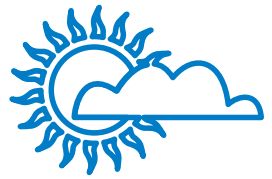


# A ATMOSFERA E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS



01

Dimensão  
ATMOSFÉRICA

## INTRODUÇÃO

As influências do homem no equilíbrio natural do planeta preocupam. As mudanças climáticas antropogênicas estão associadas às atividades humanas, com o aumento da poluição e de queimadas, com o desmatamento, a formação de ilhas de calor, etc. A partir do final do século XIX e no século XX há aumento significativo da produção industrial e crescente aumento da quantidade de poluentes na atmosfera, sobretudo nos últimos 70 anos, com o aumento da quantidade dos chamados gases estufa na atmosfera, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), e, portanto, a intensificação do efeito estufa. Com isso, há também crescente aumento da temperatura média global, o que é chamado de aquecimento global. Hoje, existe grande consenso na comunidade científica que se ocupa do estudo das mudanças climáticas, refletido, por exemplo, nas análises sistemáticas do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, na sigla em inglês), de que o aquecimento global observado é explicado pelas emissões antropogênicas dos Gases de Efeito Estufa – GEE (principalmente, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, CFCs) e de aerossóis e não por eventual variabilidade natural do clima.

As medidas de temperatura média global, a partir de uma rede de estações meteorológicas em diversas partes do globo, tiveram início em 1850. O ano de 1998 foi o mais quente já registrado, com  $+0,54^\circ\text{C}$  acima da média histórica, que é a média do período que vai de janeiro de 1961 a dezembro de 1990. A temperatura média global do planeta à superfície vem subindo nos últimos 120 anos, já tendo aumentado de  $0,74^\circ\text{C}$  em 100 anos (1906 a 2005), e a maior parte desse aquecimento ocorreu nos últimos 50 anos, sobretudo no Hemisfério Norte. A última década foi a mais quente da história recente da Terra, sendo 1998, 2005, 2003, 2002, 2004, 2006, 2007, 2001, 1997, 1995, 1999, 1990, 2000 e 1991 os anos mais quentes em relação à média histórica. Note que todos os 14 anos mais quentes já registrados são posteriores a 1990!"

*Gilvan Sampaio*  
*José Marengo*  
*Carlos Nobre*

O aquecimento global recente tem provocado impactos ambientais intensos, como o derretimento das geleiras e calotas polares, com conseqüente aumento do nível médio do mar, assim como impactos em processos biológicos, como, por exemplo, nas datas de floração (*veja capítulos sobre Dimensão Botânica*). Dados recentes indicam, por exemplo, que a Europa

está esquentando mais rápido que a média do planeta e, só no ano de 2003, 10% das geleiras dos Alpes derreteram. Outro impacto potencial do aquecimento global está relacionado à saúde humana, pois o clima úmido e quente provocado pelo aquecimento global poderá potencialmente aumentar a incidência de casos de peste bubônica, assim como de doenças tropicais, como malária, dengue e doenças do estômago (*veja capítulos sobre Dimensão Humana*).

O aumento da temperatura em cerca de 0,74°C durante o século passado é pequeno se comparado com as projeções de aquecimento para o século XXI. As projeções do quarto relatório do IPCC de 2007 (a partir daqui chamado de IPCC AR4 – IPCC, 2007) indicam para o final deste século um aumento da temperatura média global entre 1,8°C e 4,0°C e um aumento do nível médio do mar entre 0,18 m e 0,59 m, o que pode afetar significativamente as atividades humanas e os ecossistemas terrestres.

O segundo e terceiro relatórios de mudanças climáticas do IPCC [12,13] demonstraram que o aquecimento global tem alta probabilidade de ser causado pelas emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Já o IPCC AR4 [14] aponta para a influência do homem como o responsável pelo aquecimento global. O gradual aquecimento global provoca maior dinâmica atmosférica, acelerando os ciclos hidrológico e de energia na atmosfera, que conseqüentemente podem afetar a frequência e a intensidade de eventos extremos climáticos. Tanto as mudanças médias do clima quanto o possível aumento da frequência dos extremos poderiam ampliar a instabilidade dos ecossistemas e acelerar as taxas naturais de extinção de espécies.

Os impactos das mudanças climáticas nas espécies e nos ecossistemas podem ter profundos impactos sobre a conservação da biodiversidade. As alterações climáticas do passado são conhecidas por corresponderem a grandes mudanças na composição das espécies em comunidades ou em episódios de megaextinção de fauna e flora. Com as mudanças climáticas aceleradas pelas atividades antrópicas, estratégias de conservação devem ser desenvolvidas para responder às esperadas mudanças na distribuição, fisiologia e ecologia das espécies.

Sendo assim, é importante entendermos quais são os impactos do aquecimento global nas atividades humanas e nos ecossistemas para que seja estabelecido um nível de atenção e para a mitigação dos impactos desse aquecimento, uma vez que a mudança do clima não é mito, não é moda, é uma realidade.

## **A FÍSICA DO EFEITO ESTUFA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NATURAIS**

O clima da Terra é determinado por diversos fatores, tanto internos quanto externos. Podemos citar como fatores externos, por exemplo, a inclinação do eixo da Terra em relação ao Sol e a sua órbita em relação ao mesmo. Há ainda fatores internos, como a distribuição dos continentes, a disponibilidade de fontes de umidade, relevo, vegetação, etc.

O ar seco da atmosfera terrestre é composto de cerca de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,0379% de dióxido de carbono e demais gases com menor concentração, como neônio, hélio, metano, criptônio, hidrogênio, ozônio, etc. O nitrogênio e o oxigênio ocupam até 99% do volume do ar seco e limpo, e embora esses elementos sejam abundantes, eles têm pouca influência sobre os fenômenos do tempo. A maior parte do restante 1% é ocupado pelo gás inerte argônio. A importância de um gás ou aerossol atmosférico (partícula em suspensão na atmosfera, como, por exemplo, poeira, pólen, etc., em estado líquido ou sólido) não está relacionada à sua abundância relativa. Por exemplo, o dióxido de carbono, o vapor d'água, o ozônio e os aerossóis ocorrem em pequenas concentrações, mas são importantes para os fenômenos meteorológicos e para a vida. Além dos gases, a radiação solar exerce papel importante no sistema Terra-atmosfera. A energia que vem

do Sol em forma de radiação ultravioleta é devolvida para o espaço através de radiação infravermelha. Os raios que chegam do Sol na forma de radiação ultravioleta penetram na atmosfera da Terra com certa facilidade e parte é refletida ou absorvida por gases como o ozônio e o vapor d'água. Ao atingir a superfície terrestre a radiação solar se transforma em calor na forma de radiação infravermelha, que então é devolvida para o espaço. Entretanto, durante esse trajeto a radiação infravermelha tem dificuldade de retornar para o espaço, pois é absorvida por gases, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o vapor d'água, entre outros. A absorção das radiações ultravioleta e infravermelha pelos gases da atmosfera terrestre faz com que haja aquecimento da atmosfera da Terra, aumentando assim a temperatura do ar, o que é conhecido como efeito estufa. Esse fenômeno é natural, regula a temperatura da Terra e permite a vida da forma como a conhecemos. Se não houvesse esta absorção de radiação por causa dos gases, principalmente por causa do vapor d'água e do dióxido de carbono (que são chamados gases estufa), a Terra teria temperatura média de  $-18^\circ\text{C}$ . No entanto, em decorrência dessa absorção e emissão das radiações solar e terrestre pelos gases da atmosfera, a temperatura média da Terra é de cerca de  $15^\circ\text{C}$ , ou seja, há uma diferença de  $33^\circ\text{C}$ . Importante frisar que esses gases se encontram em concentrações muito menor que 1% na atmosfera! Com isso, há um equilíbrio, pois a energia que está entrando no sistema Terra-atmosfera é exatamente igual à quantidade de energia que está saindo, ou seja, a Terra não está nem esfriando nem aquecendo.

Agora vamos pensar o seguinte: e se aumentarmos, por exemplo, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, o que aconteceria? Muito desse gás adicional será absorvido pelas plantas através da fotossíntese, mas em torno de 50% permanecerá no ar. Com isso, pode haver mais absorção e emissão das radiações solar e terrestre, o que pode levar a um aquecimento da baixa atmosfera (e conseqüente intensificação do efeito estufa), e portanto ocorrerão mudanças climáticas antropogênicas, ou seja, mudanças climáticas induzidas pelas atividades humanas. Esse assunto será discutido nas próximas seções. Importante ressaltar que, além do  $\text{CO}_2$  e do vapor d'água, outros gases também contribuem para o efeito estufa, como o metano ( $\text{CH}_4$ ) e os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ).

A Terra sempre passou por ciclos naturais de aquecimento e resfriamento, ou seja, mudanças climáticas naturais sempre ocorreram na Terra. Os principais fatores que induzem as mudanças climáticas naturais são: a deriva dos continentes, as variações da quantidade de radiação solar que chega à Terra, as variações dos parâmetros orbitais da Terra, a quantidade de aerossóis naturais (provenientes de fontes minerais, incêndios florestais de origem natural e o sal marinho), as erupções vulcânicas e fenômenos climáticos que podem modificar o clima localmente, como: furacões, tempestades violentas e os fenômenos El Niño e La Niña.

Variações na órbita da Terra, e as conseqüentes variações na quantidade de calor que é recebida nos diferentes locais, influenciaram a determinação das variações climáticas do passado. Com a variação da radiação solar por motivos astronômicos há variação no volume de gelo e, conseqüentemente, na temperatura global. A teoria matemática do clima baseada nas variações sazonais e latitudinais da radiação solar recebida pela Terra é conhecida como Teoria de Milankovitch, descoberta pelo sérvio Milutin Milankovitch no início do século passado.

A Teoria de Milankovitch baseia-se nas variações cíclicas de três elementos, o que ocasiona variações na quantidade de energia solar que chega à Terra:

- **Precessão:** mudanças na orientação do eixo rotacional da Terra. Estas mudanças alteram as datas do periélio e do afélio e, portanto, aumentam o contraste sazonal em um Hemisfério e diminui em outro. O período médio é de 23.000 anos.

