaria o clima regional mais quente e um pouco mais seco. Os resultados dos modelos<sup>47</sup> sugerem que, quando o desmatamento atinge mais de 40% da extensão original da Floresta Amazônica, a precipitação pluviométrica diminui de forma significativa no leste da

Amazônia (Fig. 18). O desmatamento completo poderia provocar um aquecimento de mais de 4 °C no leste da Amazônia e as chuvas de julho a novembro poderiam diminuir em até 40%.

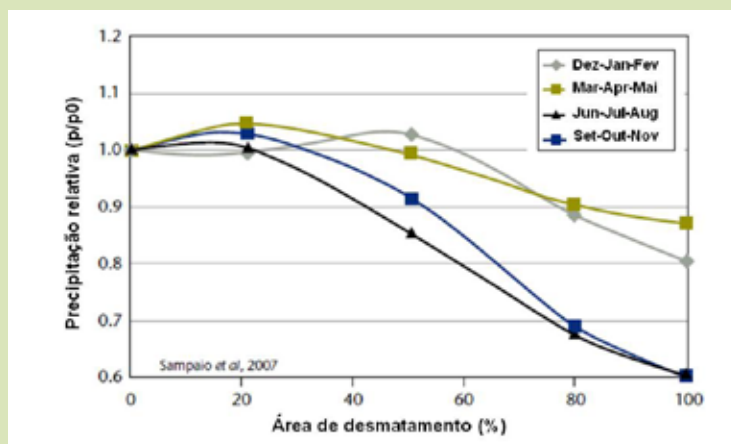
E, o que é mais importante, essas mudanças viriam somar-se a qualquer mudança resultante do aquecimento global. Foi sugerido que a taxa de 40% de desmatamento (Fig. 18) poderia ser um tipping point (ponto sem retorno), ou seja, o ponto além do qual a perda florestal provoca impactos no clima que, por sua vez, causam mais perda florestal.<sup>48</sup>

Um aquecimento global de 3 °C a 4 °C também poderia levar a um tipping point similar.<sup>49</sup> Embora a existência desses pontos ainda precise ser esclarecida, interações entre as mudanças climáticas e o desmatamento podem torná-los mais prováveis.

47. Sampaio et al. 2007; Sampaio 2008

48. Sampaio et al. 2007

49. Nobre and Borma 2009



**Figura 18:** Impactos simulados do desmatamento sobre a precipitação pluviométrica na Amazônia. As curvas mostram a fração de precipitação no leste da Amazônia para diferentes níveis de desmatamento em toda a Amazônia, em comparação com a extensão original da floresta, para cada estação. No modelo, a terra desmatada foi convertida em plantações de soja. Fonte: Sampaio et al, 2007.

★ A taxa de 40% de desmatamento poderia ser um tipping point (ponto sem retorno), ou seja, o ponto além do qual a perda florestal provoca impactos no clima que, por sua vez, causam mais perda florestal. Um aquecimento global de 3 °C a 4 °C também poderia levar a um tipping point similar.

No projeto DCC, pela primeira vez um modelo de vegetação foi integrado a um modelo de clima regional. Isso foi feito com base no modelo global que deu o resultado de *die-back* da Floresta Amazônica (Seção 4) e inclui um novo modelo de terra-superfície e de dinâmica da vegetação. Ou seja, em vez de haver um tipo de terra atribuído a cada célula da grade, pode haver até nove, sendo cinco classes de vegetação e quatro de outros itens. Cada um deles tem seus próprios fluxos e propriedades entre a superfície da terra, a subsuperfície e a atmosfera. Com esse esquema, a vegetação não permanece mais fixa, pois os tipos de ve-

getação podem competir e mudar de um para outro à medida que as condições climáticas se alteram, tornando-se mais ou menos viáveis.

Isso possibilita avaliar os possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre a vegetação em mais detalhes e continuar alimentando e modificando o clima regional. Além disso, permite que cenários<sup>50</sup> de desmatamento realistas, fornecidos pelo projeto DDC, sejam aplicados ao modelo para pesquisar os efeitos do desmatamento sobre o clima regional e a vegetação remanescente.

