

# Impacto, vulnerabilidade e adaptação das florestas à mudança do clima

---

*Thelma Krug*

## 1. INTRODUÇÃO E CONCEITOS

O entendimento dos potenciais impactos da mudança do clima nos ecossistemas florestais é de particular importância para o Brasil, que detém cerca de 30% das florestas tropicais do mundo (FAO, 2005) e que conta com mais da metade de seu território coberto por formações florestais nativas, distribuídas em seus seis biomas<sup>1</sup>, particularmente na Amazônia e no Cerrado. A floresta primária na Amazônia Legal abrange uma área de aproximadamente 3.5 milhões de km<sup>2</sup> (incluindo o cerradão, que é uma formação florestal do bioma Cerrado que, do ponto de vista fisionômico, é uma floresta, mas floristicamente se assemelha mais ao cerrado sentido estrito<sup>2</sup> enquanto o Cerrado (parque de cerrado, cerrado *stricto sensu*, campo cerrado, entre outros) ocupa cerca de 2 milhões de km<sup>2</sup>, distribuídos ao longo do Brasil Central. Os outros biomas têm cobertura florestal menos expressiva. A Mata Atlântica, por exemplo, detém hoje menos de 7% da sua cobertura vegetal original<sup>3</sup>. Interessante notar que cerca de 60% das florestas do mundo se concentra em apenas sete países (Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos, China, Indonésia e República Democrática do Congo) do mundo, que serão afetados em maior ou menor grau pela mudança do clima. Globalmente, as florestas cobrem 30% da superfície total da terra, sendo os dez países mais ricos em florestas responsáveis por 2/3 da área total de florestas. Cinquenta

---

<sup>1</sup> Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pantanal, Mata Atlântica e Pampas (IBGE, 2004). Mapa de Biomas do Brasil, acessível em <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>.

<sup>2</sup> Ver Ribeiro, J.F.; Walter, B.M.T. Vegetação Florestal – Cerradão, disponível no site da Agência de Informação Embrapa, Bioma Cerrado. <[www.agencia.cnptia.embrapa.br](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br)>

<sup>3</sup> Estimativa preliminar da Fundação SOS Mata Atlântica e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais para o período 2000-2005.

e sete países têm menos do que 10% de suas áreas cobertas por florestas e 34% das florestas são intensivamente manejadas para produção de madeira.

Nesse documento, impactos referem-se às conseqüências negativas ou positivas que resultam da mudança do clima. Por exemplo, uma mudança no regime de chuvas pode ser benéfica em áreas onde a água é normalmente escassa (impacto positivo) e prejudicial em áreas sujeitas a inundações (impacto negativo).

Um sistema pode ser diferentemente impactado pela mudança do clima, dependendo da magnitude, taxa e duração da mudança, além da tolerância e capacidade de adaptação do sistema às mudanças. É natural se esperar que um aumento médio de temperatura de 1,5°C terá um impacto menor do que um aumento de 3°C; e que quanto mais rápida a mudança, maior o seu impacto nos sistemas social, econômico e ambiental. Ainda como ilustração, uma onda de calor, embora temporária, pode durar semanas ou meses, e quanto mais perdurar, maior será o seu impacto.

#### VULNERABILIDADE E ADAPTAÇÃO

Todos os sistemas têm a capacidade de reagir a um estímulo, muitas vezes buscando reduzir as conseqüências negativas que esse estímulo pode provocar. A mudança do clima promove uma série de mudanças em variáveis climáticas que passam a constituir estímulos, forçando uma resposta dos sistemas. *Adaptação*, neste documento, refere-se a qualquer ajuste de um sistema em resposta a um estímulo climático. *Capacidade adaptativa* refere-se ao grau em que um sistema tem a capacidade de gerar tais ajustes.

A adaptação pode ser autônoma quando está relacionada às respostas automáticas de um sistema em reação a um estímulo, visando superar seus impactos. A vegetação, por exemplo, reage a mudanças na temperatura do ar, aumentando ou diminuindo sua respiração.

Outra forma de adaptação é a *adaptação planejada*, que se refere ao conjunto de estratégias e ações conscientes implementadas para minimizar os impactos. A adaptação planejada complementa a adaptação autônoma, especialmente nos casos onde o sistema não tem capacidade suficiente para superar um impacto.

A resiliência (habilidade de adaptar-se naturalmente) de alguns sistemas à mudança do clima depende da taxa e magnitude da mudança. Pode haver limites críticos acima dos quais alguns sistemas podem não ter mais a capacidade de adaptar-se às mudanças sem alterar radicalmente seu estado funcional e a integridade do sistema. Mudanças dramáticas podem levar a transformações do ambiente físico de uma região, impondo limites para a adaptação.

*Vulnerabilidade* refere-se ao grau em que um sistema é suscetível aos impactos negativos da mudança do clima<sup>4</sup>. Adaptação e vulnerabilidade são conceitos relacionados, já que a vulnerabilidade de um sistema é determinada por sua capacidade adaptativa: quanto maior esta capacidade, menor a sua vulnerabilidade. O *processo de adaptação* começa com uma avaliação das vulnerabilidades, que relaciona os impactos esperados da mudança do clima com as realidades social, ambiental e econômica de uma região, levando, assim, à identificação das necessidades e prioridades de ação. A avaliação das vulnerabilidades permite com que a sociedade inicie um processo de adaptação dentro do contexto de suas realidades econômica, técnica e social. O ciclo termina com a implementação das ações identificadas.

A vulnerabilidade de um sistema pode ser definida como a diferença entre os impactos potenciais e a capacidade adaptativa autônoma e planejada do sistema, isto é, vulnerabilidade = impactos potenciais – capacidade autônoma – capacidade adaptativa. Por exemplo, imagine um sistema florestal sendo mais freqüente e intensamente afetado pela ocorrência de seca. Um impacto potencial nesse sistema seria o aumento do risco de ocorrência de incêndios florestais, de forma que qualquer evento que estimulasse a ocorrência de fogo poderia promover danos severos à floresta. Entretanto, a vulnerabilidade da floresta é determinada não só pelos impactos *per se*, mas também pela capacidade da floresta de superá-los. Algumas florestas serão mais vulneráveis do que outras, justamente em função de sua capacidade adaptativa. Essa capacidade pode ser suplementada por medidas de adaptação planejada, visando reduzir a vulnerabilidade do sistema. Por

---

<sup>4</sup> O IPCC define vulnerabilidade, no relatório síntese do quarto relatório de avaliação (IPCC, 2007), como a suscetibilidade de ser danificado. Vulnerabilidade à mudança do clima é o grau em que um sistema é suscetível a, ou incapaz de lidar com, os efeitos adversos da mudança do clima, incluindo variabilidade do clima e extremos. A vulnerabilidade é uma função do caráter, magnitude, e taxa da variação do clima a que um sistema é exposto, sua sensibilidade, e sua capacidade adaptativa.

exemplo, a implementação de planos de combate ao fogo ou de queima prescrita são estratégias para promover a adaptação de uma floresta.

A vulnerabilidade dos sistemas aos riscos climáticos pode ser analisada sob diferentes aspectos: a sua vulnerabilidade ao clima atual; sua vulnerabilidade à mudança do clima na ausência de medidas de adaptação e mitigação; e sua vulnerabilidade residual, quando as capacidades adaptativas e mitigativas já foram exauridas.

A vulnerabilidade à mudança do clima pode ser aumentada por estresses não associados ao clima e fatores tais como rápido crescimento populacional e urbanização, desmatamento, empreendimentos em áreas de alto risco e manejo inadequado dos recursos naturais. No caso específico do desmatamento, modelos de vegetação global dinâmica (do inglês *Dynamic Global Vegetation Models*)<sup>5</sup> baseados em cenários<sup>6</sup> do desmatamento tropical futuro e da mudança futura do clima indicam que o desmatamento provavelmente produzirá grandes perdas de carbono, mesmo considerando-se as incertezas atuais sobre as taxas de desmatamento, em nível global. Analisando-se o resultado de todos os modelos, projetam-se, para o século 21, emissões líquidas que levariam a um aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera entre 29 a 129 ppm<sup>7</sup> (CRAMER et al., 2004). A incerteza sobre a magnitude dos impactos promovidos pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, pelas mudanças na temperatura e precipitação, e pelo desmatamento futuro, na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>, aponta para a necessidade de se ter melhores estimativas das taxas de desmatamento atual e futura, em nível global.