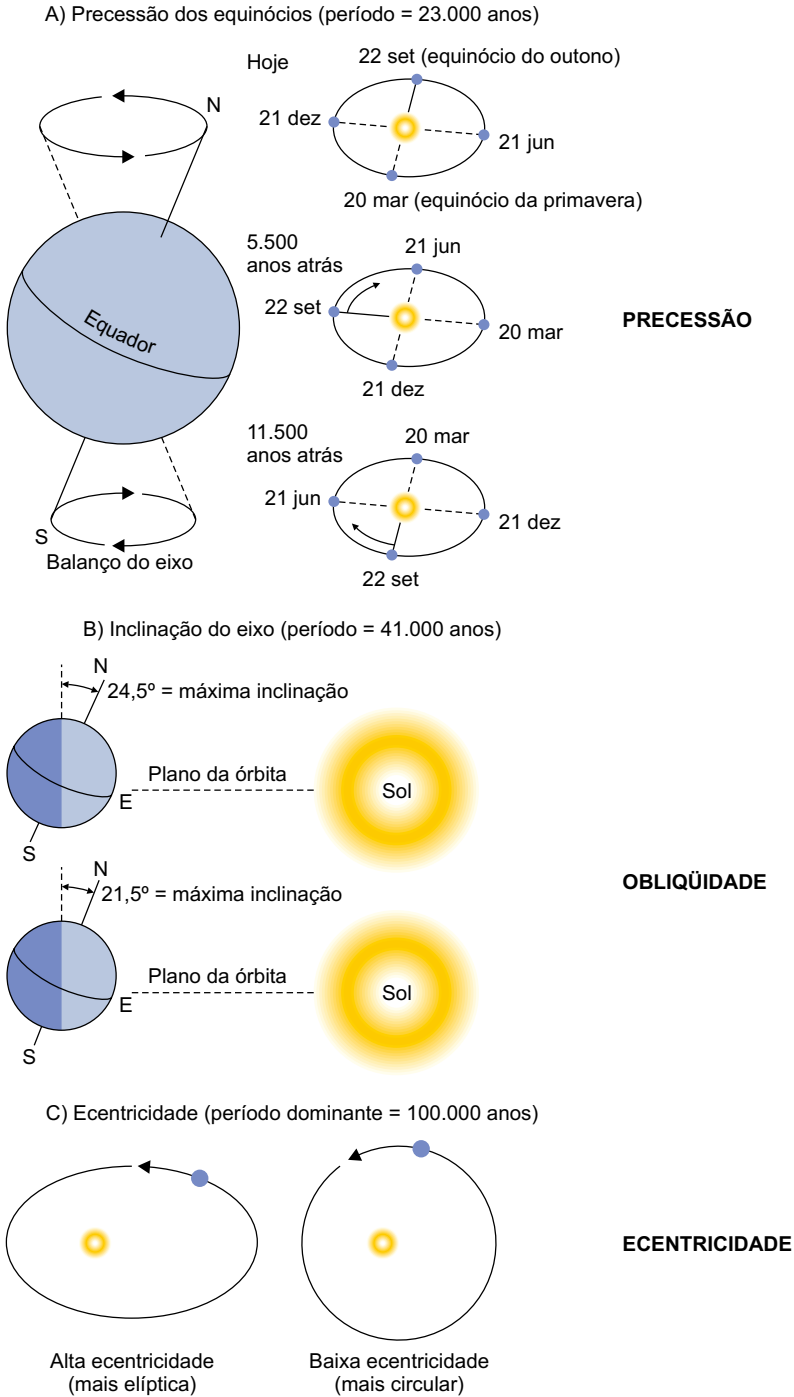
- Mudanças na obliquidade: mudança na inclinação do eixo da Terra. Estas influenciam a magnitude da mudança sazonal, ou seja, quando a inclinação é maior, as estações são mais extremas (os invernos são mais frios e os verões mais quentes) e, quando a inclinação é menor, as estações são mais suaves em ambos os Hemisférios. Atualmente a inclinação é de  $23,5^\circ$ . O período médio é de 41.000 anos, variando entre as inclinações de  $21,5^\circ$  e  $24,5^\circ$ . Quando os verões são mais frios, significa que há maior permanência de neve e gelo nas altas latitudes, o que contribui para um feedback positivo, ou seja, mais neve significa albedo maior e, portanto, maior resfriamento.
- Variações na excentricidade: a excentricidade está associada ao fato de a órbita da Terra em relação ao Sol ser mais elíptica (alta excentricidade) ou mais circular (baixa excentricidade). Atualmente há uma diferença de 3% entre a maior aproximação (periélio) e o afélio. Essa diferença na distância significa 6% da insolação entre janeiro e julho. Quando a órbita está mais elíptica, a diferença da insolação é da ordem de 20 a 30% entre janeiro e julho. O período é de 90.000 a 100.000 anos.

Juntos, os períodos desses movimentos orbitais tornaram-se conhecidos como ciclos de Milankovitch. A Figura 1 ilustra os três elementos que ocasionam variações na quantidade de energia solar que chega à Terra. As Eras Glaciais e Interglaciais ocorrem quando a Terra está passando por diferentes estágios de variações orbitais, ou seja, a cada 100.000 anos aproximadamente.

Outro fator que induz mudanças climáticas naturais é a concentração de aerossóis de origem natural na atmosfera. Os aerossóis são partículas em suspensão na atmosfera, como, por exemplo, poeira, pólen, etc., em estado líquido ou sólido. Um aerossol natural muito comum é o sal marinho, que chega à atmosfera a partir do atrito do vento com a superfície oceânica. Os aerossóis têm papel importante no balanço de energia do sistema Terra-atmosfera, pois podem absorver radiação, influenciando, assim, o balanço de energia. Todavia, são as erupções vulcânicas que produzem os maiores impactos relacionados aos aerossóis na atmosfera. Isto se dá principalmente por três motivos: 1) a grande quantidade de aerossóis que são lançados na atmosfera quando há erupção vulcânica; 2) dependendo da intensidade da erupção vulcânica os aerossóis podem atingir a estratosfera, e como praticamente não há comunicação entre a troposfera (camada mais baixa da atmosfera, entre a superfície e aproximadamente 12 km de altitude) e a estratosfera (camada da atmosfera entre aproximadamente 12 e 50 km de altitude), esses aerossóis podem ficar nessa camada da atmosfera por até cerca de 2 a 3 anos, fazendo com que chegue menos radiação solar à superfície, influenciando assim o balanço de energia do sistema Terra-atmosfera; e 3) os vulcões emitem na atmosfera dióxido de enxofre que vai reagir com o vapor d'água, formando então o ácido sulfúrico e, em seguida, a chamada chuva ácida. Erupções vulcânicas como as do El Chichon no México em 1982 e do Tambora na Indonésia em 1815 lançaram na atmosfera cerca de 7 e 175.000 megatoneladas de ácido sulfúrico na atmosfera, respectivamente.

## **MUDANÇAS CLIMÁTICAS: CAUSAS ANTROPOGÊNICAS**

Considerando os avanços científicos sintetizados pelos relatórios do IPCC em nível global e os estudos recentes observacionais e de modelagem sobre a variabilidade climática de longo prazo e mudanças climáticas futuras, chega-se à conclusão de que o clima, de fato, está mudando global e regionalmente. Entretanto, a pergunta que podemos fazer é: as mudanças climáticas são devidas às causas naturais ou antrópicas?



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved

Figura 1. Variações orbitais – precessão, obliquidade e ecentricidade descritas por Milankovitch. Fonte: Earth Observatory – NASA.

As reconstruções de temperatura dos últimos 1.000 anos indicam que as mudanças da temperatura global não se devem exclusivamente a causas naturais, mesmo considerando as grandes incertezas dos registros paleoclimáticos. Avaliações estatísticas, feitas a partir de simulações com modelos climáticos, confirmam que, considerando somente a variabilidade natural do clima, não é possível explicar o aquecimento observado durante a segunda metade do século XX (Figura 2). Há evidências, porém, de influência solar, especialmente no início do século XX. Ainda que os modelos subestimem a magnitude da resposta da atividade vulcânica ou solar, os padrões de variabilidade espacial e temporal são tais que esses efeitos sozinhos (regiões em azul na Figura 2) não podem explicar o aumento de temperatura observado no último século. A prova disso é que, quando a forçante antrópica é adicionada à forçante natural (região em roxo na Figura 2), os modelos tendem a simular o aquecimento observado no século XX.

O IPCC AR4 [14] sugere que é muito provável (probabilidade maior do que 90%) que a maior parte do aumento observado nas temperaturas médias globais desde meados do século XX tenha se devido ao aumento observado nas concentrações antrópicas de gases de efeito estufa. Essa afirmação representa um avanço em relação ao IPCC TAR [13], que concluiu que é provável que a maior parte do aquecimento observado ao longo dos últimos 50 anos se deveu ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa. A atual capacidade dos modelos climáticos acoplados de simular a evolução da temperatura observada em cada um dos seis continentes fornece uma evidência mais contundente da influência humana no clima do que havia quando da publicação do IPCC TAR.

Conclui-se então que as mudanças climáticas antropogênicas estão associadas às atividades humanas com o aumento da poluição por: queima de combustíveis fósseis, queimadas, desmatamento, formação de ilhas de calor, etc. A partir do final do século XIX e no século XX há aumento significativo da produção industrial e crescente aumento da quantidade de poluentes na atmosfera. Com isso, há também crescente aumento da temperatura global, como pode ser observado na Figura 3, que apresenta a variação da temperatura global média desde 1850 em relação ao período de 1961-1990. Da mesma forma, também há aumento médio global da temperatura da superfície do mar, que é menos intenso do que o aquecimento nas regiões continentais (Figura 4).

Amostras retiradas das geleiras da Antártica revelam que as concentrações atuais de carbono são as mais altas dos últimos 650.000 anos e, provavelmente, dos últimos 20 milhões de anos. Nos últimos 650.000 anos a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera variou entre 180 e 280 partes por milhão por volume (ppmv), ou seja, entre 0,018% e 0,028%. Entretanto, nos últimos 100 anos a quantidade desse gás aumentou para 379 ppmv. O gradativo aumento da temperatura é atribuído principalmente às emissões de poluentes na atmosfera, sobretudo a partir dos últimos 70 anos, com aumento da quantidade de CO<sub>2</sub> atmosférico e, portanto, aumento do efeito estufa, como pode ser observado na Figura 5. Por ano, a atmosfera recebe cerca de 6,3 gigatoneladas (=10<sup>15</sup> gramas) de dióxido de carbono provenientes da queima de combustível fóssil, 1,6 gigatonelada proveniente de mudanças no uso da terra e queimadas, 50,0 gigatoneladas provenientes da respiração das plantas e 60,0 gigatoneladas provenientes da respiração do solo, totalizando 117,9 gigatoneladas de dióxido de carbono. As florestas, através da fotossíntese, retiram da atmosfera cerca de 111,0 gigatoneladas por ano de carbono e os oceanos absorvem cerca de 1,7 gigatoneladas por ano. Se fizermos o balanço atmosférico do carbono, temos: (6,3 + 1,6 + 50,0 + 60,0) + (-111,0 -1,7) = 5,2 gigatoneladas de carbono por ano. Entretanto, as observações indicam que