A perda da Floresta Amazônica no curto prazo pelo desmatamento direto ou no longo prazo pelas mudanças climáticas poderia ter impactos generalizados, alguns dos quais têm o potencial de exacerbar as mudanças do clima ou da cobertura florestal em um círculo vicioso (Fig. 19). Ademais, esses dois fatores desencadeadores de mudanças na cobertura florestal provavelmente não atuam de forma independente um do outro.

## Sinergias entre desmatamento e clima

Outro fator ambiental desencadeador de mudanças na Amazônia e associado ao desmatamento seria o aumento da vulnerabilidade de uma floresta fragmentada aos “efeitos de borda”, tais como ventos fortes e, principalmente, os incêndios florestais. Nesse projeto, não houve modelagem explícita dos efeitos do desmatamento direto combinado com as mudanças climáticas. Contudo, pode-se presumir que as mudanças climáticas atuando em uma região já fragmentada pelo desmatamento produzam efeitos maiores que na floresta contínua. A fragmentação expõe a floresta a pontos de ignição, que são gerados principalmente pela ação do homem, deliberada ou não. Por certo, incêndios naturais também ocorrem e influenciam a transição de floresta para savana. Um modelo simplificado de clima-vegetação-incêndio natural<sup>51</sup> estimou que, sob as condições climáticas atuais, a floresta tropical penetraria 200 km para dentro da savana na ausência de incêndios provocados por raios.

★ As mudanças climáticas atuando em uma região já fragmentada pelo desmatamento poderiam ter efeitos maiores que na floresta contínua. Uma floresta fragmentada fica mais vulnerável aos incêndios florestais, gerados provavelmente pela atividade humana. Um clima alterado pode aumentar o risco de incêndio, permitindo que fogo se alastre mais rapidamente.

50. Soares-Filho et al. 2006

51. Hirota et al. 2010



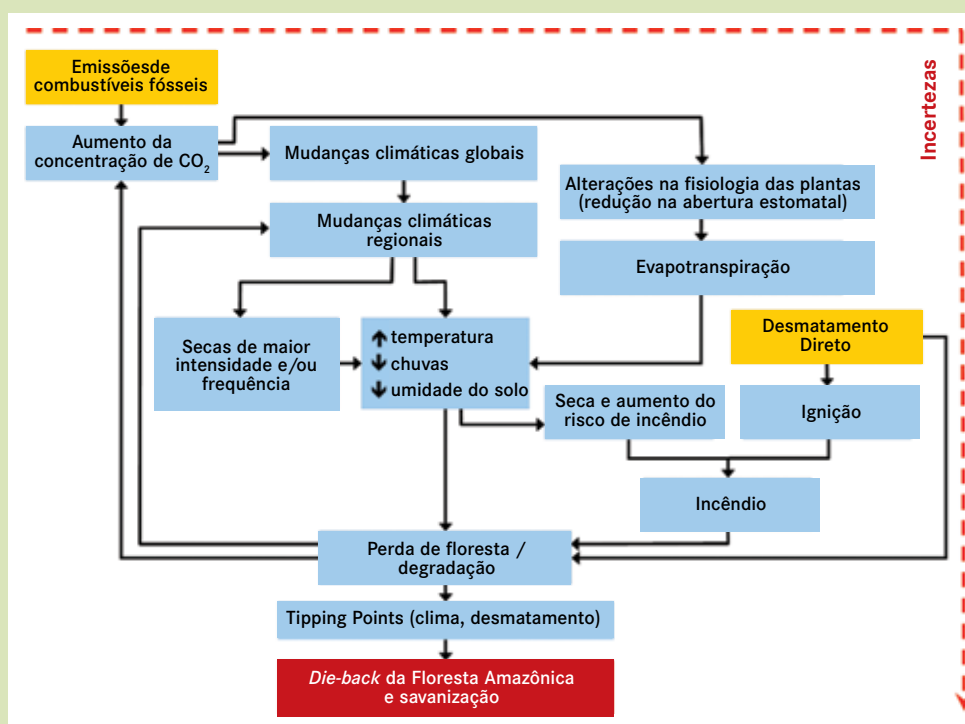
Se as condições facilitarem a ignição e o alastramento de incêndios nas regiões onde há projeção de desmatamento, então o fogo terá o potencial de exercer um papel importante no desmatamento e na degradação adicionais (Fig. 19).<sup>52</sup> Em condições de seca, as queimadas usadas para desmatamento atingem áreas maiores. As queimadas, a seca e a derrubada de árvores aumentam a susceptibilidade a futuros incêndios, ao passo que o desmatamento e a fumaça podem inibir a precipitação pluviométrica, exacerbando o já elevado risco de incêndio, bem como prejudicar a saúde humana e interromper o transporte (como aconteceu na Amazônia durante a seca de 2005, Seção 3). Estima-se que, se os padrões de grande variabilidade climática que ocorrem na região tropical dos oceanos Pacífico e Atlântico continuarem associados às secas na região amazônica no futuro, aproximadamente 55% das florestas da região serão extintas, derrubadas, danificadas pela seca ou queimadas nos próximos 20 anos.<sup>53</sup> A redução