Estudos (PHOENIX e LEE, 2004; MEEHL et al, 2007; CALLAGHAN et al., 2005) indicam que alguns ecossistemas e espécies serão muito vulneráveis à mudança do clima, particularmente nas altas latitudes, a exemplo das florestas boreais. Entretanto, a Amazônia é também

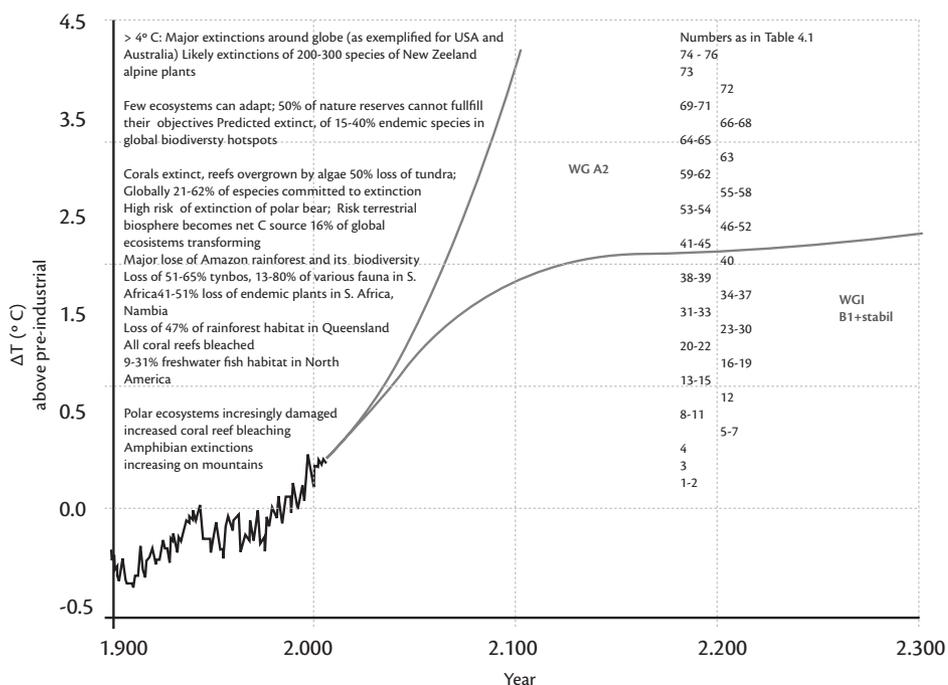
---

<sup>5</sup> Modelos de Vegetação Global Dinâmica são modelos baseados em processos que incluem o acoplamento de fluxos biogeoquímicos com a dinâmica da vegetação (produtividade, competitividade dinâmica da vegetação, crescimento, distúrbios, mortalidade, entre outros).

<sup>6</sup> Uma descrição plausível e muitas vezes simplificada de como o futuro pode se desenvolver, baseado em um conjunto de hipóteses coerentes e internamente consistentes sobre as forças indutoras (*driving forces*) e suas relações mais relevantes. Os cenários podem ser derivados de projeções, mas normalmente baseiam-se em informações adicionais de outras fontes.

<sup>7</sup> Partes por milhão. Refere-se à razão entre o número de moléculas de um constituinte em um dado volume da atmosfera e o número total de moléculas de todos os constituintes naquele volume.

considerada um ecossistema vulnerável, particularmente devido à redução de precipitação projetada para algumas regiões, por alguns modelos climáticos, variando de substantiva a moderada, e que poderá promover uma transição do estado da floresta atual para outro menos exuberante, ou mesmo gramíneas (COX et al., 2004; CRAMER et al., 2004; WOODWARD e LOMAS, 2004). Perdas significativas da floresta amazônica são esperadas a ocorrer com um aumento da temperatura média em 2.5°C acima da temperatura média da era pré-industrial (IPCC, 2007a), conforme a figura abaixo, que é uma reprodução da Figura 4.4 do relatório de avaliação do Grupo de Trabalho II do IPCC.



A figura representa um compêndio dos riscos projetados devido aos impactos críticos da mudança do clima nos ecossistemas, para diferentes níveis do aumento anual médio global de temperatura,  $\Delta T$ , relativo ao clima pré-industrial. É importante notar que esses impactos não levam em consideração os estresses adicionais nas espécies devido à destruição dos habitats, fragmentação da paisagem, introdução de espécies invasivas, mudança no regime de fogo, poluição (tal como deposição de nitrogênio) ou, para as plantas, o efeito benéfico do aumento da concentração atmosférica

de dióxido de carbono. A curva vermelha mostra as anomalias observadas de temperatura para o período 1900-2005. As duas linhas cinza apresentam exemplos da possível evolução futura da temperatura ao longo do tempo, com exemplos da maior e menor trajetórias para a evolução futura do valor esperado de . São apresentadas as simulações das respostas médias para (i) o cenário de emissão A2 e (ii) o cenário estendido B1, onde o forçamento radiativo além de 2100 foi mantido constante ao nível do valor de 2100.

Antecipa-se que os ecossistemas menos vulneráveis à mudança do clima serão as savanas e os cerrados, mas há ainda grandes incertezas quanto ao efeito da fertilização por dióxido de carbono<sup>8</sup> e das mudanças nos regimes naturais de perturbação como, por exemplo, recorrência do fogo, incidência de pragas e doenças. Por fertilização por dióxido de carbono entende-se a melhoria no crescimento das plantas como resultado do aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Dependendo do seu mecanismo de fotossíntese, certos tipos de plantas são mais sensíveis às mudanças na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>. Em particular, plantas C3 (a maior parte das árvores e culturas agrícolas, como arroz, trigo, soja, batatas e vegetais) normalmente têm uma resposta maior ao CO<sub>2</sub> do que plantas C4 (gramíneas, cana-de-açúcar). O aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera e a deposição de nitrogênio são dois fatores que tem sido associados ao aumento da capacidade das florestas em armazenar dióxido de carbono nas últimas décadas, implicando em uma maior remoção líquida de carbono.

Até o presente, não foi possível estimar com exatidão a contribuição do desmatamento para as emissões anuais globais de CO<sub>2</sub>. O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) indica que nas duas últimas décadas o fluxo de CO<sub>2</sub> devido às mudanças no uso da terra foi dominado pelo desmatamento tropical, mas as diferenças entre distintas estimativas são marcantes: enquanto Houghton (2003) estima para a América

---

<sup>8</sup> A melhora no crescimento das plantas como resultado do aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Dependendo do seu mecanismo de fotossíntese, certos tipos de plantas são mais sensíveis à mudanças na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>. Em particular, plantas C3 (incluem a maior parte das árvores e culturas agrícolas, como arroz, trigo, soja, batatas e vegetais) normalmente têm uma resposta maior ao CO<sub>2</sub> do que plantas C4 (inclui gramíneas, cana-de-açúcar). O aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera e a deposição de nitrogênio são dois fatores que tem sido associados ao aumento da capacidade das florestas em armazenar dióxido de carbono nas últimas décadas, implicando em uma maior remoção líquida de carbono.

tropical, nos anos 1990, perdas médias anuais de carbono da ordem de  $0,8 \pm 0,3$  GtC, Achard *et al.* (2004) apresenta correspondentes estimativas entre 0.3 a 0.4 GtC e DeFries *et al.* (2002), entre 0.2 a 0.7 GtC<sup>9</sup> (IPCC, 2007b). Segundo o IPCC (2007c), no período de 1970 a 2004, o maior crescimento de emissões de CO<sub>2</sub> esteve associado à geração de energia e transporte rodoviário (26%), e à indústria (19%). A agricultura (14%), uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (17%), prédios residenciais e comerciais (8%) e tratamento de resíduos (3%) cresceram a taxas menores.