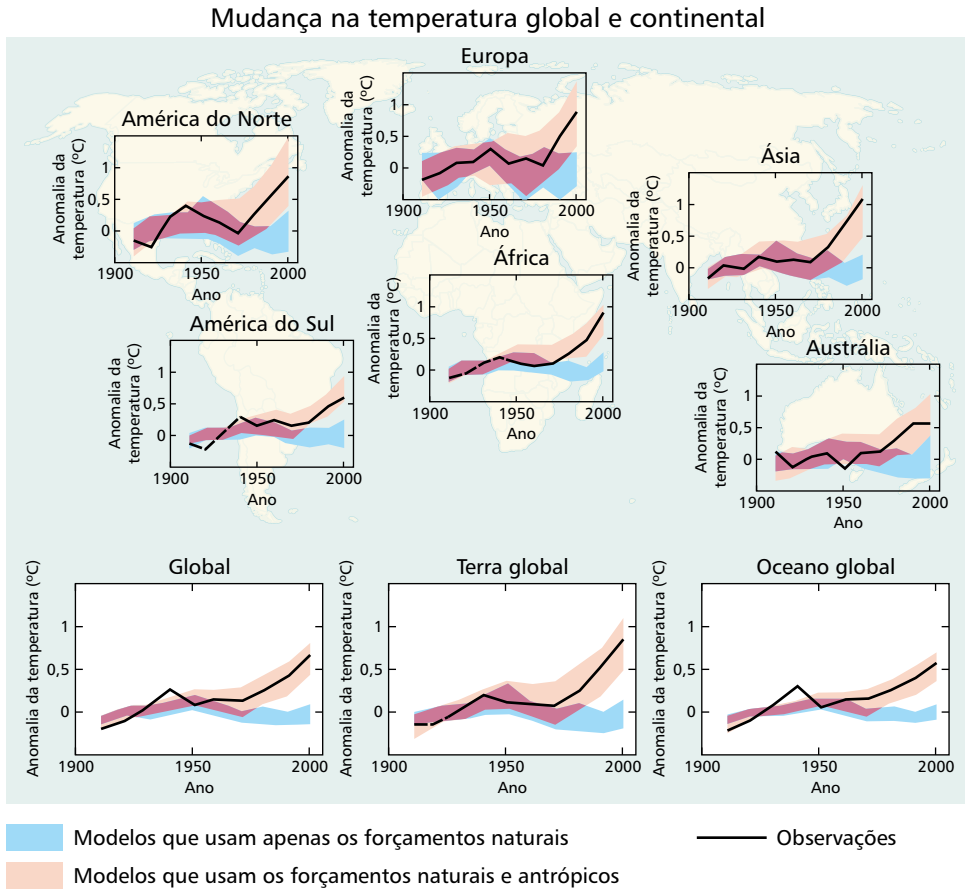


Figura 2. Comparação das mudanças observadas de temperatura da superfície com resultados simulados por modelos climáticos, usando-se forçamentos naturais e antrópicos. As médias decenais das observações são apresentadas para o período de 1906 a 2005 (linha preta) plotadas sobre o centro da década e relativas à média correspondente para 1901-1950. As linhas são tracejadas quando a cobertura espacial é inferior a 50%. As zonas azuis indicam a faixa de 5 a 95% para as 19 simulações dos cinco modelos climáticos com o uso apenas dos forçamentos naturais devidos à atividade solar e aos vulcões. As zonas vermelhas mostram a faixa de 5 a 95% para as 58 simulações dos 14 modelos climáticos com o uso dos forçamentos natural e antrópico. *Fonte:* IPCC 2007 ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

em média está ocorrendo um aumento médio de 3,2 gigatoneladas de carbono por ano, ou seja, 2,0 gigatoneladas por ano a menos do que o balanço. Isso mostra quão incompleto é o nosso entendimento sobre o ciclo de carbono global. Todavia, é possível que essa diferença possa ser encontrada em qualquer um dos maiores reservatórios de carbono da Terra, mas é mais provável que os reservatórios com um pequeno tempo de residência do carbono, como a vegetação, solos ou oceanos, são os mais importantes e podem explicar essa diferença. Apesar dessa diferença, o importante é que o excesso de carbono na atmosfera contribui para a intensificação do efeito estufa, aumentando então a temperatura média do planeta. Cerca de 80% do aquecimento global atual é devido ao CO<sub>2</sub>. É importante ressaltar que as mudanças climáticas aparecem diretamente relacionadas aos ciclos biogeoquímicos do carbono e do nitrogênio.

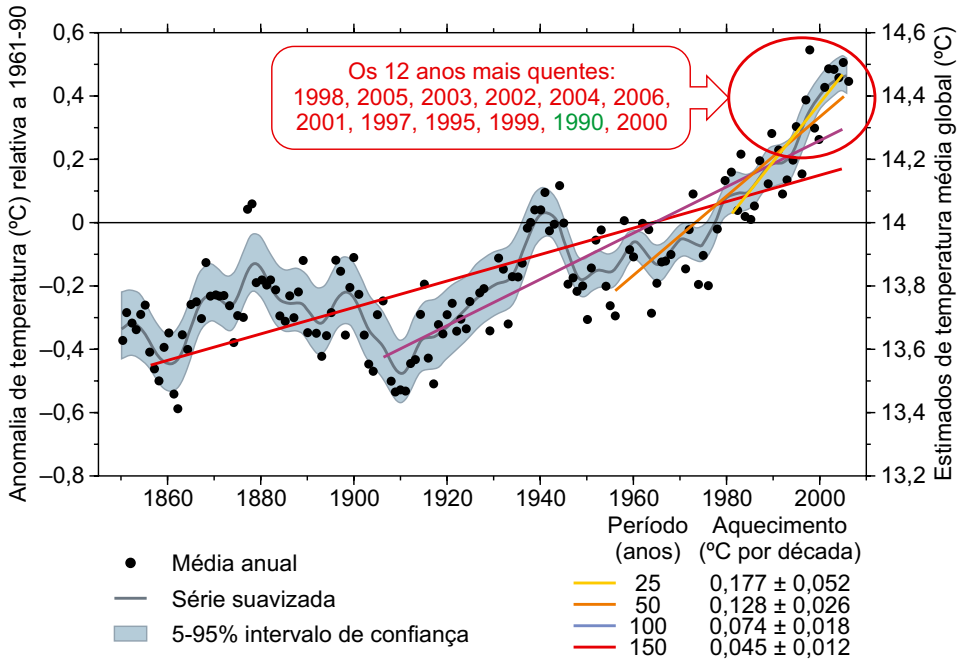


Figura 3. Variação da temperatura média global à superfície desde 1850 até 2006 em relação ao período de 1961 a 1990. Fonte: IPCC AR4 (www.ipcc.ch).

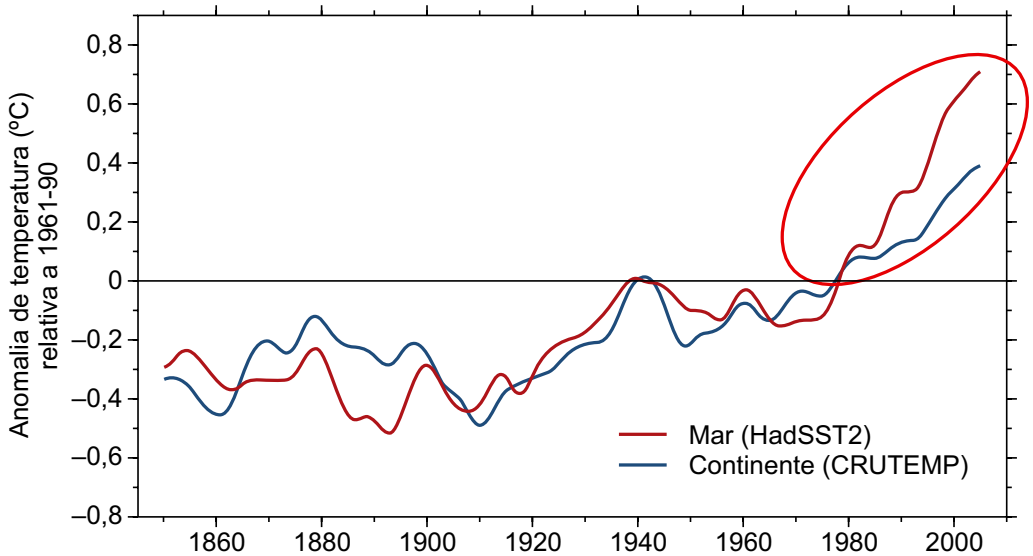


Figura 4. Variação da temperatura média global à superfície desde 1850 até 2006 para as regiões continentais (linha marrom) e oceanos (linha azul) em relação ao período de 1961 a 1990. Fonte: IPCC AR4 (www.ipcc.ch).



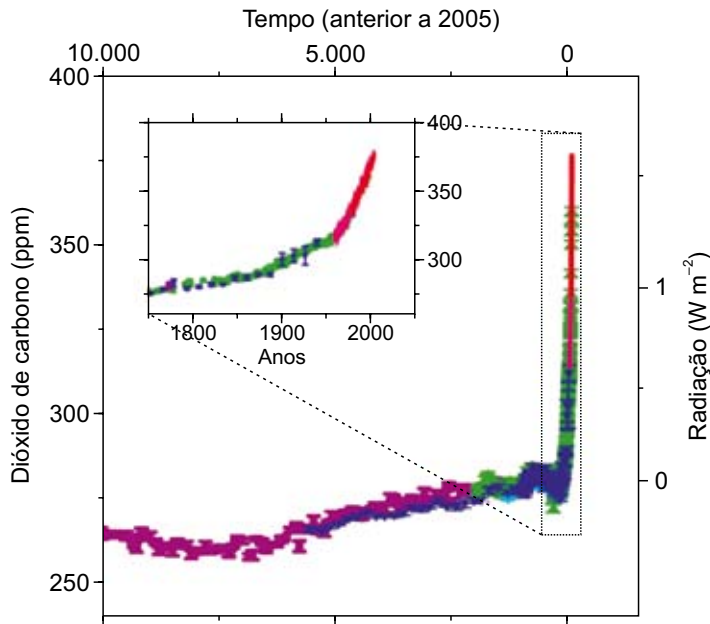


Figura 5. Evolução temporal da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera nos últimos 10.000 anos (sendo o ano zero 2005), e desde 1750 até o presente (painel interno à figura). Fonte: IPCC AR4 ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

Os países desenvolvidos são os principais emissores de dióxido de carbono na atmosfera, todavia, em alguns países em desenvolvimento é também grande a quantidade de emissão de dióxido de carbono por mudanças no uso do solo. No caso do Brasil, 75% das emissões de dióxido de carbono são provenientes de mudanças no uso do solo e da terra e por queimadas.

Uma dificuldade relacionada às mudanças climáticas está em separar o sinal decorrente das mudanças climáticas naturais daquele das mudanças antropogênicas, e ainda projetar os efeitos dessas mudanças para o futuro. As projeções de aumento de CO<sub>2</sub> indicam que ao final do século XXI, se for adotado um cenário de baixas emissões do efeito estufa (cenário B2), a concentração de CO<sub>2</sub> ficará em torno de 550 ppmv, ou 0,055%. Entretanto, no cenário de altas emissões (A1) a concentração poderá ser de cerca de 1000 ppmv, ou seja, cerca de três vezes mais do que as concentrações atuais.

É importante ressaltar que o CO<sub>2</sub> não é o único gás de efeito estufa que vem aumentando em concentração na atmosfera em virtude das atividades humanas. Há também aumento das concentrações de metano, óxidos de nitrogênio, ozônio troposférico e vapor d'água.

E quais são/serão as principais conseqüências do aquecimento global? Derretimento das calotas polares, com aumento do nível médio do mar e inundação de regiões mais baixas. A evaporação nas regiões equatoriais irá aumentar e com isso os sistemas meteorológicos, como furacões e tempestades tropicais, ficarão mais ativos. Além disso, deverá aumentar a incidência de doenças tropicais, como malária, dengue e febre amarela.