do desmatamento pode ajudar a manter a floresta mais resistente sob condições de seca, sejam elas associadas a um clima mais quente e seco, à variabilidade climática ou a alterações locais decorrentes de mudanças no uso da terra.



A redução do desmatamento pode ajudar a manter a floresta mais resistente sob condições de seca, sejam elas associadas a um clima mais quente e seco, à variabilidade climática ou a alterações locais decorrentes de mudanças no uso da terra.

O projeto DCC desenvolveu parcerias e capacidade de modelagem para possibilitar a observação de sinergias entre mudanças climáticas, desmatamento e incêndios, a serem exploradas de maneira integrada no futuro.



**Figura 19:** Resumo dos possíveis mecanismos de *die-back* (colapso) da Floresta Amazônica. O CO<sub>2</sub> não é o único gás de efeito estufa emitido, mas está destacado aqui por causa de sua importância nas mudanças climáticas, seu papel no balanço de carbono na Terra e seus efeitos sobre a fisiologia das plantas na Floresta Amazônica. Por meio de efeitos sobre os climas regionais e global, a perda de Floresta Amazônica também pode ter implicações para o clima, os ecossistemas e as populações fora da Bacia Amazônica.

52. Golding and Betts 2008

53. Nepstad et al. 2008

# 4 Resumo e conclusões

(J. Marengo, C. Nobre, R. Betts, G. Kay)

A Floresta Amazônica desempenha importante papel no equilíbrio do sistema climático local, regional e mesmo global, com sua gama de serviços de ecossistema que servem de base para as atividades e o bem-estar das pessoas tanto em regiões próximas quanto distantes. Assim, quaisquer mudanças em sua bacia – sejam elas mudanças climáticas, no uso da terra ou uma combinação de ambas – podem trazer consequências significativas para o funcionamento dos sistemas naturais e a vida das pessoas que os utilizam. Entender que a Amazônia funciona como parte integrada de um sistema terrestre e os riscos de como isso pode mudar no futuro é pré-requisito para a criação de estratégias de desenvolvimento mais eficientes.

Este projeto DCC permitiu elaborar projeções de alta resolução sobre as mudanças climáticas em regiões do Brasil, bem como avaliar as incertezas dessas simulações. As projeções são de grande elevação das temperaturas e diminuição das chuvas no decorrer deste século. Outros estudos mostraram que, além dessas mudanças, o risco de eventos extremos – como a seca de 2005 – pode se tornar mais frequente no futuro. Em paralelo a essas mudanças que irão afetar diretamente os sistemas humanos vulneráveis ao clima, poderá haver impactos na continuação da viabilidade da Floresta Amazônica. Por sua vez, as perdas decorrentes das mudanças climáticas podem afetar o clima regional em virtude do papel da floresta na reciclagem das águas das chuvas dentro da bacia e além dela. Regiões economicamente importantes do Brasil e de outros países da América do Sul nos setores de agronegócios, energia hídrica e indústria situam-se ao sul do Amazonas e, segundo estimativas, geram por volta de US\$ 1,5 trilhão ou 70% do PIB combinado desses países. Ainda não se quantificou até que ponto a umidade proveniente do Amazonas contribui para o bem-estar econômico do continente sul-americano.