As florestas têm um potencial importante de mitigação da mudança do clima, que inclui atividades de florestamento e reflorestamento, manejo florestal, redução do desmatamento, manejo de produtos florestais, uso de produtos florestais para produção de bioenergia para substituir o uso de combustível fóssil, melhoria de espécies florestais visando o aumento da produtividade de biomassa.

Existe hoje, no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, um esforço para reduzir as emissões por desmatamento e degradação em países em desenvolvimento, que muito embora possa ser entendido como um esforço de mitigação, tem também uma componente de adaptação por preservar a riqueza das espécies, a continuidade dos ecossistemas florestais e resiliência. Por outro lado, estima-se que impactos negativos da mudança do clima contribuirão para a destruição ou degradação das florestas, promovendo emissões de gases de efeito estufa e aumentando o aquecimento global.

## 2. MUDANÇA DO CLIMA E VARIABILIDADE NATURAL

O quarto e último relatório de avaliação do IPCC associa a chance de ocorrência de vários aspectos relacionados à mudança futura do clima, incluindo alterações na temperatura de superfície, na elevação do nível do mar e na ocorrência de eventos extremos. Entretanto, cabe notar a importância de se estimar as variações regionais da mudança do clima para poder-se avaliar, de forma mais precisa, os potenciais impactos desta mudança nos diferentes biomas e também na biodiversidade.

---

<sup>9</sup> Para maiores detalhes ver Tabela 7.2 no Capítulo 7 do Quarto Relatório de Avaliação do Grupo de Trabalho I do IPCC.

Alguns dos modelos utilizados pelo IPCC projetam, para as próximas duas décadas, um aumento da temperatura média global de cerca de 0.2°C por década. Mesmo no caso de se manter constantes todos os gases de efeito estufa e os aerossóis em níveis observados no ano 2000, projeta-se um aquecimento da ordem de 0.1°C por década. Já para a precipitação, os cenários apontam para um provável<sup>10</sup> aumento nas altas latitudes e uma provável diminuição na maior parte das regiões subtropicais, que pode atingir até 20% em 2100, segundo um de seus cenários<sup>11</sup>. Entretanto, o IPCC reconhece que há grandes incertezas nos resultados dos modelos utilizados, em particular com relação à precipitação tropical. Os cenários futuros de clima apresentados pelos modelos do IPCC mostram, para a Amazônia, anomalias positivas de chuva para um modelo, enquanto o restante mostra uma diminuição de chuvas, ainda que em diferentes magnitudes (MARENGO, 2006). Projeções de mudanças sazonais na temperatura média e precipitação até o final do século 21, para 32 regiões do mundo (incluindo Amazônia-AMZ) são apresentadas no último relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2007a)<sup>12</sup>, baseadas no modelo acoplado de circulação geral atmosfera-oceano (*coupled atmosphere-ocean general circulation model – AOGCM*).

O IPCC também projeta, em alguns de seus modelos, um aumento na ocorrência de eventos extremos, como seca, na Amazônia e na Europa, decorrentes do aumento de temperatura, no verão, e declínio de precipitação. Estudos do Instituto de Pesquisas da Amazônia (Ipam) mostram que em um quadro de aquecimento global e secas mais frequentes, as florestas da Região Amazônica perdem muita umidade, tornando-se muito mais vulneráveis às queimadas, há um aumento significativo da mortalidade de árvores, com conseqüente aumento das emissões de carbono para a atmosfera. Independente da associação com a mudança do clima, desde os anos 1970 tem-se, de fato, observado períodos de seca mais prolongados e mais intensos em um número crescente de áreas do globo (COX et al., 2004; SCHAPHOFF et al., 2006; SCHOLZE et al., 2006). A ocorrência desse tipo de evento pode afetar a produtividade líquida dos ecossistemas florestais e provocar emissões de carbono como resultado da mortalidade de árvores e redução da resiliência (ver, por exemplo, BETTS et al., 2000; PENG e

---

<sup>10</sup> Probabilidade relativa maior que 66%.

<sup>11</sup> Cenário A1B (ver seção V – Cenários).

<sup>12</sup> Ver Figura 2.6 a (para temperatura média) e b (para precipitação) na contribuição do Grupo de Trabalho II do IPCC, capítulo 2, seção 2.4.6, pgs. 150 e 151.

APPS, 2000; SEMAZZI e SONG, 2001; BERGENGREN et al., 2001; LEEMANS et al., 2002; KÖRNER, 2003; COX et al., 2004; CANADELL et al., 2004; HEATH et al., 2005; CIAIS et al., 2005). Convém ressaltar, entretanto, que esses efeitos permanecem mal compreendidos e variam de lugar para lugar (REICHSTEIN et al., 2002; BETTS et al., 2004). Em áreas mais elevadas e frias, por exemplo, a seca pode ser acompanhada por um maior crescimento das árvores devido à ampliação do período de crescimento e uma melhor atividade fotossintética (JOLLY et al., 2005).

Além dos potenciais pulsos de mortalidade das árvores, é também atribuído à seca o aumento da flamabilidade da vegetação. Por exemplo, os resultados de estudos sobre os impactos de curto e longo prazos na vegetação, decorrentes das ondas de calor observadas na Europa em 2003, apontam para uma redução de cerca de 30% na produtividade primária bruta da vegetação, transformando-a em uma fonte líquida de carbono, da ordem de  $0.5 \text{ Pg}^{13}\text{C}$  por ano (CIAIS et al., 2005). Entretanto, observou-se que os impactos na vegetação foram distintos dependendo da altitude (JOLLY et al., 2005): algumas formações florestais conseguiram recuperar seu estado original já no ano seguinte ao distúrbio (GOBRON et al., 2005), enquanto outras apresentaram complexos impactos retardados (FISCHER, 2005). As ondas de calor foram também responsabilizadas pelo recorde de incidência de extensos incêndios florestais em vários países europeus, estimando-se em cerca de  $6.500 \text{ km}^2$  a área de floresta queimada ao longo do continente (DE BONO et al., 2004). Somente em Portugal, a área afetada por incêndios florestais foi quatro vezes maior do que a média observada no período de 1980 a 2004 (TRIGO et al., 2005; TRIGO et al., 2006).

No Brasil, a seca provocada pelo evento El Niño no norte do país, no período 1997-1998, foi responsável pelo incêndio florestal de grande escala no Estado de Roraima, que afetou uma parcela significativa de sua floresta primária. Segundo Cochrane (2003), os incêndios florestais estão se tornando mais comuns e têm fortes efeitos negativos na vegetação da Amazônia (COCHRANE e LAURANCE, 2002). Apesar do IPCC apontar pouca mudança na amplitude do El Niño nos próximos cem anos, o Painel indica a possibilidade de uma intensificação dos extremos de seca e enchentes que ocorrem durante a ocorrência do fenômeno.

---

<sup>13</sup> 1 petagrama =  $10^{15}$  grama.

A recorrência de eventos dessa natureza, em longo prazo, pode resultar em alterações no tipo de vegetação no bioma, de floresta para uma formação arbustiva, altamente inflamável e, portanto, mais vulnerável à queima do que outros tipos de vegetação menos inflamáveis, como florestas (NUNES et al., 2005). A emissão de dióxido de carbono decorrente da mortalidade da vegetação e conseqüente perda de carbono associada ao seu estoque original, e as emissões de outros gases de efeito estufa pela queima da biomassa da vegetação, a exemplo do metano e óxido nitroso, podem contribuir para acelerar a mudança do clima (CO<sub>x</sub> et al., 2000). Entretanto, é importante ressaltar que a queima de biomassa promove também um aumento na quantidade de aerossóis na atmosfera, e que esses, globalmente, tem um forçamento radiativo negativo.