De forma geral, há grande dificuldade de planejar ações compensatórias dos possíveis impactos das mudanças climáticas globais. Isso porque, embora muitos estudos tenham sido ou estejam sendo feitos, ainda há investigações e avanços a serem realizados para se obter um conhecimento mais sólido e consistente da intensidade dos impactos das alterações do clima em regiões específicas, como, por exemplo, no Brasil.

Desde 1995 o IPCC vem ampliando suas áreas de interesse para além do entendimento dos mecanismos que levam às alterações climáticas, desdobrando-se na avaliação dos impactos de mudança climática global e regional sobre a biodiversidade e os ecossistemas naturais ou antropizados, tanto sobre setores do processo produtivo (como agricultura e turismo) quanto sobre a macroeconomia, a saúde pública, a oferta de energia ou de emprego, etc.

A divulgação do último relatório do IPCC AR4, feita em fevereiro de 2007 [14], apresentou mais detalhes e resultados mais precisos do que os apresentados nos últimos relatórios. As concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso aumentaram bastante em consequência das atividades humanas desde 1750 e agora ultrapassam em muito os valores pré-industriais. Os aumentos globais da concentração de dióxido de carbono se devem principalmente ao uso de combustíveis fósseis e à mudança no uso da terra. Já os aumentos da concentração de metano e óxido nitroso se devem principalmente à agricultura. A compreensão das influências antrópicas no aquecimento e resfriamento do clima melhorou desde a publicação do IPCC TAR [13], promovendo um nível muito alto de confiança de que o efeito líquido global das atividades humanas, em média, desde 1750 foi de aquecimento.

## **OBSERVAÇÕES DO AQUECIMENTO GLOBAL**

A temperatura média global do planeta à superfície vem subindo nos últimos 120 anos, já tendo aumentado de 0,6 a 0,7°C, e a maior parte desse aquecimento ocorreu nos últimos 50 anos. A última década foi a mais quente da história recente da Terra, sendo 1998, 2005, 2003, 2002, 2004, 2006, 2007, 2001, 1997, 1995, 1999, 1990, 2000 e 1991 os anos mais quentes já registrados. As informações paleoclimáticas confirmam que o aquecimento do último meio século não foi comum, pelo menos se comparado aos últimos 1.300 anos. Hoje, muitos cientistas enxergam inúmeras evidências apontando não mais para a possibilidade de o Planeta Terra enfrentar futuras mudanças no clima, mas indicando que já estamos vivendo a era das mudanças climáticas resultantes do aquecimento global.

Os relatórios do IPCC de 2001 e de 2007 levantaram indicadores que confirmam que durante o século XX:

- Houve um aumento da temperatura média global de 0,6°C ( $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ).
- Entre 1906 e 2005 o aumento da temperatura média global foi de 0,74°C.
- A temperatura no Hemisfério Norte aumentou mais do que em qualquer século nos últimos 1000 anos.
- A década de 1990 foi a mais quente do milênio; a amplitude da temperatura diária diminuiu de 1950 para 2000.
- Houve uma diminuição, em praticamente todas as áreas continentais, do número de dias com geadas.
- A precipitação nos continentes aumentou de 5 a 10% no Hemisfério Norte e diminuiu em várias regiões (oeste da África e partes do Mediterrâneo).
- Aumentou a ocorrência de precipitações fortes nas latitudes médias do Hemisfério Norte.
- Aumentou a frequência de secas severas no verão. Em algumas regiões da Ásia e África a frequência e a intensidade aumentaram nas últimas décadas.
- Aumentou a frequência, permanência e intensidade do fenômeno El Niño nas últimas décadas, se comparado com os últimos 100 anos.
- Houve um aumento de 12 a 22 cm no nível do mar.
- A taxa de aumento no nível do mar era de 1,8 mm por ano no período de 1961 a 2003 e entre 1993 e 2003 passou a ser de 3,1 mm por ano.

- A espessura da camada de gelo no Ártico está 40% mais fina nas últimas décadas e está diminuindo 2,7% por década.
- A duração do gelo sobre rios e lagos diminuiu em média em duas semanas nas latitudes médias do Hemisfério Norte.
- A extensão da camada de gelo no Ártico diminuiu em 10 a 15% na primavera/verão desde 1950.
- Houve retração das geleiras não polares.
- Observações por satélite (a partir da década de 1960) indicam diminuição da cobertura de neve em 10%.
- O período de crescimento das plantas no Hemisfério Norte aumentou de 1 a 4 dias por década nos últimos 40 anos.
- No Hemisfério Norte, as plantas estão florescendo mais cedo, as aves chegam antes e o acasalamento começa mais cedo. Os insetos também aparecem mais cedo.
- Também no Hemisfério Norte está ocorrendo o branqueamento de corais.

Em relação aos eventos extremos climáticos, o IPCC AR4 [14] mostra que:

- Secas mais intensas e mais longas foram observadas sobre áreas mais amplas desde 1970, especialmente nos trópicos e subtropicais. O aumento do clima seco, juntamente com temperaturas mais elevadas e redução da precipitação, contribuíram para as mudanças na seca.
- As mudanças nas temperaturas da superfície do mar e nos padrões de vento e a redução da neve acumulada e da cobertura de neve também foram relacionadas com as secas.
- A frequência dos eventos de precipitação extrema aumentou sobre a maior parte das áreas continentais, de forma condizente com o aquecimento e os aumentos observados no vapor d'água atmosférico.
- Mudanças generalizadas nas temperaturas extremas foram observadas ao longo dos últimos 50 anos. Dias frios, noites frias e geadas se tornaram menos frequentes, enquanto dias quentes, noites quentes e ondas de calor se tornaram mais frequentes.

## **CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS**

Os cenários climáticos projetados pelo IPCC AR4 para este século indicam que a temperatura média do planeta continuará subindo, no mínimo mais 1,8°C e no máximo cerca de 4,0°C, com a melhor estimativa, segundo o IPCC [14], em torno de 3,0°C, conforme podemos observar na Figura 6. Esse aquecimento varia segundo o grau de emissão de GEE: no cenário de altas emissões (Figura 6 – A2 – linha vermelha) o aquecimento até o final do século XXI poderá ser de até 3,6°C (variando de 2,0 a 5,4°C); no cenário de mais altas emissões (A1F1) o aquecimento é de 4,0°C (variando de 2,4 a 6,4°C); no cenário de baixas emissões (B1 – linha azul) o aquecimento até o final do século XXI será de 1,8°C (variando de 1,1 até 2,9°C). Para as próximas duas décadas, projeta-se um aquecimento de cerca de 0,2°C por década para uma faixa de cenários de emissões do GEE. Mesmo que as concentrações de todos os gases de efeito estufa e aerossóis se mantivessem constantes nos níveis do ano 2000, seria esperado um aquecimento adicional de cerca de 0,1°C por década.

As projeções dos modelos indicam variações do clima em diversas escalas. Como a forçante radiativa do sistema climático muda, o continente aquece mais rapidamente do que os oceanos, e há maior aquecimento relativo em altas latitudes. As projeções dos modelos indicam menor aumento da temperatura do ar próximo da superfície no Atlântico Norte e na região

circumpolar sul em relação à média global. As projeções indicam ainda decréscimo na amplitude da temperatura diurna em muitas áreas. A maior parte dos modelos mostra um decréscimo da amplitude diurna da temperatura do ar próximo à superfície no inverno e aumento no verão em regiões continentais do Hemisfério Norte. Com o aumento da temperatura, a cobertura de neve e a área de gelo sobre o mar diminuirão, sobretudo no Hemisfério Norte.

Se as tendências de crescimento das emissões se mantiverem, os modelos climáticos indicam que poderá ocorrer aquecimento de até 8 °C em algumas regiões do globo até o final do século XXI (Figura 7). Conclui-se que, mesmo no cenário de baixas emissões de gases do efeito estufa (cenário B1), as projeções dos diversos modelos do IPCC indicam aumento da temperatura, sobretudo no Hemisfério Norte, mesmo no período entre 2020 e 2029 (Figura 7).

A associação entre eventos extremos de tempo e clima observados e as mudanças do clima é recente. As projeções indicam maior número de dias quentes e ondas de calor em todas as regiões continentais, principalmente em regiões onde a umidade do solo vêm diminuindo. Há ainda projeções de aumento da temperatura mínima diária em todas as regiões continentais, principalmente onde houve retração de neve e de gelo. Além disso, dias com geadas e ondas de frio podem se tornar menos frequentes. As projeções de mudanças da temperatura do ar próximo à superfície e na umidade da superfície podem resultar em aumento da sensação térmica (a qual é uma medida dos efeitos combinados da temperatura e da umidade).

Há ainda muita incerteza em relação às possíveis mudanças na precipitação pluviométrica. Entretanto, as projeções do IPCC [14] indicam que é muito provável que haja aumento da intensidade da precipitação em diversas regiões, sobretudo na região tropical. Além disso, há projeções de secas generalizadas em regiões continentais durante o verão. É possível que os ciclones tropicais futuros (tufões e furacões) sejam mais intensos, com ventos e precipitações mais intensos associados com o aumento da temperatura do mar tropical.

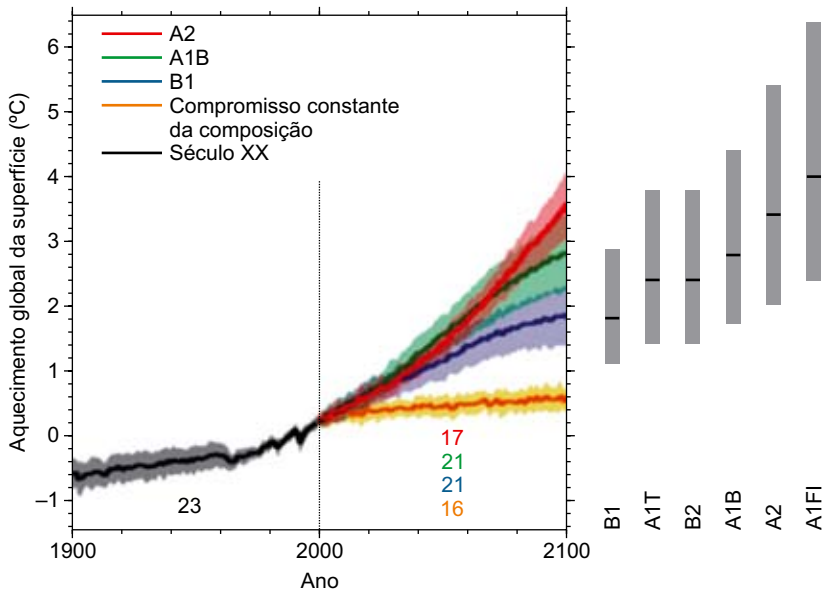


Figura 6. Variações da temperatura média global a partir do ano 1900 e cenários projetados para o século XXI para vários cenários de emissão de gases de efeito estufa. Fonte: IPCC, 2007.