É amplamente sabido que há grandes incertezas nas tendências apresentadas pelos modelos HadCM3 da Agência Nacional de Meteorologia do Reino Unido no que diz respeito às secas futuras, um eventual *die-back* (colapso) da floresta e o momento em que ocorrerão. Entretanto, sabemos que o desmatamento representa a ameaça mais imediata à Amazônia. Estudos sobre o ciclo hidrológico na Amazônia indicam que a floresta recicla em torno de 50% das precipitações pluviométricas e que, se o desmatamento for da ordem de 30%, ela será incapaz de gerar chuvas suficientes para se manter, gerando um círculo vicioso de “quanto mais perda de floresta, menos precipitações”. Em outras palavras, as chuvas são essenciais à manutenção dos ecossistemas da Amazônia e todos os serviços proporcionados por eles; assim, é impossível separar o valor da floresta como sistema ecológico regulador da água do valor de todos os seus serviços de ecossistema. À medida que o desmatamento se aproxima desse limiar crítico, esperamos que o valor marginal do ecossistema da floresta aumente rapidamente, aproximando-se do infinito se acreditarmos que a perda dos ecossistemas da Amazônia é algo inaceitável. Apesar das incertezas sobre quanto de perda florestal o sistema climático consegue tolerar até deixar de gerar precipitações pluviométricas suficientes para a manutenção da floresta, é provável que as mudanças climáticas tenham impactos substanciais sobre esses limites.



Enquanto os serviços do ecossistema da Floresta Amazônica não forem integrados nas estruturas políticas e financeiras, a floresta será considerada mais valiosa morta do que ativa.

Enquanto os serviços de ecossistema da Floresta Amazônica não forem integrados às estruturas políticas e financeiras, a floresta será considerada mais valiosa morta do que ativa. O mecanismo de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação (REDD), que avançou rapidamente na agenda política, em especial nas Conferências das Partes COP-15, realizada em dezembro de 2009 em Copenhague, e COP-16, realizada em dezembro de 2010 em Cancun, é atualmente o foco deste novo esforço. Com o setor florestal contribuindo com menos de 20% das emissões de gases de efeito estufa, a redução do

desmatamento poderá oferecer benefícios imediatos em termos de balanço global de carbono e, conseqüentemente, de aquecimento global. O objetivo é recompensar as populações indígenas por contribuir para a preservação da floresta para o sequestro e armazenamento de carbono na mitigação das mudanças climáticas.<sup>54</sup> O papel da floresta no balanço global de carbono é um serviço – sem dúvida muito importante – do ecossistema oferecido pela Amazônia. É preciso mais pesquisa para elucidar o papel da floresta no bem-estar econômico do continente sul-americano e integrar essas informações às políticas e atividades práti-

cas para conservar a Amazônia e oferecer benefícios aos seus habitantes.

O projeto DCC do Brasil tem possibilitado a pesquisa científica colaborativa e o intercâmbio de conhecimento entre o INPE e a Agência Nacional de Meteorologia do Reino Unido. O trabalho tem se desenvolvido e avançado com base na experiência e capacidade das instituições brasileiras e inglesas. Os laços de colaboração entre o INPE e a Agência Nacional de Meteorologia do Reino Unido têm-se fortalecido, e fundações foram criadas para possibilitar que a pesquisa de ponta continue além do projeto DCC.



Foto: Eduardo Arraut / INPE





# Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a M. Sumire, D. Grabois, L. Carrijo e R. Ferreira, da equipe de assuntos do clima da Embaixada do Reino Unido em Brasília, por sua ajuda na elaboração e implementação do projeto DCC. Agradecemos também a M. Valverde e E. Andrade, que se empenharam para fazer deste projeto um sucesso, e a J. Miguez e H. Machado Filho, do Coodenação de Mudanças Climáticas do Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil, por seu apoio e ajuda para torná-lo possível. Agradecimento especial para o Diretor do INPE, Gilberto Câmara, pela ajuda e apoio para fazer este projeto possível no CCST INPE.