As mudanças na intensidade e na freqüência de eventos extremos são esperadas a provocar impactos significativos nas formações florestais, podendo causar mortalidade em massa de árvores, afetando a distribuição das espécies nos ecossistemas (PARMESAN et al., 2000). O IPCC projeta que a agricultura, as florestas e ecossistemas sejam afetados negativamente pelo aumento em ondas de calor, eventos de forte precipitação, seca ou aumento da intensidade de ciclones tropicais. Projeta-se que a diminuição da freqüência de dias e noites frias aumente a produtividade agrícola nos ambientes mais frios, mas por outro lado aumentaria a ocorrência de insetos.

Finalmente, é importante ressaltar que mesmo nas alterações já observadas em sistemas florestais em algumas partes do mundo, particularmente com relação a uma maior incidência de incêndios florestais e pragas, é difícil separar dos efeitos o que seria atribuível às forças indutores climáticas e não climáticas.

### **3. COMO PREVER O IMPACTO DA MUDANÇA DO CLIMA NAS FLORESTAS?**

Apesar de se entender que alguns sistemas, setores e regiões são particularmente vulneráveis à mudança do clima, incluindo as florestas (particularmente as boreais), existe uma grande dificuldade em se qualificar ou quantificar o impacto desta mudança. Isso se deve às incertezas associadas às emissões futuras de gases de efeito estufa, que estão intrinsicamente associadas à extensão da mudança do clima. Os modelos climáticos utilizados para estimar as mudanças futuras em algumas variáveis climáticas, como a temperatura média de superfície e a precipitação, baseiam-se em cenários

de emissões que servem como uma base para algumas projeções do clima. O IPCC utiliza vários cenários, descritos a partir de desenvolvimentos demográficos, sociais, econômicos, tecnológicos e ambientais, para os quais nem sempre há dados disponíveis e confiáveis.

Alguns estudos têm buscado simular a resposta da vegetação para diferentes condições do clima, mas os resultados nem sempre são consistentes. Normalmente projetam mudanças significativas na distribuição espacial da vegetação e impactos diferenciados em distintas comunidades florestais (BRZEZIECKI et al., 1995).

Kirschbaum e Fischlin (1996) indicaram que mesmo um aumento na temperatura média de superfície da ordem de 1°C poderia ser suficiente para provocar mudanças no crescimento e na capacidade de regeneração de muitas espécies florestais. Já em 1994, Miles et al. (2004) projetaram os impactos do aumento anual na concentração de dióxido de carbono na atmosfera da ordem de 1%, sobre a distribuição atual e potencial de 69 espécies florestais representativas da Amazônia. Os resultados indicaram que as espécies mais amplamente distribuídas, com alta tolerância a variações ambientais, foram as menos sensíveis à mudança na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>. Entretanto, entende-se que a mudança do clima, a ocorrência de eventos climáticos extremos, ou outros processos podem alterar a composição de espécies em um ecossistema.

Apesar de existir um grau de incerteza do futuro cenário climático global e, em particular, no Brasil, devido às diferenças nos resultados dos diversos modelos climáticos utilizados para projetar o clima do século 21, todos os cenários apontam para um aquecimento na Amazônia, ainda que em diferentes magnitudes. O aquecimento é maior na região tropical, da ordem de 2°C e até 3°C no norte da Amazônia no cenário A2 do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (MARENGO, 2006).

Os resultados de estudos históricos e paleoecológicos sobre o efeito das mudanças do clima observadas no passado, nas florestas, não podem ser simplesmente utilizados para projetar os efeitos da mudança do clima futura nos ecossistemas florestais. Isso se deve, particularmente, ao fato da extensão florestal, da composição etária e das espécies serem hoje distintas, e terem sido fortemente afetadas por atividades antrópicas. Adicional, e possivelmente mais importante, é o fato da temperatura média de superfície estar aumentando a uma taxa sem precedente. A projeção da resposta das

florestas a padrões alterados de temperatura, precipitação, radiação solar, vento, entre outros, requer modelos mais complexos que os atualmente utilizados, que incluam as complexidades das florestas e do sistema climático, e que envolvam escalas espaciais e temporais mais apropriadas. Está se avançando para avaliações integradas que representam interações complexas em várias escalas espaciais e temporais, processos e atividades, mas os resultados desses modelos são ainda considerados preliminares.

Modelos do Sistema Terrestre<sup>14</sup>, que incluem as componentes do sistema climático (a atmosfera, os oceanos, a criosfera, o sistema terrestre e a biosfera) e suas interações estão sendo desenvolvidos para avaliar os impactos potencialmente perigosos da mudança do clima, a partir da análise de riscos e da vulnerabilidade dos sistemas (RIAL et al., 2004). Os Modelos Globais do Clima<sup>15</sup> também estão avançando para uma representação mais completa do sistema climático.

O resultado de simulações em modelos que integram a atmosfera e a biosfera via um ciclo de carbono completo aponta para a potencial morte em larga escala da floresta amazônica, diminuindo seu potencial papel como sumidouro e reservatório de carbono e ao mesmo tempo contribuindo para aumentar a concentração atmosférica de dióxido de carbono (FRIEDLINGSTEIN et al., 2006; DENMAN et al., 2007). Já em meados dos anos 1990, alguns modelos climáticos projetavam alterações substantivas na composição das florestas, morte em larga escala (*dieback*), e perda da cobertura florestal em resposta ao aumento de temperatura associado ao aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

Desde o terceiro relatório de avaliação do IPCC, o evento de morte em larga escala já havia sido projetado por Modelos de Vegetação Global Dinâmica<sup>16</sup> (*Dynamic Global Vegetation Models*), para o final deste século e

---

<sup>14</sup> Os Modelos do Sistema Terrestre são modelos desenhados para estimar a distribuição espacial e temporal dos principais fluxos de carbono e nitrogênio e os reservatórios na biosfera terrestre, em escalas regional e global.

<sup>15</sup> Modelos Globais do Clima são uma classe dos Modelos Gerais de Circulação utilizados para previsão do tempo, entender o clima e projetar a mudança do clima. A denominação Modelos Globais do Clima se refere especificamente ao entendimento do clima e da projeção da mudança do clima.

<sup>16</sup> Modelos de Vegetação Global Dinâmica (do inglês *Dynamic Global Vegetation Models*) são modelos baseados em processos que incluem o acoplamento de fluxos biogeoquímicos com a dinâmica da vegetação (produtividade, competitividade dinâmica da vegetação, crescimento, distúrbios, mortalidade, entre outros).

além. Esse fenômeno afetaria florestas em áreas tropicais, boreais e montanhosas, implicando em perdas de serviços fundamentais.

Segundo Marengo (2006), “eventos climáticos extremos, como secas induzidas pelo aquecimento global e pelo desmatamento, podem dividir a Amazônia em duas e transformar em cerrado uma área de 600 mil km<sup>2</sup>.” Hutyra et al. (2005), mencionado por Marengo (2006), prepararam “um mapa das áreas mais sensíveis da floresta à seca, usando os registros de precipitação dos últimos cem anos.” Os autores descobriram que uma faixa de mapa correspondente a 11% da área de floresta, que vai de Tocantins à Guiana e atravessa a região de Santarém (Pará) tem padrões de precipitação mais semelhantes aos do cerrado. Isso é consistente com os cenários futuros gerados pelo modelo do Hadley Center, que projetam para a Amazônia um clima tipo savana a partir do ano 2050. Essa Amazônia seca possui vegetação com maiores índices de evapotranspiração e seus solos tendem a ficar mais secos durante os meses sem água do que solos de regiões muito úmidas, e isso a torna mais vulnerável a incêndios florestais, o principal agente de conversão de florestas em savana. Anteriormente, Oyama e Nobre (2003) estimaram que o desmatamento e o aquecimento pudessem converter até 60% da Amazônia em cerrado, derivados do modelo do CPTEC<sup>17</sup>, com um esquema de vegetação dinâmica”.