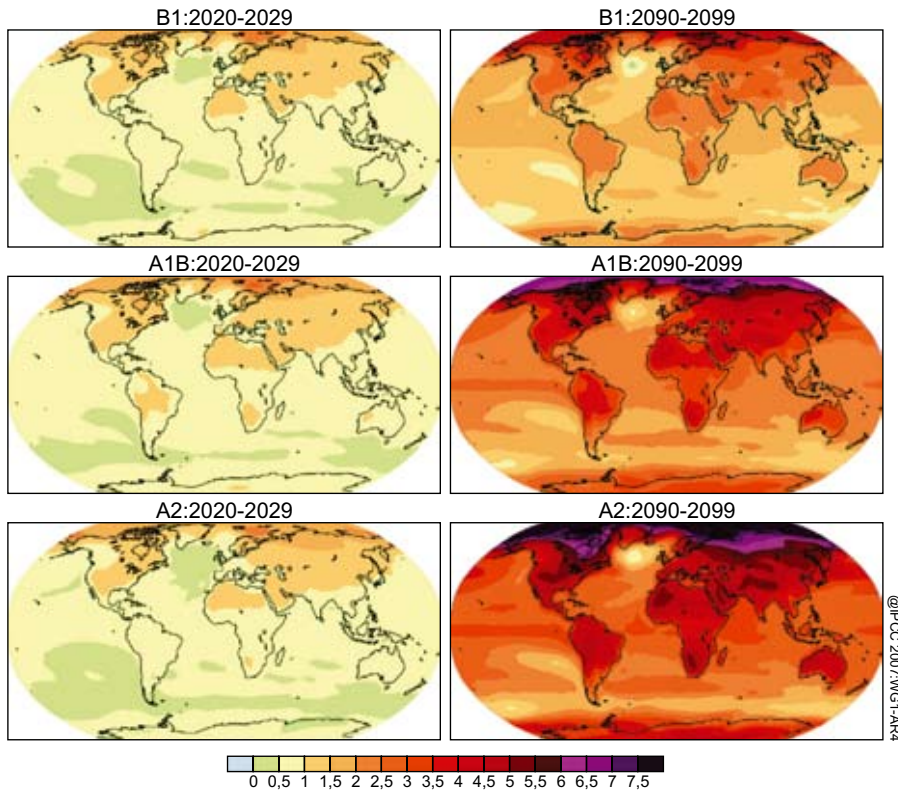


Figura 7. Projeções da mudança de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para o início (2020-2029) e final (2090-2099) do século XXI relativo ao período 1980-1999, a partir das projeções da média dos modelos de circulação geral da atmosfera e dos oceanos para os cenários de baixas (B1) e altas emissões (A2) e para o cenário de transição (A1B) de gases de efeito estufa – cenários SRES do IPCC. *Fonte:* IPCC, 2007.

Muitos modelos mostram um aumento da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial, o que sugere uma situação futura de El Niño quase permanente. As causas desse aumento da temperatura do Pacífico Equatorial são incertas, e a confiança nessas projeções ainda não é muito grande, haja vista que os modelos climáticos apresentam deficiências em simular o fenômeno El Niño. Entretanto, as projeções indicam pouca mudança, ou pequeno aumento da amplitude de episódios El Niño nos próximos 100 anos, ainda que as incertezas em relação a isso ainda sejam grandes. Também é provável que o aquecimento vinculado com o aumento da concentração de gases de efeito estufa acentue a variabilidade das precipitações monçônicas na Ásia.

A retração geral dos glaciares e capas de gelo continuará durante o século XXI e se projeta que a capa de neve e o gelo marinho do Hemisfério Norte continuarão diminuindo. As projeções do IPCC [14] indicam diminuição do gelo no Ártico e na Antártica. Em algumas das projeções mais pessimistas estima-se que o gelo desaparecerá no Ártico no fim do verão, a partir da segunda metade do século XXI. Estudos de modelagem sugerem que, em média global, a evolução da massa glacial diminui principalmente pelas mudanças na temperatura do que por mudanças na precipitação. É provável que a capa de gelo da Antártica adquira maior massa em consequência do aumento das precipitações e que a capa de gelo da Groenlândia perca massa pelo fato de o aumento do escoamento superficial ser maior do que as precipitações. A capa de gelo

da Antártica ocidental tem atraído especial atenção porque contém gelo suficiente para elevar o nível do mar em cerca 6 metros e porque, como grande parte da superfície terrestre da Antártica está abaixo do nível médio do mar, se houvesse um degelo da região em torno da Antártica, a invasão do mar nessa região poderia dar lugar a um rápido degelo da região continental da Antártica. Entretanto, há amplo consenso de que é pouco provável que durante o século XXI ocorra perda de gelo continental antártico que determine aumento importante do nível do mar.

Segundo o IPCC [13], de forma global, a taxa de aumento do nível médio relativo do mar nas áreas costeiras, como consequência da expansão termal dos oceanos e do derretimento de calotas polares e geleiras continentais, representa importante impacto em termos sócio-econômicos e ecológicos. Essa taxa de aumento do nível médio do mar foi de 18 cm por século entre 1961 e 2003 e aumentou para 31 cm por século entre 1993 e 2003 [14]. O significado econômico do aumento do nível médio relativo do mar terá consequências para a pesca, agricultura, navegação, lançamento de efluentes, proteção costeira, produtividade biológica e biodiversidade. Logo, essas áreas serão alteradas significativamente. As projeções da elevação média do nível do mar em escala mundial entre 1990 e 2100, obtidas com uma série de modelos de circulação geral da atmosfera e dos oceanos que levaram em conta os efeitos diretos das emissões de aerossóis e sulfatos, oscilam entre 0,18 e 0,59 metro. Essa margem de variação reflete a incerteza que caracteriza a elaboração desses modelos. Os principais fatores que contribuem para aumento do nível do mar no século XXI, segundo o IPCC [13], são:

- Expansão térmica entre 0,11 e 0,43 m, que se acelera ao final do século XXI.
- Os glaciares, com uma contribuição entre 0,01 e 0,23 m.
- Groenlândia, com uma contribuição de -0,02 a 0,09 m.
- Antártica, com uma contribuição de -0,17 a 0,02 m.

Para efeito de calcular a mudança total, também leva-se em conta outros fatores que contribuem em menor escala, como o degelo de capas de gelo permanentes, o depósito de sedimentos e a contribuição constante das capas de gelo como consequência das mudanças climáticas que já vêm ocorrendo desde o Último Máximo Glacial. A maior parte dos modelos indica aumento no nível do Oceano Ártico e aumento inferior à média no Oceano Antártico. Além do mais, os movimentos das massas continentais, tanto isostáticos como tectônicos, continuarão durante o século XXI a um ritmo que não depende da mudança climática. Prevê-se que, para o ano de 2100, muitas regiões que atualmente registram diminuição relativa no nível do mar experimentarão a mudança para aumento relativo no nível do mar.

O aquecimento global pode provocar mudanças nos ecossistemas terrestres com mudanças nos padrões globais da vegetação. Estudos recentes indicam que, ao contrário da maioria das atividades humanas, ecossistemas naturais não apresentam grande capacidade de adaptação (ou bem-sucedida migração em resposta) à magnitude das mudanças climáticas se estas ocorrerem no curto intervalo de décadas. Estes podem normalmente migrar ou se adaptar a mudanças climáticas que ocorram na escala de muitos séculos a milênios. Quando somamos ao aquecimento global as alterações de vegetação resultantes das mudanças dos usos da terra, notadamente os desmatamentos das florestas tropicais e dos cerrados, assim como o desenvolvimento da agricultura e urbanização, é quase certo que acontecerão rearranjos importantes nos ecossistemas e mesmo redistribuição de biomas. A assombrosa velocidade com que tais alterações estão ocorrendo em comparação àquelas dos processos naturais em ecossistemas introduz séria ameaça à megadiversidade de espécies da flora e da fauna dos ecossistemas, em especial da Amazônia, com o provável resultado de sensível empobrecimento biológico.



Importante ressaltar que a maioria dos gases do efeito estufa tem longa vida (décadas a séculos) na atmosfera até serem removidos. Cálculos recentes com sofisticados modelos climáticos globais mostraram que, mesmo que as concentrações desses gases na atmosfera fossem mantidas constantes nos valores atuais, as temperaturas continuariam a subir por mais de 200 anos e o nível do mar, por mais de um milênio.

### **IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL (AGRICULTURA, BIODIVERSIDADE, RECURSOS HÍDRICOS, SAÚDE HUMANA, ZONAS COSTEIRAS, ETC.)**

Quando se analisam os possíveis impactos das mudanças climáticas, as avaliações do IPCC indicam que os países em desenvolvimento são, de modo geral, os mais vulneráveis. Para o Brasil, não é difícil entender o porquê dessa vulnerabilidade: encontram-se abundantes exemplos de impactos adversos da variabilidade natural do clima, como as secas e estiagens, as cheias e inundações e os deslizamentos em encostas, somente para citar alguns. Decorre daí que, quanto maior tenha sido a dificuldade histórica de uma sociedade em conviver com a variabilidade natural do clima, e com seus extremos, maior será o esforço para adaptar-se às mudanças futuras do clima, e deve-se levar em conta que a frequência de ocorrência de muitos tipos de extremos climáticos poderá aumentar. Em particular, há setores que podem ser especialmente vulneráveis, tais como: os ecossistemas naturais (com possíveis mudanças nas coberturas vegetais atuais e na biodiversidade dos ecossistemas), os agroecossistemas e os sócio-econômicos (através dos efeitos na agricultura, recursos hídricos, saúde humana, etc.).

Entretanto, devemos considerar que o planeta também passou por variações climáticas naturais. No passado remoto, o Brasil já experimentou grandes mudanças climáticas e geológicas, como, por exemplo, a dominância de coberturas por geleiras e mares em algumas regiões. Assim, claramente, houve também mudanças na biodiversidade, na topografia, nos solos, etc., ou seja, as interações físicas e biogeoquímicas existentes entre esses componentes (climático, geológico, ecossistêmico, topográfico, de solos, etc.) foram determinantes nos cenários observados e estudados hoje por uma grande quantidade de diferentes especialistas.

Marengo [17] apresenta uma revisão dos impactos observados das mudanças climáticas ocorridas no Brasil:

- Uma análise das evidências observacionais integradas para o território brasileiro aponta para um aumento das temperaturas médias e extremas no Brasil, tanto para valores anuais como sazonais. Para o Brasil, a temperatura média aumentou aproximadamente 0,75 °C até o final do século XX, sendo o ano mais quente no Brasil o de 1998 (aumento de até 0,95 °C em relação à normal climatológica que é de 24,9°C). As temperaturas mínimas têm aumentado em todo o país, com uma estação mostrando aumento expressivo de até 1,4°C por década, enquanto as temperaturas máximas e médias têm aumentado em até 0,6°C e 0,4-0,6°C por década, respectivamente, em quase todo o país.
- Em relação à precipitação, as análises observacionais do clima do presente não apontam para tendência de redução de chuvas na Amazônia (devido ao desmatamento). Observam-se variações interdecadais de períodos relativamente mais secos ou chuvosos no Brasil. Regionalmente, tem sido observado aumento das chuvas no Sul e partes do Sudeste do Brasil, na bacia do Paraná-Prata, desde 1950, consistente com tendências similares em outros países do Sudeste da América do Sul. Para o Nordeste, as chuvas não apresentam tendências significativas de aumento ou redução, e, na Amazônia, as tendências também não são muito claras em âmbito regional. Pode-se afirmar que

essas regiões experimentam variações interdecadais, com períodos de aproximadamente 25-30 anos, alternando épocas mais ou menos chuvosas.