Estendemos nossos agradecimentos ao pessoal do Projeto BRA/05/G31 do PNUD e do projeto sobre os Riscos de Mudanças Climáticas no Brasil (DCC) do Global Opportunity Fund - GOF FCO, do Reino Unido. JM e SC foram patrocinados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico brasileiro - CNPq. Recursos adicionais vieram dos programas brasileiros Rede-CLIMA, do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC) do CNPq, e da FAPESP Programa FAPESP para Mudanças Climáticas Globais, projeto: Assessment of Impacts and Vulnerability to Climate Change in Brazil and Strategies for Adaptation Options.

# Referências bibliográficas

- Aragão, L. E., Y. Malhi, N. Barbier, A. Lima, Y. Shimabukuro, L. Anderson, and S. Saatchi (2008), Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia, *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 363:1779-1785; doi:10.1098/rstb.2007.002.
- Betts, R., P. Cox, M. Collins, P. Harris, C. Huntingford, and C. Jones (2004), The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global change warming. *Theor. Appl. Climatol.*, 78, 157-175.
- Betts, R. A., M. Sanderson and S. Woodward (2008), Effects of large-scale Amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 363(1498), 1873-1880, doi:10.1098/rstb.2007.0027.
- Brown, I. F., W. Schroeder, A. Setzer, M. de Los Rios Maldonado, N. Pantoja, A. Duarte and J. Marengo (2006), Monitoring fires in southwestern Amazonia rain forests. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 87(253).
- Boyd, E. (2008), Navigating Amazonia under uncertainty: past, present and future environmental governance. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363:1911-1916; doi:10.1098/rstb.2007.0023.
- Bustamante J. F., J. L. Gomes, S. C. Chou (2006), 5-Year Eta Model seasonal forecast climatology over South America. In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 08. 24-28 April 2006, Foz do Iguaçu (PR), pp 503-506.
- Chen, T. -C., J. -H. Yoon, K. J. St. Croix and E. S. Takle (2001), Suppressing impacts of the Amazonian deforestation by the global circulation change. *Bull. Amer. Met. Soc.* 82, 2209-2215.
- Christensen, J. H., T. R. Carter, M. Rummukainen and G. Amanatidis (2007), Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project, *Climatic Change*, 81, 1-6.
- Chou, S. C., C. A. S. Tanajura, Y. Xue, and C. A. Nobre (2002), Validation of the coupled Eta/SSiB model over South America, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8088, doi:10.1029/2000JD000270.
- Chou, S. C., J. F. Bustamante and J. L. Gomes (2005), Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America, *Nonlin. Processes Geophys.*, 12, 537-555, doi:10.5194/npg-12-537-2005
- Collins, M., S. -I. An, W. Cai, A. Ganachaud, E. Guilyardi, F. -F. Jin, M. Jochum, M. Lengaigne, S. Power, A. Timmermann, G. Vecchi and A. Wittenberg (2010), The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo868.
- Cox, P., R. Betts, C. Jones, S. Spall and T. Totterdell (2000), Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184-187.
- Cox, P. M., R. A. Betts, M. Collins, P. Harris, C. Huntingford and C. D. Jones (2004), Amazonian dieback under climate-carbon cycle projections for the 21<sup>st</sup> century. *Theor. Appl. Climatol.*, 78, 137-156.