É importante salientar que alguns tipos de florestas podem se beneficiar da mudança do clima, particularmente as que se encontram hoje afetadas por limitações de seus requisitos mínimos de temperatura e precipitação. As florestas podem também sofrer ganhos na sua produtividade líquida, como resultado da fertilização por CO<sub>2</sub> (embora a magnitude deste efeito permaneça ainda incerta para alguns tipos de sistemas), do aumento da temperatura média em climas frios, com concomitante aumento de precipitação para compensar os déficits de vapor d'água, e do aumento de precipitação onde a disponibilidade de água é limitada.

Para as florestas tropicais, que detêm a maior reserva de carbono na sua biomassa, o aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono desde a Era Industrial pode ter favorecido a dinâmica do crescimento (PHILLIPS et al., 2002; LAURANCE et al., 2004; WRIGHT et al., 2004).

---

<sup>17</sup> Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).

Entretanto, uma floresta mais dinâmica pode, em último caso, armazenar menos carbono ao invés de mais, no futuro, caso ocorram mudanças na composição das espécies (LAURANCE et al., 2004; MALHI et al., 2006), em particular devido a excepcional resposta dos cipós tropicais ao dióxido de carbono, o qual pode provocar mortalidade de árvores e mudanças nas populações (KÖRNER, 2004).

Em áreas da floresta amazônica não fragmentada, os efeitos diretos da fertilização por dióxido de carbono podem ter provocado um aumento substantivo na densidade de cipós nas duas últimas décadas (PHILLIPS et al., 2004). Estimativas da produção global líquida primária a partir de índices de vegetação derivados de dados de satélite indicam um aumento de 6% de 1982 a 1999, com grandes aumentos em ecossistemas tropicais (NEMANI et al., 2003). Dados de satélite utilizados em um estudo por Zhou et al., (2001) confirmam que a atividade da vegetação no Hemisfério Norte aumentou 12% na Eurásia e 8% na América do Norte, no período de 1981 a 1999. Assim, a tendência de estações de crescimento mais longas é consistente com o aumento do ‘greenness’ da vegetação. Fang e Dingbo (2003) atribuem o aumento da produtividade primária líquida em florestas na China em parte à ampliação da estação de crescimento, em todo o território.

No sul da Europa, uma tendência na redução da produção de biomassa foi detectada em relação à diminuição de precipitação (MASELLI, 2004), especialmente após a severa seca de 2003 (GOBRON et al., 2005; LOBO e MAISONGRANDE, 2005). Na América do Norte, associa-se a perda de uma parte substantiva de floresta, detectada por meio de dados de satélite, a verões mais quentes e longos.

As florestas fragmentadas são mais vulneráveis aos danos periódicos das secas provocadas pelo El Niño do que as florestas intactas. Entre os danos registram-se alta taxa de mortalidade de árvores, mudanças na fenologia das plantas e outras mudanças ecológicas, especialmente nas bordas da floresta. Segundo Laurance e Willianson (2001), os fragmentos florestais são especialmente vulneráveis à seca, pois suas bordas são mais secas e mais propensas à queima e ficam normalmente próximas a áreas de pastagem que são freqüentemente queimadas para renovação de sua cobertura.

O IPCC projeta, para meados deste século, e com alta confiança, que o aumento da temperatura e o associado decréscimo de água no solo levarão

à gradual substituição da floresta tropical por savana na parte este da Amazônia, enquanto em áreas mais secas (como no semi-árido), a mudança do clima é esperada a levar à salinização e desertificação de terras agrícolas<sup>18</sup>.

É muito provável<sup>19</sup> que distúrbios naturais, tais como fogo, insetos e doenças, sejam alterados pela mudança do clima, tanto na sua frequência quanto na intensidade, impactando as florestas e o setor florestal. Entretanto, é difícil estimar precisamente o impacto da mudança do clima nesses distúrbios.

Muitas florestas existentes e a maior parte das recentemente estabelecidas podem experimentar condições climáticas que diferem das condições atuais. Infelizmente, para as florestas com baixa intensidade de manejo ou nenhum manejo, particularmente as florestas tropicais, existem menos opções de adaptação planejada que para as florestas mais intensivamente manejadas, aumentando as incertezas quanto à vulnerabilidade dessas florestas à mudança do clima.

#### **4. ADAPTAÇÃO DAS FLORESTAS À MUDANÇA DO CLIMA**

Embora as florestas, como uma classe, provaram ser resilientes à mudanças do clima, no passado, a fragmentação e a degradação das florestas, hoje, as torna mais vulneráveis. A adaptação das espécies à mudança do clima pode ocorrer por meio da evolução ou migração para locais mais apropriados, sendo essa última, muito provavelmente, a resposta mais comum no passado. Entre as práticas de uso da Terra e manejo prováveis de manter a biodiversidade e as funções ecológicas das florestas durante a mudança do clima incluem-se, entre outros, a proteção das florestas primárias, a contenção da fragmentação e a representação dos tipos florestais ao longo de gradientes ambientais em reservas, a prática de exploração florestal de baixa intensidade, a manutenção de um banco genético diverso e a identificação e proteção de grupos funcionais e espécies relevantes.

O setor florestal produtivo já está investindo em melhoria de variedades, proteção florestal, regeneração de florestas, manejo na silvicultura, e operações florestais (SPITTLEHOUSE e STEWART, 2003).

---

<sup>18</sup> Ver a contribuição do Grupo de Trabalho II do IPCC para o quarto relatório de avaliação, Capítulo 13, seções 13.2; 13.4; e 13.7.

<sup>19</sup> Probabilidade percentual maior que 90%.

As florestas são impactadas pelo aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>, pelas mudanças nos regimes de temperatura e variações nos padrões anuais de chuva. Tais mudanças podem alterar os processos biológicos básicos nas árvores e no solo, influenciando o crescimento e a produtividade comercial ao longo do tempo. Há, entretanto, uma lacuna de tempo entre a ocorrência de mudanças atmosféricas e as respostas biológicas dos sistemas florestais, que precisa ser melhor compreendida para se compreender o efeito da mudança do clima nas florestas.

Ambas forças indutores, climáticas e não-climáticas, afetam sistemas, tornando desafiante analisar o papel da mudança do clima nas mudanças observadas. Forças não-climáticas incluem urbanização e poluição, que podem influenciar os sistemas de forma direta ou indireta, através de seus efeitos no albedo e no regime de umidade do solo. Processos socioeconômicos, incluindo mudanças do uso da terra (por exemplo, conversão de florestas para agricultura, ou de agricultura para área urbana) e modificação da cobertura terrestre (por exemplo, através de processos de degradação ou restauração) também afetam os sistemas.

Um estudo avaliando os impactos globais da mudança do clima e a variabilidade climática em florestas e produtos florestais indica que a mudança do clima poderá afetar a produtividade de florestas, com conseqüente impacto no mercado e no suprimento de madeira para outros usos como, por exemplo, a geração de energia com biomassa (PEREZ-GARCIA et al., 2002). Alig et al. (2002) projetam que o impacto líquido da mudança do clima no setor florestal americano poderá ser pequeno, devido à baixa suscetibilidade do mercado de madeira americano à mudança do clima, devido ao grande estoque de florestas, mudanças tecnológicas na indústria de madeira e a habilidade de adaptação (SHUGART et al., 2003). Levantamentos econômicos dos danos da mudança do clima para vários setores ressaltam grandes disparidades regionais na vulnerabilidade aos impactos da mudança do clima (TOL, 2002a, b; MENDELSON e WILLIAMS, 2004; NORDHAUS, 2006).

Alguns estudos conduzidos na Austrália indicam que a mudança do clima pode ter impactos negativos significativos para a sua indústria florestal, através do menor crescimento das árvores devido à menor disponibilidade de água, aumento de temperatura, aumento de danos por queimadas e vento, e maior pressão de pestes e doenças. Impactos freqüentes ou extensos em florestas plantadas podem reduzir substancialmente o suprimento sustentável

de madeira para a indústria de processamento. A mudança do clima pode também afetar as espécies que podem ser cultivadas produtivamente em diferentes regiões, impactando o retorno financeiro.