- Sobre eventos extremos, têm-se observado tendências positivas na frequência de noites e dias quentes e tendências negativas na frequência de noites e dias frios, consistentes com o cenário de aquecimento global. As tendências positivas de noites quentes no Sudeste do Brasil variam de 5% na década de 1950 até quase 35% no início do século XXI. Por outro lado, a tendência de dias frios foi de 25-30% na década de 1970, chegando a 5-10% em 2001-2002.
- Para o Sudeste da América do Sul tem-se observado aumento na intensidade de episódios e frequência de dias com chuva intensa. Os dados das estações mostram tendência de aumento dos episódios de chuva intensa (mais de 10 mm) em grande parte do Sudeste da América do Sul, Centro da Argentina e até o Centro-Oeste e Sudeste do Brasil. Vários estudos já identificaram tendências positivas no número de dias com chuva intensa e chuva muito intensa concentradas em curto tempo.
- Nos últimos 50 anos foi observada na costa brasileira tendência de aumento do nível relativo do mar, da ordem de 40 cm/século, ou 4 mm.

No Brasil, a variabilidade natural do clima, sentida através de eventos extremos e alternados, como secas e estiagens, propicia grandes dificuldades de recuperação para a sociedade. Eventos climáticos extremos podem ser mais frequentes, e alguns exemplos atuais são as chuvas extremas no Nordeste do Brasil, que foram mais de 600% acima do normal em 15 dias de janeiro 2004, e o recente fenômeno Catarina, que afetou a costa de Santa Catarina e Rio Grande do Sul em março de 2004. Dessa forma, se pensarmos que o aquecimento global pode intensificar a ocorrência desses eventos, maior deverá ser a capacidade da população em se adaptar a essas mudanças.

As projeções da temperatura para o final do século XXI para a América do Sul geradas pelos 21 modelos de IPCC AR4 podem ser vistas na Figura 8, na qual notamos que todos os modelos indicam aumento da temperatura para praticamente todo o continente.

De qualquer maneira, parece certo que o país estará sujeito a impactos climáticos adversos, aos quais a população e os ecossistemas naturais podem ser vulneráveis. Ecossistemas costeiros e ribeirinhos em áreas sob influência das marés poderão ser profundamente alterados, com uma eventualmente rápida (da ordem de décadas) elevação do nível do mar. Também, a agricultura e a geração de hidroeletricidade poderiam ser afetadas por mudanças na distribuição das chuvas ou na ocorrência de períodos secos extensos. No caso da bacia Amazônica, sabe-se que ela contém enorme porção da biodiversidade do mundo e, além disso, possui a maior fonte de escoamento de água da Terra, representando aproximadamente 15 a 20% do fluxo global dos rios. Dessa forma, o ciclo hidrológico é um fator-chave do sistema climático global e, uma vez que as mudanças climáticas afetem a região Amazônica, espera-se que haja efeitos decorrentes no clima global e, através de interações consecutivas, haja aumento no risco de perda da biodiversidade nessa região. Entretanto, quando se trata do ciclo hidrológico, em particular da quantidade de chuvas, ainda não há consenso sobre o que pode ocorrer. Alguns modelos projetam diminuição das chuvas na Amazônia, enquanto outros não indicam alteração, ou até mesmo apontam aumento, conforme se observa na Figura 9.

O Brasil, com a sua dimensão continental, apresenta diversos ecossistemas que foram definidos e limitados ao longo do tempo, em decorrência de características climáticas, de solos, topográficas, biogeoquímicas, etc. No entanto, se considerarmos as projeções de cenários climáticos futuros do IPCC AR4, quais as possíveis mudanças na distribuição dos biomas no Brasil?



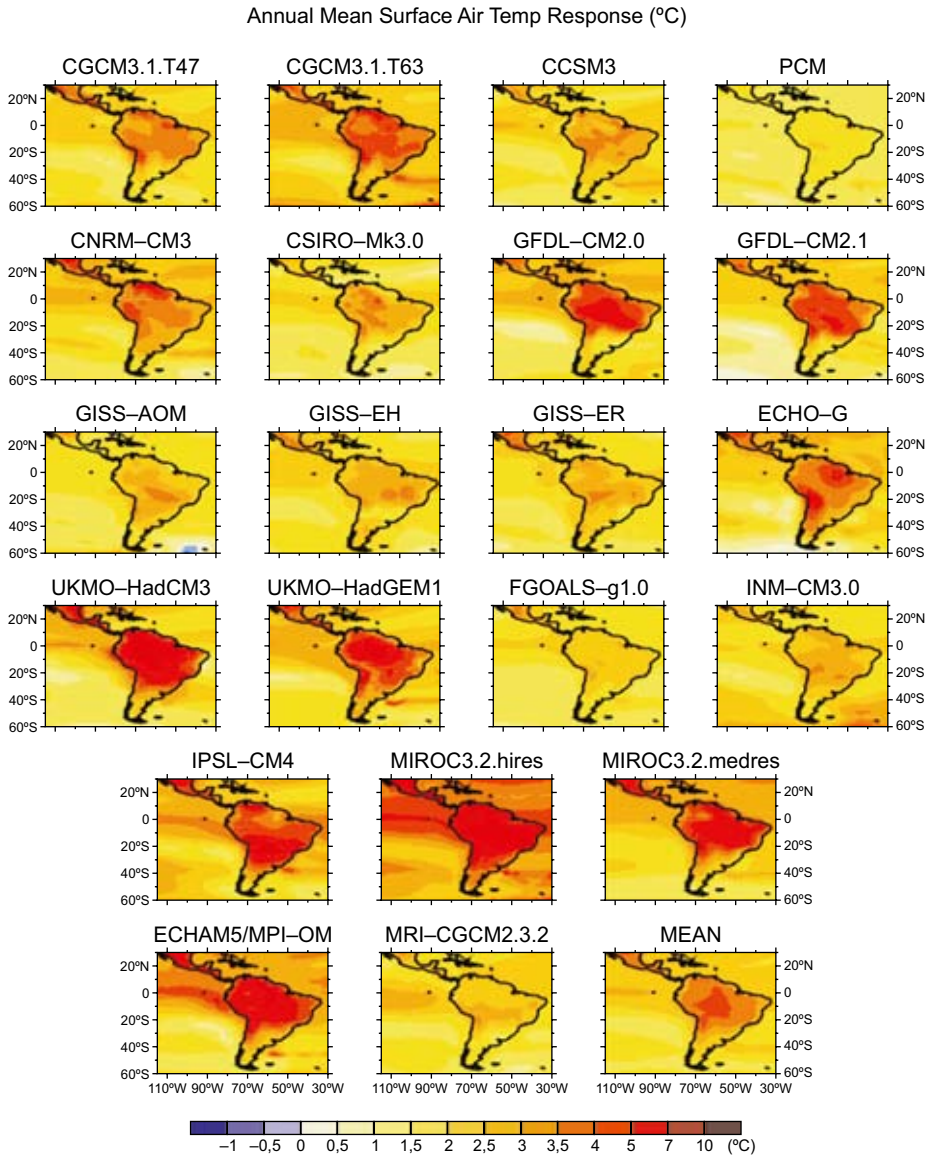
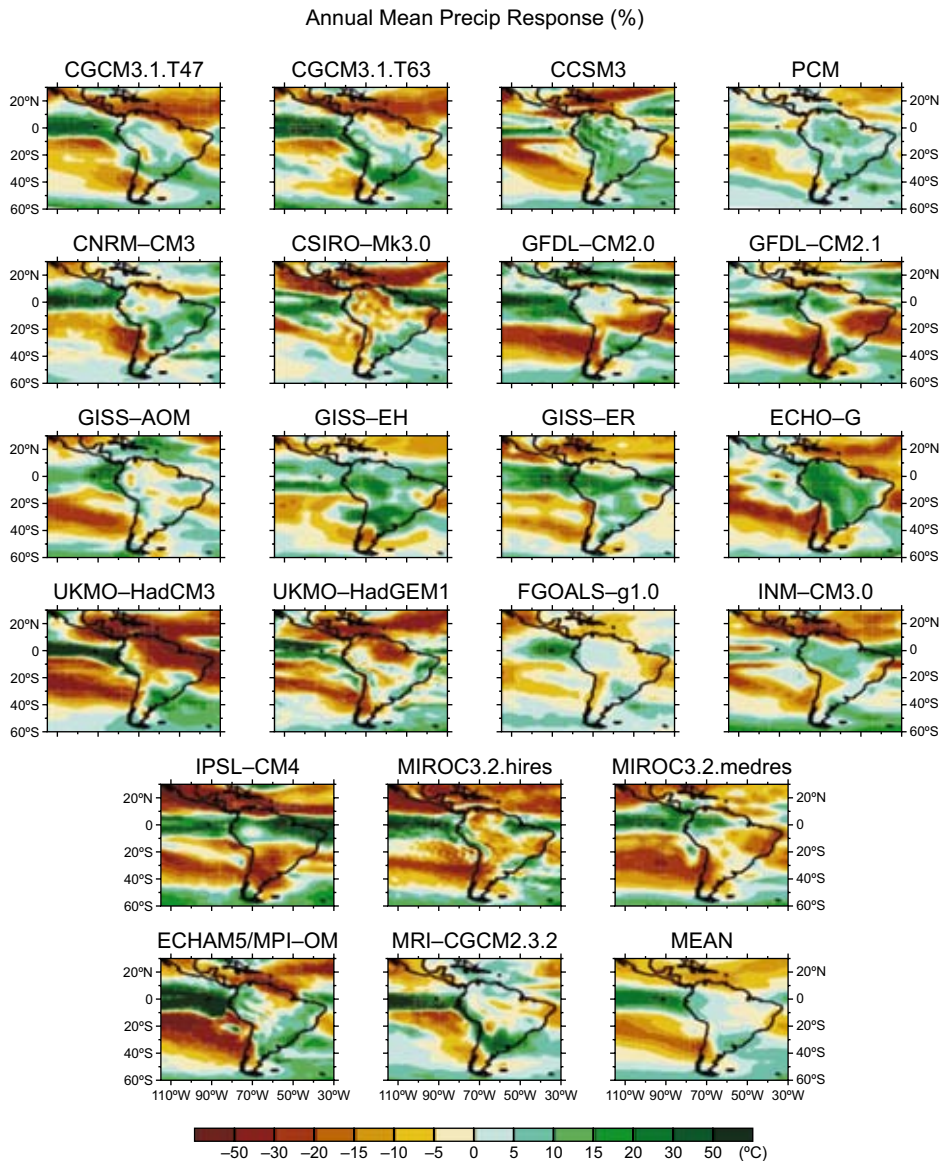


Figura 8. Projeção de mudanças na temperatura média anual na América do Sul para o período de 2089 a 2099 relativo ao período de 1980 a 1999, considerando o cenário A1B do IPCC AR4. Os mapas mostram simulações de 21 modelos diferentes e a média de todos os modelos (MEAN). *Fonte:* IPCC AR4 ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

Busquemos avaliar quantitativamente as prováveis alterações e redistribuições de dois grandes biomas (floresta e savana) em resposta a cenários de mudanças climáticas projetadas por quinze diferentes modelos climáticos globais avaliados pelo IPCC para o século XXI. A ferramenta utilizada é um modelo matemático desenvolvido por pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), chamado de Modelo de Vegetação Potencial do CPTEC/INPE [26,28,33]. Em tal modelo, os biomas em todo o globo (floresta tropical, temperada ou boreal, savana, campos, caatinga, tundra, desertos, etc.) estão univocamente relacionados a um



**Figura 9.** Projeção de mudanças da chuva média anual (em %) na América do Sul para o período de 2089 a 2099 relativo ao período de 1980 a 1999, considerando o cenário A1B do IPCC. Os mapas mostram simulações de 21 modelos diferentes e a média (MEAN). *Fonte:* IPCC AR4 ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

conjunto de parâmetros climáticos (temperaturas, distribuição de chuvas, água no solo, evapotranspiração, etc.). Dessa maneira, podem-se superpor nesse modelo os cenários climáticos futuros e interpretar possíveis mudanças de biomas.