- Cox, P., P. Harris, C. Huntingford, R. Betts, M. Collins, C. Jones, T. Jupp, J. Marengo and C. Nobre (2008), Increasing risk of Amazonian Drought due to decreasing aerosol pollution. *Nature*, 453, 212-216.
- CPRM (2010), Monitoramento Hidrológico 2010 Boletim no 32 – 22/10/2010. Agência Nacional de Aguas ANA, Serviço Geológico do Brasil CPRM. Manaus, AM. 13 pp.
- Eltahir, E. A. B. and L. Bras (1994), Precipitation recycling in the Amazon basin. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 120(518), 861-880, doi:10.1002/qj.49712051806.
- Fu R., R. E. Dickinson, M. X. Chen and H. Wang (2001), How do tropical sea surface temperatures influence the seasonal distribution of precipitation in the equatorial Amazon? *J. Climate*, 14, 4003-4026.
- Giorgi, F. (2008), A simple equation for regional climate change and associated uncertainty. *J. Climate*, 21, 1589-1604.
- Golding, N. and R. Betts (2008), Fire risk in Amazonia due to climate change in the HadCM3 climate model: Potential interactions with deforestation. *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB4007, doi:10.1029/2007GB003166.
- Good, P., J. A. Lowe, M. Collins and W. Moufouma-Okia (2008), An objective tropical Atlantic sea surface temperature gradient index for studies of south Amazon dry-season climate variability and change. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 363(1498), 1761-1766, doi:10.1098/rstb.2007.0024.
- Hall, A. (2008), Better RED than dead: paying the people for environmental services in Amazonia, *Phil. Trans. R. Soc. B* 363:1925-1932, doi:10.1098/rstb.2007.0034.
- Harris, G. R., D. M. H. Sexton, B. B. Booth, M. Collins, J. M. Murphy and M. J. Webb (2006), Frequency distributions of transient regional climate change from perturbed physics ensembles of general circulation model simulations. *Climate Dynamics*, 27, 357-375, doi:10.1007/s00382-006-0142-8.
- Hirota, M., C. Nobre, M. D. Oyama and M. M. C. Bustamante (2010), The climatic sensitivity of the forest, savanna and forest-savanna transition in tropical South America. *New Phytologist* 187: 707-719
- Huntingford, C. and Cox, P.M. (2000), An analogue model to derive additional climate change scenarios from existing GCM simulations. *Climate Dynamics*, 16, 575-586.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2007a), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2007b), Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2007c), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2007d), Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K. and A. Reisinger (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.



- INPE (2010), Relatório Técnico sobre a Seca de 2010 na Amazonia Inpe-São Jose dos Campos SP Brazil (in preparation)
- Lapola, D. M., M. D. Oyama and C. A. Nobre (2009), Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: The role of CO<sub>2</sub> fertilization and seasonality. *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB3003, doi:10.1029/2008GB003357
- Li W., R. Fu R. and R. E. Dickinson (2006), Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. *J. Geophys. Res.*, 111, D02111.
- Li, W., R. Fu, R. I. Negrón Juárez, and K. Fernandes (2008), Observed change of the standardized precipitation index, its potential cause and implications to future climate change in the Amazon region. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363, 1767-1772, doi:10.1098/rstb.2007.0022.
- Marengo, J. A. (2003), Condições climáticas e recursos hídricos no Norte Brasileiro. In: Tucci, C. E.; Braga, B. *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*, Associação Brasileira de Recursos Hídricos FBMC/ANA. Porto Alegre, Brasil, 9, 117-161.
- Marengo, J. A. (2004), Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theor. Appl. Climatol.*, 78, 79-96.
- Marengo, J. A. (2009), Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. *Hydrological Processes*, 23: 3236-3244. doi: 10.1002/hyp.7396.
- Marengo, J. A., W. Soares, C. Saulo, and M. Nicolini (2004), Climatology of the LLJ east of the Andes as derived from the NCEP reanalyses. *J. Climate*, 17, 2261-2280.
- Marengo J. A., C. Nobre, J. Tomasella, M. Oyama, G. Sampaio, H. Camargo, L. Alves and R. Oliveira (2008a), The drought of Amazonia in 2005. *J. Climate*, 21, 495-516.
- Marengo J. A., C. Nobre, J. Tomasella, M. Cardoso and M. Oyama (2008b), Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 21, 1-6.
- Marengo, J. A., R. Jones, L. M. Alves, and M. C. Valverde (2009a), Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *Int. J. Climatol.*, 15, 2241-2255.
- Marengo, J. A., T. Ambrizzi, R. P. Rocha, L. M. Alves, S. V. Cuadra, M. C. Valverde, S. E. T. Ferraz, R. R. Torres, and D. C. Santos (2009b), Future change of climate in South America in the late XXI Century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-009-0721-6.
- Marengo, J. A., J. Tomasella, L. Alves, W. R. Soares and C. A. Nobre (2010a), Extreme climatic events in the Amazon Basin: Climatological and Hydrological context of recent floods, submitted to *Theor. Appl. Climatol.*
- Marengo, J. S. C. Chou, G. Kay, L. M. Alves, J. F. Pesquero, W. R. Soares, D. C. Santos, A. Lyra, G. Sueiro, R. Betts, D. J. Chagas, J. L. Gomes, J. F. Bustamante and P. Tavares (2010b), Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River Basins, submitted to *Climate Dynamics*.
- Meehl G., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. Stouffer and K. Taylor (2007), The WCRP CMIP3 multimodel data set. A new era in climate change research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 88(9), 1383-1394.
- Mitchell, T. D. (2003), Pattern scaling: An examination of the accuracy of the technique for describing future climates. *Climatic Change*, 60, 217-242.
- Molion, L. C. B. (1975), A climatonomic study of the energy and moisture fluxes of the Amazon's basin with considerations of deforestation effects. Ph.D. thesis, University of Wisconsin, Madison.