## 5. CENÁRIOS

### **As *storylines*<sup>20</sup> e cenários globais do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões<sup>21</sup>**

O Relatório Especial sobre Cenários de Emissões apresenta quatro *storylines*, rotuladas de A1, A2, B1 e B2, que descrevem as relações entre as forças indutoras de emissões de gases de efeito estufa e aerossóis e sua evolução durante o século 21 para grandes regiões e globalmente. Cada *storyline* representa diferentes desenvolvimentos demográficos, sociais, econômicos, tecnológicos e ambientais que divergem de forma irreversivelmente crescente e resultam em diferentes níveis de emissões de gases de efeito estufa. As *storylines* assumem que nenhuma política específica para o clima é implementada, formando uma linha de base contra as quais as narrativas com específicas ações de adaptação e mitigação podem ser comparadas.

As *storylines* formam a base para o desenvolvimento de cenários quantitativos usando vários modelos numéricos que foram apresentados no terceiro relatório de avaliação do IPCC. Os cenários de emissões foram convertidos em projeções das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa e aerossóis, forçamento radiativo do clima, efeitos no clima regional, e efeitos climáticos no nível global do mar (IPCC, 2001).

---

<sup>20</sup> *Storylines* são narrativas de como o futuro pode evoluir. Descrevem as principais tendências das forças sócio-políticas-econômicas indutoras da mudança, e as relações entre elas. Embora as *storylines* possam, por si só, constituir um cenário, normalmente envolvem também projeções quantitativas da mudança futura (IPCC, 2007a).

<sup>21</sup> O texto que segue é uma tradução adaptada daquele contido no Box 2.2 e sua Figura 2.5, baseada em *Nakienovi et al. (2000)* (Síntese das características das quatro *storylines* do Relatório Especial de Cenários de Emissões), na seção 2.4.6 do Capítulo 2 do Relatório de Avaliação do Grupo de Trabalho II do IPCC (IPCC, 2007a).

Na *storyline* A1, o mundo é orientado para o mercado; a economia tem o mais rápido crescimento per capita; a população apresenta um pico em 2050, declinando em seguida; a governança é pautada por fortes interações regionais e convergência de renda; para a tecnologia, três grupos de cenários foram desenvolvidos: **A1FI**: intensivo em fósfil; **A1T**: fontes de energia não fósfil;

- **A1B**: equilíbrio entre todas as fontes.

Na *storyline* A2, o mundo é diferenciado; a economia é orientada regionalmente e tem o mais baixo crescimento per capita; a população se apresenta continuamente em crescimento; a governança é auto-apoiada na preservação de identidades locais; e a tecnologia é a mais baixa e o desenvolvimento tecnológico o mais fragmentado.

Na *storyline* B1, o mundo é convergente; a economia é baseada em serviços e informação e tem um menor crescimento que na *storyline* A1; a população é a mesma que para a *storyline* A1; a governança se apóia em soluções globais para sustentabilidade econômica, social e ambiental; e a tecnologia é limpa e eficiente em recursos.

Na *storyline* B2, o mundo se baseia em soluções locais; a economia tem um crescimento intermediário; a população está continuamente aumentando, mas a uma taxa menor que na *storyline* A2; a governança se apóia em soluções locais e regionais para a proteção ambiental e equidade social; e a tecnologia se desenvolve de forma mais rápida que na *storyline* A2, mas menos rápida e mais diversa do que em A1 e B1.

Uma das limitantes dos diferentes modelos utilizados para projetar os potenciais impactos da mudança do clima é a representação, nos modelos, de mudanças do uso da terra. Alguns modelos incluem o efeito da mudança do clima na cobertura da terra no futuro, enquanto outros não. Em alguns estudos, a mudança do clima foi apontada como tendo um efeito negligenciável na mudança do uso da terra, quando comparada à mudança socioeconômica (SCHRÖTER et al., 2005). Tecnologias, especialmente as que afetam a produtividade, serão também determinantes da forma como o futuro se desenvolverá.

Versões preliminares de modelos biogeoquímicos globais indicavam que os ecossistemas terrestres atuariam como sumidouro líquido de carbono por várias décadas e possivelmente ao longo do século 21, devido aos benefícios da fertilização por dióxido de carbono, pela ocorrência de estações de crescimento mais prolongadas, e maior precipitação. Entretanto, à medida que os benefícios da fertilização forem se estabilizando e o efeito da temperatura na respiração e transpiração forem aumentando, isso levará a uma reversão da capacidade de remoção de carbono da atmosfera, potencialmente resultando em perdas líquidas de carbono nos ecossistemas globais (por exemplo, CRAMER et al., 2001).

Uma das dificuldades associadas à modelagem dos impactos da mudança do clima nas florestas é que os efeitos da mudança do clima muito provavelmente diferirão entre as árvores existentes e as árvores regeneradas no futuro (naturalmente ou plantadas). As florestas nativas estão adaptadas ao clima local e à variabilidade daquele clima. Mudanças no clima afetarão essas árvores através de mudança na taxa de crescimento, mortalidade das árvores e produção de sementes para a próxima geração de florestas. Para as árvores existentes, outros impactos da mudança do clima poderão incluir o aumento do risco a incêndios florestais e mortalidade associada ao aumento de doenças e pragas. O nosso entendimento da relação entre as árvores existentes e o clima é a base para a modelagem do impacto futuro do clima. Entretanto, as árvores plantadas no futuro crescerão em um ambiente diferente, e suas respostas à mudança do clima podem surpreender em termos do crescimento em volume, produtividade e qualidade. Seis modelos dinâmicos da vegetação global utilizados para projetar as possíveis respostas dos ecossistemas tropicais e no hemisfério sul ao aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> e à mudança do clima na produtividade líquida indicam grandes incertezas.

## 6. FUTURO E NECESSIDADES

Segundo o IPCC (2007a)<sup>22</sup>, “muitos estudos sobre impacto, adaptação e vulnerabilidade à mudança do clima precisam incluir as mudanças futuras do uso e cobertura da terra. Isso é particularmente relevante para estudos

---

<sup>22</sup> Ver Seção 2.4.6.5 (*Land use scenarios*) no Capítulo 2 (*New Assessment Methods and the Characterisation of Future Conditions*).

regionais relacionados à agricultura e recursos hídricos (BARLAGE et al., 2002; KLÖCKING et al., 2003), florestas (BHADWAL e SINGH, 2002) e ecossistemas (BENNETT et al., 2003; CUMMING et al., 2005), mas tem também uma grande influência nos padrões regionais de demografia e atividade econômica (GEURS e VAN ECK, 2003), e seus conseqüentes problemas de degradação ambiental (YANG et al., 2003) e poluição (BATHURST et al., 2005). Cenários de uso e cobertura da terra também foram utilizados para analisar as retroalimentações para o sistema climático (DEFRIES et al., 2002; LEEMANS et al., 2002; MAYNARD e ROYER 2004) e fontes e sumidouros de gases de efeito estufa (EL-FADEL et al., 2002; FEARNSIDE, 2000; SANDS e LEIMBACH, 2003)”.

Há necessidade de se melhorar o conhecimento do papel dos regimes de perturbação, no referente à frequência e intensidade de eventos como, por exemplo, seca, fogo, epidemia de insetos, inundações, tempestades de vento, pois interagem com as respostas dos ecossistemas à mudança do clima e à poluição (ver, por exemplo, OSMOND et al., 2004; OPDAM e WASCHER, 2004).

Há também necessidade de se melhorar as projeções de precipitação, em nível regional, e estudar os seus potenciais efeitos no regime de águas, enfatizando as interações entre vegetação e atmosfera, incluindo os efeitos de fertilização por CO<sub>2</sub> em florestas tropicais sazonais e savanas (ver, por exemplo, JASIENSKI et al., 1998; KARNOSKY, 2003).