Para a América do Sul Tropical, tomando-se uma média dessas projeções e sem considerar as mudanças dos usos do solo, constata-se a projeção do aumento da área de savanas na Amazônia central e leste (o chamado processo de savanização da Amazônia) e diminuição da área de caatinga no semi-árido do Nordeste do Brasil (Figura 10).

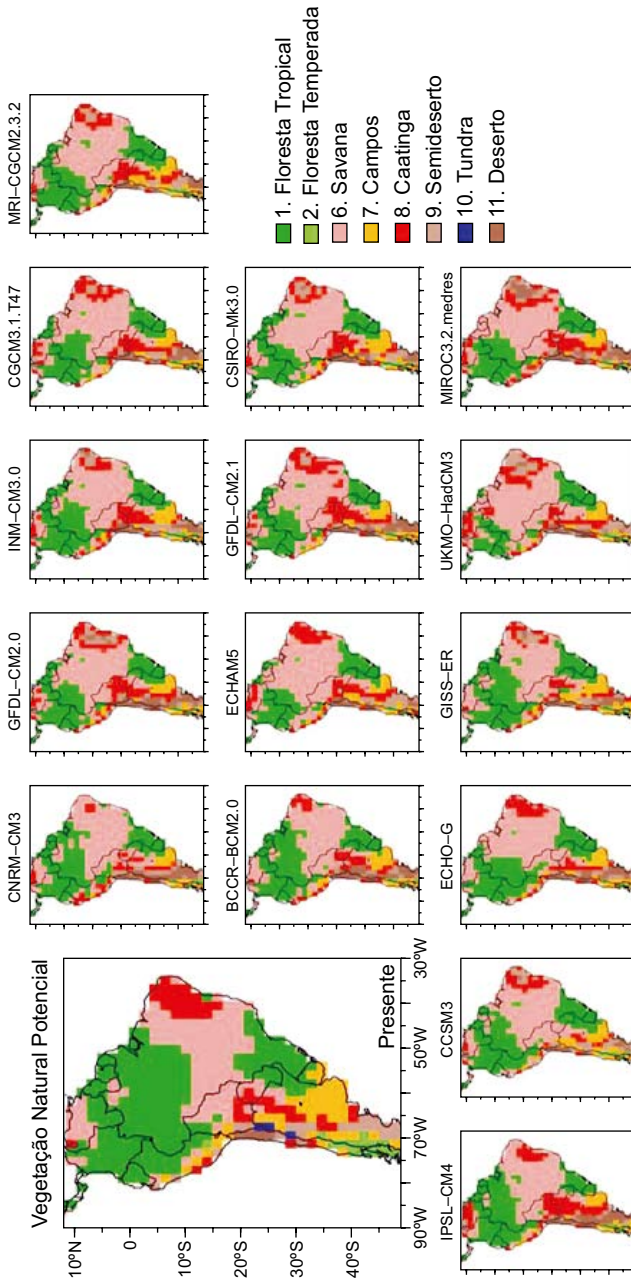


Figura 10. Distribuições dos biomas potenciais na América do Sul para 2090-2099 projetadas pelo Modelo de Vegetação Potencial do CPTEC/INPE, com base nos cenários climáticos do IPCC derivados de 15 modelos para o cenário de altas emissões A2. Os principais biomas para a América do Sul são representados pelas seguintes cores no mapa: verde = floresta tropical; rosa = savana (cerrado); vermelho = caatinga; amarelo = campos extratropicais; marrom-escuro = semideserto; marrom-claro = floresta decídua. O painel central com o título “current pot veg” representa os biomas potenciais naturais em equilíbrio com o clima atual. *Fonte:* Salazar et al., 2007.

Em termos simples, o aumento de temperatura induz a maior evapotranspiração (soma da evaporação da água à superfície com a transpiração das plantas), reduzindo a quantidade de água no solo, mesmo que as chuvas não diminuam significativamente. Esse fator pode por si só pode desencadear a substituição dos biomas existentes hoje por outros mais adaptados a climas com menor disponibilidade hídrica para as plantas (por exemplo, savanas substituindo florestas, caatinga substituindo savanas, semideserto substituindo caatinga). Ao aquecimento global deve-se também levar em conta outras alterações que contribuem para criar as condições de substituição de biomas. É o caso das alterações da cobertura da vegetação que ocorrem em diversas partes do globo, como no Brasil, a taxas alarmantes, como os desmatamentos da floresta tropical amazônica, que, segundo várias projeções, causarão mudanças climáticas regionais em direção a clima mais quente e seco na região.

Um terceiro fator de distúrbio é o fogo. A floresta densa amazônica era praticamente impenetrável ao fogo. Mas, em decorrência da combinação da fragmentação florestal, desmatamentos e aquecimento em razão dos próprios desmatamentos aliados à prática agrícola predominante que utiliza fogo intensamente, esse quadro está rapidamente mudando e a frequência de incêndios florestais vem crescendo assustadoramente a cada ano. O grande incêndio nas florestas, savanas e campos de Roraima, entre janeiro e março de 1998, é um exemplo ilustrativo do que pode acontecer no futuro com mais frequência. Resultado de persistente e intensa seca causada pelo fortíssimo episódio El Niño de 1997-98 e o uso indiscriminado de fogo, mais de 13 mil km<sup>2</sup> de florestas foram afetadas pelo fogo, talvez no maior incêndio jamais observado na Amazônia. A grande seca de 2005 [18] mostrou a vulnerabilidade da Amazônia ao fogo, pois a falta de chuva durante o verão de 2005 na Amazônia ocidental aliada à grande seca do ar gerou condições favoráveis para o espalhamento do fogo, que em quantidade foi até 300% maior do que em 2004. Essa seca de 2005 não foi associada ao El Niño, o que sugere que a combinação seca-fogo nem sempre está associada ao El Niño na Amazônia.

A combinação sinérgica dos impactos climáticos regionais decorrentes dos desmatamentos com aqueles resultantes do aquecimento global, implicando climas mais quentes e possivelmente também mais secos, aliada a maior propensão a incêndios florestais, amplifica tremendamente a vulnerabilidade dos ecossistemas tropicais, favorecendo as espécies mais adaptadas a essas novas condições e que são tipicamente aquelas de savanas tropicais e subtropicais, naturalmente adaptadas a climas quentes, com longa estação seca e onde o fogo desempenha papel fundamental em sua ecologia.

Dessa forma, impactos intensos de longo prazo seriam sentidos nos solos, na biodiversidade e nos sistemas hídricos. Com relação ao último, além da forte mudança no ciclo hidrológico, haveria também um problema sócio-econômico. Primeiro porque a pesca é uma atividade bastante importante tanto para prover alimento quanto para manter o comércio, e os rios subsidiam grande parte da demanda hídrica da população. Além disso, haveria problemas com o mais importante meio de locomoção na região: o transporte fluvial.

O número de estudos sobre a resposta de espécies da flora e da fauna Amazônica e do Cerrado às mudanças climáticas é ainda reduzidíssimo, mas estes indicam que, para um aumento de 2°C a 3°C na temperatura média, até 25% das árvores do cerrado e até cerca de 40% de árvores da Amazônia poderiam desaparecer até o final deste século.

Também na região Amazônica está o caso mais crítico do agravamento das condições de saúde da população. Alguns estudos mostram que, com cenários de mudanças climáticas, as taxas de mortalidade aumentam em decorrência das enchentes, secas e ondas de calor. De forma indireta, esses eventos extremos podem causar ainda aumento nos casos de

malária, dengue e cólera, especialmente com a combinação de altas temperaturas com chuvas intensas.

Com relação à Mata Atlântica, poucos estudos de modelagem foram desenvolvidos, por isso pouco se pode constatar. Uma das possíveis causas disso é o fato de esse ser um ecossistema que apresenta muitas espécies endêmicas (isto é, que só ocorrem nessa região) e conseqüentemente a vegetação possui características que ainda não são bem representadas nos modelos. É possível observar, no entanto, que esse bioma é bastante sensível a forçantes climáticas – especialmente à temperatura e ao regime de chuvas – por apresentar grandes contrastes em sua composição de acordo com a respectiva localização espacial (latitude e altitude). Mesmo assim, num estudo que comparou a previsão de modelos climáticos para o final deste século, esse bioma é mantido, de acordo com sua representação inicial.

Outro setor que pode ser bastante afetado pelas mudanças climáticas é o de sistemas agrícolas. Isso porque os serviços de zoneamento agrícola do Brasil baseiam-se em séries históricas longas de dados de temperatura e chuva. O zoneamento agrícola foi uma iniciativa do Ministério da Agricultura, no início dos anos 90, que surgiu como resultado de uma pesquisa que apontou que 95% das perdas na agricultura estavam relacionadas a forçantes climáticas. Dessa forma, o zoneamento agrícola fornece indicações de datas de plantios para os diversos tipos de solos e cultura, entre eles: arroz, feijão, milho, trigo, soja e café.

Os estudos, em geral, utilizam os cenários do IPCC SAR [12] com temperaturas aumentando em 1 °C, 3 °C e 5,8 °C e chuvas 15% maiores para avaliar os efeitos das mudanças climáticas globais sobre cultivos, nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Paraná. Segundo os resultados obtidos, as elevações de temperatura e de precipitação não serão benéficas para a agricultura no que se refere ao tamanho das áreas aptas para o cultivo. Num estudo mais geral, que considera também outros estados brasileiros, isso é confirmado para cultivos como soja, arroz e feijão. Observa-se que o maior impacto relativo ao aumento de temperatura poderá ser sentido pela soja, com a redução de até 60% na área potencial de plantio.

Em decorrência da história de ocupação do território brasileiro, as regiões costeiras abrigam grande parte da população. Grandes centros urbano-industriais do país estão situados em áreas costeiras ou contíguas a estas e, portanto, diretamente ameaçadas pelo aumento previsto do nível médio do mar. Cidades como João Pessoa (PB), Recife (PE), Maceió (AL), Aracajú (SE), Salvador (BA), Rio de Janeiro (RJ), Vitória (ES), Santos (SP), Paranaguá (PR) e Florianópolis (SC) representam áreas de grande densidade populacional e importantes complexos industriais, portuários e turísticos, incluídos na área de influência e, portanto, potencialmente inundáveis em suas porções mais baixas num futuro próximo.