- Nakićenović, N., J. Alcamo, G. Davis, H. J. M. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Papper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, and Z. Dadi (2000), Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Negrón Juárez, R. I., J. Q. Chambers, G. Guimaraes, H. Zeng, C. F. M. Raupp, D. M. Marra, G. H. P. M. Ribeiro, S. S. Saatchi, B. W. Nelson and N. Higuchi (2010), Widespread Amazon forest tree mortality from a single cross-basin squall line event. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L16701, doi:10.1029/2010GL043733.
- Nepstad, D. C., C. M. Stickler, B. Soares-Filho and F. Merry (2008), Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363, 1737-1746. doi:10.1098/rstb.2007.0036.
- Nobre, C. A. and L. S. Borma (2009), 'Tipping points' for the Amazon forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1, 28-36.
- Obregon G. and J. A. Marengo (2007), Caracterização do clima do Século XX no Brasil: Tendências de chuvas e temperaturas médias e extremas. Relatório 2, Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Biodiversidade E Florestas - SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília.
- Phillips, O. L., S. L. Lewis, T. R. Baker, K. -J. Chao and N. Higuchi (2008), The changing Amazon forest. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 363(1498), doi:10.1098/rstb.2007.0033.
- Phillips, O. L., L. E. O. C. Aragão, S. L. Lewis, J. B. Fisher, J. Lloyd, G. López-González, Y. Malhi, A. Monteagudo, J. Peacock, C. A. Quesada, G. van der Heijden, S. Almeida, I. Amaral, L. Arroyo, G. Aymard, T. R. Baker, O. Bánki, L. Blanc, D. Bonal, P. Brando, J. Chave, A. C. A. de Oliveira, N. Dávila Cardozo, C. I. Czimczik, T. R. Feldpausch, M. A. Freitas, E. Gloor, N. Higuchi, E. Jiménez, G. Lloyd, P. Meir, C. Mendoza, A. Morel, D. A. Neill, D. Nepstad, S. Patiño, M. C. Peñuela, A. Prieto, F. Ramírez, M. Schwarz, J. Silva, M. Silveira, A. Sota Thomas, H. ter Steege, J. Stropp, R. Vásquez, P. Zelazowski, E. Alvarez Dávila, S. Andelman, A. Andrade, K. -J. Chao, T. Erwin, A. Di Fiore, E. Honorio C., H. Keeling, T. J. Killeen, W. F. Laurance, A. Peña Cruz, N. C. A. Pitman, P. Núñez Vargas, H. Ramírez-Angulo, A. Rudas, R. Salamão, N. Silva, J. Terborgh, J. and A. Torres-Lezama (2009), Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science*, 323: 1344-1347.
- Ronchail, J., G. Cochonneau, M. Mounier, J. L. Guyot, A. Gorreti de Miranda Chaves, V. Guimarães, and E. de Oliveira (2002), Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea surface temperatures in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic Oceans. *Int. J. Climatol.*, 22, 1663-1686.
- Salati, E. (1987), The forest and the hydrological cycle. In: Dickinson, R.E. (Ed.), *Geophysiology of Amazonia*, John Wiley & Sons, New York, pp. 273-96.
- Salazar, L.F. (2009), Conseqüências das mudanças climáticas na distribuição dos biomas na América do Sul, com ênfase na amazonia e nordeste. 277 p. (INPE-16573-TDI/1566). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- Saleska, S. R., K. Didan, A. R. Huete and H. R. Rocha (2007), Amazon forests green-up during 2005 drought, *Science*, 318(5850), 612, doi:10.1126/science.1146663.
- Samanta A, S. Ganguly, H. Hashimoto, S. Devadiga, E. Vermote, Y. Knyazikhin, R. R. Nemami and R. B. Myneni (2010), Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. *Geophys. Res. Lett.* 37, L05401.