## **7. RECOMENDAÇÕES PRELIMINARES**

Existe uma série de recomendações que podem ser implementadas na área florestal. Parte dessas recomendações pode ser inserida no Plano Nacional (de Ação) sobre Mudança do Clima, atualmente em processo de elaboração, e que tem como eixos estruturantes a identificação de ações de mitigação, medidas de adaptação, pesquisa e desenvolvimento, e capacitação, disseminação e educação.

Como existe uma sinergia entre desmatamento e mudança do clima, o primeiro intensificando os impactos do segundo, as ações para reduzir o desmatamento terão como conseqüência reduzir a vulnerabilidade das florestas à mudança do clima. Prevenir a fragmentação florestal é uma medida de adaptação antecipatória para as florestas nativas, que também está

associada à redução do desmatamento. Essa redução trará tanto benefícios para a prevenção da mudança do clima (mitigação) quanto para a adaptação, reduzindo a vulnerabilidade das florestas à mudança do clima.

Há lacunas importantes do conhecimento científico sobre os potenciais impactos da mudança do clima nas florestas e no setor florestal produtivo de forma geral, assim como na identificação das vulnerabilidades desses sistemas.

Há necessidade de se ampliar a quantidade e qualidade de dados e informações necessárias para os estudos de impacto, adaptação e vulnerabilidade à mudança do clima, e promover o uso de métodos e ferramentas que permitam uma melhor avaliação regional e local das vulnerabilidades e potenciais impactos da mudança do clima nos ecossistemas florestais, em particular. Nesse particular, a Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais pode constituir-se em um meio importante de agregação de dados e informações, já que propõe realizar estudos sobre os impactos da mudança do clima no Brasil, com ênfase nas vulnerabilidades do país à mudança do clima e na formulação de alternativas de adaptação dos sistemas social, econômico e ambiental do país a essa mudança.

Deve-se assegurar a disseminação de informações sobre impactos já percebidos e sua localização, assim como projetar, de forma confiável, os impactos esperados da mudança do clima, sob diversos cenários de emissões, alertando sobre os impactos irreversíveis, estimando os diferentes riscos e identificando oportunidades relacionadas à mudança do clima.

A partir do conhecimento dos potenciais impactos, definir abordagens para identificar e avaliar medidas e estratégias de adaptação, incluindo como tornar as florestas mais resilientes aos impactos da mudança do clima. Isso pode acarretar em mudanças no manejo e planejamento das florestas plantadas, assim como na sua composição. É importante salientar que não necessariamente os reflorestamentos com espécies nativas assegurarão que essas florestas se adaptarão à mudança do clima. Atualmente, na Europa, a interpretação sobre conservação genética e políticas de biodiversidade varia. Na Islândia, considera-se que todas as espécies presentes antes de 1948 são adequadas para programas de reflorestamento que visam criar florestas resistentes ao clima. Já no Reino Unido, somente aquelas espécies com registro

de pólen indicando que já existiam há mais de cinco mil anos atrás são consideradas nativas, e somente naquelas regiões onde originalmente se instalaram. Isso pode resultar em políticas incoerentes, à primeira vista, tal como não apoiar reflorestamentos de uma espécie não nativa em uma região potencialmente receptora dessa espécie, caso ela não tenha a capacidade adaptativa para continuar a se desenvolver na sua região nativa, frente à mudança do clima.

Há necessidade de se avançar no conhecimento de que espécies seriam mais apropriadas sob um aumento da temperatura e regimes diferenciados de chuvas. É importante salientar que muito embora se possa projetar uma pequena ou insignificante mudança na quantidade anual de chuvas, existe o risco de que a distribuição dessas chuvas seja alterada, implicando em períodos de grande intensidade de chuvas, seguido por períodos de estiagem ou seca prolongada.

Finalmente, deve-se buscar desenvolver cenários de mitigação que incluam políticas e medidas explícitas para reduzir emissões por desmatamento e emissões por degradação de florestas, incluindo os aspectos econômicos e tecnológicos associados à redução de emissões.

#### REFERÊNCIAS

- ACHARD, F. et al. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemistry Cycles*, n. 18, 2004. Doi: 10.1029/2003GB002142.
- BARLAGE, M. J. et al. Impacts of climate change and land use change on runoff from a Great Lakes watershed. *Journal of Great Lakes Research*, n. 28, p. 568-582, 2002.
- BATHURST, J. C. et al. Scenario modelling of basin-scale, shallow landslide sediment yield, Valsassina, Italian Southern Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n. 5, p. 189-202, 2005.
- BENNETT, E. M. et al. Why global scenarios need ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, n. 1, p. 322-329, 2003.
- BERGENGREN, J. C. et al. Modeling global climate vegetation interactions in a doubled CO<sub>2</sub> world. *Climate Change*, n. 50, p. 31-75, 2001.

BETTS, R. A. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, n. 408, p. 187-190, 2000.

\_\_\_\_\_ et al. The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. *Theoretical and Applied Climatology*, n. 78, p. 157-175, 2004.

BHADWAL, S.; SINGH, R. Carbon sequestration estimates for forestry options under different land-use scenarios in India. *Current Science*, n. 83, p. 1380-1386, 2002.

BRZEZIECKI, B.; KIENAST, F.; WILDI, O. Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *Journal of Vegetation Science*, v. 6, n. 2, p. 257-268, 1995.

CALLAGHAN, T. V. et al. Arctic tundra and polar desert ecosystems. In: SYMON, C.; ARRIS, L.; HEAL, B. (Ed.). *Arctic Climate Impact Assessment (ACIA): scientific report*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 243-352.

CANADELL, J. G. et al. Quantifying, understanding and managing the carbon cycle in the next decades. *Climatology Change*, n. 67, p. 147-160, 2004.

CIAIS, P. et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, n. 437, p. 529-533, 2005.

COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. *Nature*, n. 421, p. 913-919, 2003.

\_\_\_\_\_; Laurance, W. F. Fire as a large-scale edge effect in Amazonian forests. *Journal of Tropical Ecology*, n. 18, p. 311-325, 2002.

COX, P. M. et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, n. 408, p. 184-187, 2000.

\_\_\_\_\_. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, n. 78, p. 137-156, 2004.

CRAMER, W. et al. Tropical forests and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. *Philosophy Transactions of Royal Society of London B*, n. 359, p. 331-343, 2004.

\_\_\_\_\_. 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*, n. 7, p. 357-373, 2001.

CUMMING, G. S. et al. Are existing global scenarios consistent with ecological feedbacks?. *Ecosystems*, n. 8, p. 143-152, 2005.

DE BONO, A. et al. *Impacts of summer 2003 heat wave in Europe*. Nairobi: UNEP, 2003. (Early Warning on Emerging Environmental Threats, 2).

DEFRIES, R. S. et al. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 99, n. 22, p. 14256-14261, 2002.

DENMAN, K. L. et al. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: CLIMATE change 2007: the physical science basis. [S.l.: s.n.], 2007. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report.

EL-FADEL, M.; JAMALI, D.; KHORBOTLY, D. Land use, land use change and forestry related GHG emissions in Lebanon: economic valuation and policy options. *Water Air And Soil Pollution*, n. 137, p. 287-303, 2002.

FANG, S.; DINGBO, K. Remote sensing investigation and survey of Qinghai lake in the past 25 years. *Journal of Lake Sciences*, v. 15, n. 4, p. 290-296, 2003.

FEARNSIDE, P. M. Global warming and tropical land-use change: Greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic Change*, n. 46, p. 115-158, 2000.

FISCHER, R. (Ed.). *The condition of forests in Europe: 2005 executive report*. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, 2005.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of Climate*, n. 19, p. 3337-3353, 2006.

GEURS, K. T.; VAN ECK, J. R. R. Evaluation of accessibility impacts of land-use scenarios: the implications of job competition, land-use, and infrastructure developments for the Netherlands. *Environment and Planning B-Planning & Design*, n. 30, p. 69-87, 2003.

GOBRON, N. et al. The state of vegetation in Europe following the 2003 drought. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 9, p. 2013-2020, 2005.