## **SUMÁRIO E RECOMENDAÇÕES**

O Brasil é vulnerável às mudanças climáticas. Em muitas regiões brasileiras o ano de 2007, por exemplo, iniciou com chuvas intensas e suas drásticas conseqüências: enchentes, deslizamentos, desmoronamentos, perdas agrícolas, etc. É essencial que as alterações climáticas sejam totalmente integradas nas políticas ambientais e de desenvolvimento de modo que ações do governo possam ajudar a enfrentar esse problema, avaliando a vulnerabilidade regional e nacional e propondo medidas de adaptação. Por exemplo, mudanças climáticas no Brasil ameaçam intensificar as dificuldades de acesso à água. A combinação das alterações do clima, na forma de falta de chuva ou pouca chuva acompanhada de altas temperaturas e altas taxas de evaporação, e com competição por recursos hídricos, pode levar a



uma crise potencialmente catastrófica, sendo os mais vulneráveis os agricultores pobres, como os agricultores de subsistência na área do semi-árido do Nordeste (“polígono da seca”), região semi-árida de 940 mil km<sup>2</sup>, que abrange nove estados do Nordeste e que enfrenta um problema crônico de falta de água.

Os esforços de adaptação, particularmente nas regiões Norte e Nordeste, deverão ser acelerados e deverão envolver órgãos especializados dos governos federal, como INPE, INPA, EMBRAPA, ONS, ANA, ANEEL, PETROBRAS, FIOCRUZ, entre outros, assim como órgãos dos governos estaduais, universidades e organizações não governamentais. Ainda há tempo de evitar os piores impactos das alterações climáticas, se tomarmos desde já medidas rigorosas de mitigação e adaptação. A adaptação às alterações climáticas – ou seja, a tomada de medidas para desenvolver a resistência e minimizar os custos – é essencial.

Baseando-se nos cenários climáticos do futuro gerados pelo IPCC AR4 e nos estudos de mudanças climáticas para o Brasil gerados pelo INPE em 2007 [18], o governo poderia procurar formas de quantificar e mapear a vulnerabilidade do Brasil às mudanças do clima, tanto por região como por setor produtivo, e optar por atividades e políticas ambientais e de desenvolvimento econômico que sejam compatíveis com as características geoambientais de cada região. Só assim será possível ter um mapeamento mais preciso das possíveis ações para programar medidas de adaptação a médio e longo prazos. Também, para entender melhor o que acontece no clima atual e com o intuito de entender o clima do futuro, é indispensável o livre acesso à informação climática de qualidade e com séries históricas longas. Por exemplo, o Quarto Relatório do IPCC [14] apresenta pela primeira vez, em todos os seus relatórios desde 1990, mapas de variações nos extremos de temperatura e chuva durante os últimos 50 anos. Nesses mapas são observadas grandes áreas sem qualquer informação na maior parte do Brasil e na América do Sul tropical, pois os dados básicos para escala diária, necessários para calcular esses índices extremos, não estão disponíveis ou não existem.

O Brasil precisa realizar estudos que tratem de nossa própria vulnerabilidade. Os países desenvolvidos são os que têm mais possibilidade de se proteger, mas são também os maiores responsáveis pelo que está ocorrendo. Por isso, eles deveriam traçar planos de ações no sentido de auxiliar os países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, sobretudo os países da África sub-saariana, da Ásia e da América do Sul, que são os mais vulneráveis às conseqüências do aquecimento da Terra.

## BIBLIOGRAFIA

1. ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JR, J.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. vol. 39, n. 11, pp. 1057-1064. 2004.
2. BETTS, R.A.; COX, P.M.; WOODWARD, F.I. Simulated responses of potential vegetation to doubled-CO<sub>2</sub> climate change and feedbacks on near-surface temperature. *Global Ecology and Biogeography*. 9: 171-180. 2000.
3. BETTS, R.A.; COX, P.M.; LEE, S.E.; WOODWARD, F.I. Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations. *Nature*. 387: 796-799. 1997.
4. BOER, G.J.; FLATO, G.; RAMSDEN, D.A. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. *Clim. Dyn.* 16: 427-450. 2000.
5. BRASSEUR, G.P.; ORLANDO, J.J.; TYNDALL, G.S. *Atmospheric Chemistry and Global Change*. Oxford University Press, New York, USA. 1999.
6. BROWN JR, K.S.; AB' SABER, A.N. Ice-age forest refuges and evolution in the neotropics: correlation of paleoclimatological, geomorphological and pedological data with modern biological endemism. *Paleoclimas* vol. 5, pp. 1-30. 1979.
7. COX, P. M., BETTS, R.A.; JONES, C.D.; SPALL, S.A.; TOTTERDELL, I. J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*. 408: 184-187. 2000.

8. CRAMER, W.; BONDEAU, A.; WOODWARD, F.I.; PRENTICE, I.C.; BETTS, R.A.; BROVKIN, V.; COX, P.M.; FISHER, V.; FOLEY, J.A.; FRIEND, A.D.; KUCCHARIK, C.; LOMAS, M.R.; RAMANKUTTY, N.; SITCH, S.; SMITH, B.; WHITE, A.; YOUNG-MOLLING, C. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*. 7: 357-373. 2001.
9. FEDDEMA, Johannes J. et al. The Importance of Land-Cover Change in Simulating Future Climates. *Science*: 310, 1674-1678. 2005.
10. HARTMANN, D.L. *Global Physical Climatology*. Academic Press, 1994. 411p.
11. HUTYRA, L.R.; MUNGER, J.W.; NOBRE, C.A.; SALESKA, S.R.; VIEIRA, S.A. Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazonia. *Geophysical Research Letters*. 32: L24712, doi:10.1029/2005GL024981. 2005.
12. IPCC. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [HOUGHTON, J.T.; MEIRA FILHO, L.G.; CALLANDER, B.A.; HARRIS, N.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1996. 572 p.
13. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 2001. 881p.
14. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis - Summary for Policymakers*. Disponível em <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>. 2007
15. MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: Avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*. São Paulo, v. 16: 1-18. 2002.
16. MARENGO, J.A.; SOARES, Wagner. Impacto da modificação climática-síntese do Terceiro relatório do IPCC. In: FBMC; ABRH. (Org.). *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*. Porto Alegre. ABRH: 209-233. 2003.
17. MARENGO, J.A. Ministério do Meio Ambiente - MMA. *Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade - Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI*. Brasília, Brasil, 2006. 212 p. (Série Biodiversidade, v. 26).
18. MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OLIVEIRA, G.S.; CAMARGO, H.; OYAMA, M.; OLIVEIRA, R; ALVES, L.M.; BROWN, E.I. The drought of Amazonia in 2005. Accepted, *J. of Climate*. 2007.
19. MARENGO, J.A. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE-MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS - SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - DCBio. *Caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. 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, Fevereiro 2007. Available online from [www.cptec.inpe.br/mudancas\\_climaticas](http://www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas).
20. MARENGO, J.; NOBRE, C. A.; SALATI, E.; AMBRIZZI, T. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS - SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - DCBio. *Sumário Técnico*. 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, Fevereiro 2007. Available online from [www.cptec.inpe.br/mudancas\\_climaticas](http://www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas)
21. MEEHL, G.A.; WASHINGTON, W.M. El Nino-like climate change in a model with increased atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Nature*. 382: 56-60. 1996.
22. MILES, L.; GRAINGER, A.; PHILLIPS, O.L. The impact of global climate change on tropical forest biodiversity in Amazonia. *Global Ecology and Biogeography*. 13: 553-565. 2004.
23. MITCHELL, J.F.B., JOHNS, T.C.; GREGORY, J.M.; TETT, S.F.B. Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature*. 376: 501-504. 1995.
24. NIJSSSEN, B.; O'DONNELL, G.M.; HAMLET, A.F.; LETTENMAIER, D.P. Hydrologic Sensitivity of Global Rivers to Climate Change. *Climate Change* 50(1-2): 143 - 175. 2001.
25. NOBRE, C.A.; ASSAD, E.D.; OYAMA, M.D. Mudança ambiental no Brasil. Em Terra na Estufa. *Scientific American Brasil* edição especial, n° 12, pp. 70-75. 2005.
26. NOBRE, C.A.; OYAMA, M.D.; OLIVEIRA, G.S.; MARENGO, J.A.; SALATI, E. *Impacts of climate change scenarios for 2091-2100 on the biomes of South America*. First CLIVAR International Conference, Baltimore, USA, 21-25 June. 2004.
27. OYAMA, Marcos Daisuke. *Conseqüências climáticas da mudança de vegetação do nordeste brasileiro: um estudo de modelagem*. 2002. 220p. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.
28. OYAMA, M.D.; NOBRE, C.A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. *Geophysical Research Letters*. v. 30, n. 23. December 2003.

29. PITMAN, A.J.; Zhao, M. The relative Impact of observed change in land cover and carbon dioxide as simulated by a climate model. **Geophys. Res. Lett.**, 27: 1267-1270. 2000.
30. RAMANATHAN, V.; CRUTZEN, P. J.; KIEHL, J. T.; ROSENFELD, D. Aerosols, Climate and The Hydrological Cycle. **Science**. 294: 2119-2124. 2001.
31. SALA, O.E; CHAPIN III, F.S.; ARMESTO, J.J.; BERLOW, R.; BLOOMFIELD, J.; DIRZO, R.; HUBER-SANWALD, E.; HUENNEKE, L.E; JACKSON, R.B.; KINZIG, A.; LEEMANS, R.; LODGE, D.; MOONEY, H.A.; OESTERHELD, M.; POFF, N.L.; SYKES, M.T.; WALKER, B.H.; WALKER, M.; WALL, D.H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. **Science**. 287:1770-1774. 2000.
32. SALATI, E.; Vose, P.B. Amazon Basin: a system in equilibrium. **Science**. vol. 225: 129-138. 1984.
33. SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophys. Res. Lett.** 34. 2007
34. SCHEFFER, M.; CARPENTER, S.; FOLEY, J.A.; FOLKE, C.; WALKER, B. Catastrophic shifts in ecosystems. **Nature**. v.413, n.6856, p.591-596, 2001.
35. SCHOLZE, M.; KNORR, W.; ARNELL, N.W.; PRENTICE, I.C. A climate-change risk analysis for world ecosystems. **PNAS**. 103 (35): 13116-13120. 2006.
36. TETT, S.F.B. Simulation of El Niño-Southern Oscillation-like variability in a global coupled AOGCM and its response to CO<sub>2</sub>-increase. **J. Climate**. 8: 1473-1502. 1995.
37. TIMMERMANN, A.; OBERHUBER, J.; BACHER, A. et al. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. **Nature**. 395: 694–697. 1999.
38. WHITE, A.M.; CANNELL, G.R.; FRIEND, A.D. Climate change impacts on ecosystems and the terrestrial carbon sink: a new assessment. **Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions**. 9: S21-S30. 1999.
39. ZULLO JR, J.; ASSAD; E.D.; FONSECA, M.F **Impacto das variações de temperatura e do regime de chuvas, segundo prognóstico do IPCC, no zoneamento de riscos climáticos do café e do milho, no estado de São Paulo**. Em preparação.