- Sampaio, G. (2008), Climatic consequences of gradual conversion of Amazonian Tropical Forests into degraded pasture or soybean cropland: a GCM simulation study. PhD Thesis in Meteorology - (INPE-15263-TDI/1346) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos 417p. Available on: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.28.17.17>>.
- Sampaio, G., C. Nobre, M. H. Costa, P. Satyamurty, B. S. Soares-Filho, and M. Cardoso (2007), Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L17709, doi:10.1029/2007GL030612.
- Satyamurty, P., A. A. de Castro, J. Tota, L. E. Gularte, and A. O. Manzi, (2009), Rainfall trends in the Brazilian Amazon Basin in the past eight decades. *Theor. Appl. Climatol.*, doi:10.1007/s00704-009-0133-x.
- Seluchi, M. E. and S. C. Chou (2001), Evaluation of two Eta/CPTEC Model versions for weather forecast over South America. *Geofísica Internacional*, 40, 219-237.
- Soares-Filho, B. S., D. C. Nepstad, L. M. Curran, G. C. Cerqueira, R. A. Garcia, C. A. Ramos, E. Voll, A. McDonald, P. Lefebvre and P. Schlesinger (2006), Modelling conservation in the Amazon Basin, *Nature*, 440(7083), 520-523, doi:10.1038/nature04389.
- Tomasella, J. S. Borma, J. A. Marengo, D. A. Rodriguez, L. A. Cuartas, C. A. Nobre and M. C. R. Prado (2010a), The droughts of 1996-1997 and 2004-2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem. *Hydrological Processes*, v. 10, doi: 10.1002/hyp.7889.
- Tomasella, J. P. F. Pinho, L. S. Borma, J. A. Marengo, C. A. Nobre, O. R.F.O. Bittencourt, M. C.R. Prado, D. A. Rodriguez, L. A. Cuartas (2010b). The droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: hydrological, ecological and human impacts in the main stem floodplain (submitted to *Climatic Change*)
- Vera, C. W. Higgins, J. Gutzler, J. A. Marengo, R. Garreaud, J.; Amador, D. Gochis, J. Nogue-Paegle, J. C. Zhang, T. Ambrizzi, C. R. Mechoso, D. Lettenmaier (2006), Towards a unified view of the American monsoon systems. *J. Climate*, 19, 4977-5000.
- Victoria, R., L. Martinelli, J. Moraes, M. V. Ballester, A., Krushche, G. Pellegrino, R. Almeida and J. Richey (1998), Surface air temperature variations in the Amazon region and its border during this century. *J. Climate*, 11, 1105-1110.
- Zeng, N., J. Yoon, J. A. Marengo, A. Subramaniam, C. A. Nobre and A. Mariotti (2008), Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environmental Research Letters*, 3, 1-6.



## DANGEROUS CLIMATE CHANGE IN BRAZIL



### **Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST)**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)  
Av. dos Astronautas 1758, Predio Beta, sala 58  
Jardim da Granja, São José dos Campos, SP  
CEP 12227-010  
Tel: 55 12 3208-7137 | Fax: 55 12 3208-7126

Rodovia Presidente Dutra, Km 39  
Cachoeira Paulista - SP  
CEP 12630-000



### **Met Office Hadley Centre**

FitzRoy Road  
Exeter - Devon - EX1 3PB  
United Kingdom  
Tel: 0870 900 0100 | 01392 885680  
Fax: 0870 900 5050 | 01392 885681



Ministério da  
Ciência e Tecnologia