HEATH, J. et al. Rising atmospheric CO<sub>2</sub> reduces sequestration of root-derived soil carbon. *Science*, n. 309, p. 1711-1713, 2005.

HOUGHTON, R. A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850 – 2000. *Tellus*, n. 51B, p. 298-313, 2003.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881 p. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

\_\_\_\_\_. *Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability*. [S.l.: s.n.], 2007a. Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_.: the physical science basis. [S.l.: s.n.], 2007b. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_.: mitigation of climate change. [S.l.: s.n.], 2007c. Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.

JASIENSKI, M.; THOMAS, S. C.; BAZZAZ, F. A. Blaming the trees: a critique of research on forest responses to high CO<sub>2</sub>. *Trends Ecology Evolution*, n. 13, p. 427, 1998.

JOLLY, W. M. et al. Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters*, n. 32, 2005.

KARNOSKY, D. F. Impacts of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on forest trees and forest ecosystems: knowledge gaps. *Environmental International*, n. 29, p. 161-169, 2003.

KIRSCHBAUM, M; FISCHIN, A. Climate change impacts on forests. In: WATSON, R.; ZINYOWERA, M. C.; MOSS, R. H. (Ed.). *Climate change 1995: impacts, adaptation and mitigation of climate change: scientific-technical analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 95-129. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

KLÖCKING, B. et al. Development and allocation of land-use scenarios in agriculture for hydrological impact studies. *Physics and Chemistry of the Earth*, n. 28, p. 1311-1321, 2003.

KÖRNER, C. Ecological impacts of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on terrestrial ecosystems. *Philosophy Transactions of Royal Society of London*, n. 361, p. 2023-2041, 2003.

\_\_\_\_\_; PAULSEN, J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, n. 31, p. 713-732, 2004.

LAURANCE, W. F.; WILLIAMSON, G. B. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. *Conservation Biology*, v. 15, n. 6, p. 1529-1535, 2001.

\_\_\_\_\_. et al. Pervasive alteration of tree communities in undisturbed Amazonian forests. *Nature*, n. 428, p. 171-175, 2004.

LEEMANS, R. et al. The consequences of uncertainties in land use, climate and vegetation responses on the terrestrial carbon. *Science in China Series C: Life Sciences*, n. 45, p. 126-141, 2002.

LOBO, A.; MAISONGRANDE, P. Stratified analysis of satellite imagery of SW Europe during summer 2003: the differential response of vegetation classes to increased water deficit. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, n. 2, p. 2025-2060, 2005.

MALHI, Y. et al. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth amazonian forests. *Global Change Biology*, n. 12, p. 1107-1138, 2006.

MAREGO, A. *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.* [S.l.; S.n.], 2006.

MASELLI, F. Monitoring forest conditions in a protected mediterranean coastal area by the analysis of multi-year NDVI data. *Remote Sensing of the Environment*, v. 89, n. 4, p. 423-433, 2004.

MAYNARD, K.; ROYER, J. F. Effects of “realistic” land-cover change on a greenhouse-warmed African climate. *Climate Dynamics*, n. 22, p. 343-358, 2004.

MEEHL, G. A. et al. Global climate projections. In: MILLER, H. L. et al (Ed.). *Climate Change 2007: the physical science basis.* Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 747-845. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

MENDELSON, R.; WILLIAMS, L. Comparing forecasts of the global impacts of climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, n. 9, p. 315-333, 2004.

MILES, L.; GRAINGER, A.; PHILLIPS, O. The impact of global climate change on tropical forest biodiversity in Amazonia. *Global Ecology and Biogeography*, v. 13, n. 6, p. 553-565, 2004.

- NAKICENOVIC, N. *Emissions scenarios: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- NEMANI, R. R. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, n. 300(5625), p. 1560, 2003.
- NORDHAUS, W. D. Geography and macroeconomics: new data and new findings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, n. 103, p. 3510-3517, 2006.
- NUNES, M. C. S. et al. Land cover type and fire in Portugal: do fires burn land cover selectively?. *Landscape Ecology*, n. 20, p. 661-673, 2005.
- OPDAM, P.; WASCHER, D. Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale level in research and conservation. *Biology Conservation*, n. 117, p. 285-297, 2004.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO – FAO. *Forest resources assessment*. 2005. Disponível em: <[www.fao.org/forestry](http://www.fao.org/forestry)>. Acesso em: 2008.
- OSMOND, B. et al. Changing the way we think about global change research: scaling up in experimental ecosystem science. *Global Change Biology*, n. 10, p. 393-407, 2004.
- PARMESAN, C.; ROOT, T. L.; WILLIG, M. R. Impacts of extreme weather and climate on terrestrial biota. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 81, n. 3, p. 443-450, 2000.
- PENG, C.; APPS, M. J. Simulating global soil-CO<sub>2</sub> flux and its response to climate change. *Journal of Environmental Sciences*, n. 12, p. 257-265, 2000.
- PEREZ-GARCIA, J. et al. Impacts of climate change on the global forest sector. *Climatic Change*, n. 54, p. 439-461, 2002.
- PHILLIPS, O. L. et al. Increasing dominance of large lianas in Amazonian forests. *Nature*, n. 418, p. 770-774, 2002.
- \_\_\_\_\_ et al. Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976-2001. *Philosophy Transactions of Royal Society of London B*, n. 359, p. 381-407, 2004.
- PHOENIX, G. K.; LEE, J. A. Predicting impacts of Arctic climate change: past lessons and future challenges. *Ecology Research*, n. 19, p. 65-74, 2004.

REICHSTEIN, M. et al. Severe drought effects on ecosystem CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses?. *Global Change Biology*, n. 8, p. 999-1017, 2002.

RIAL, J. A. Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the Earth's climate system. *Climatic Change*, n. 65, p. 11-38, 2004.

SCHAPHOFF, S. et al. Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections. *Climatic Change*, n. 74, p. 97-122, 2006.

SCHOLZE, M. et al. A climate change risk analysis for world ecosystems. *PNAS*, n. 103, p. 13116-13120, 2006.

SCHRÖTER, D. et al. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, v. 1, n. 310, p. 1333-1337, 2005.

SEMAZZI, F. H. M.; SONG, Y. A GCM study of climate change induced by deforestation in Africa. *Climatology Research*, n. 17, p. 169-182, 2001.

SHUGART, H.; SEDJO, R.; SOHNGEN, B. *Forests and global climate change: potential impacts on U.S. forest resources*. Arlington: Pew Center on Global Climate Change, 2003.

SPITTLEHOUSE, D. L.; STEWART, R. B. Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal Ecosystem Management*, n. 4, p. 1-11, 2003.

TOL, R. S. J. New estimates of the damage costs of climate change: part I: benchmark estimates. *Environmental Resource Economic*, n. 21, p. 45-73, 2002a.

\_\_\_\_\_. New estimates of the damage costs of climate change: part II: dynamic estimates. *Environmental Resource Economic*, n. 21, p. 135-160, 2002b.

TRIGO, R. M. The exceptional fire season of summer 2003 in Portugal. *Geophysical Research Abstracts*, n. 7, p. 09690, 2003.

\_\_\_\_\_. Atmospheric conditions associated with the exceptional fire season of 2003 in Portugal. *International Journal of Climatology*, n. 26, p. 1741-1757, 2003.

YANG, D. W. et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, n. 17, p. 2913-2928, 2003.

ZHOU, L. M. et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, n. 106, p. 20069-20083, 2001.

WOODWARD, F. I.; LOMAS, M. R. Vegetation dynamics: simulating responses to climatic change. *Biology Review*, n. 79, p. 643-670, 2004.

WRIGHT, S. J. et al. Are lianas increasing in importance in tropical forests?: a 17-year record from Panama. *Ecology*, n. 85, p. 484-489, 2004.

## Resumo

Este artigo sintetiza os principais impactos esperados da mudança do clima nos sistemas florestais, embora haja uma grande dificuldade de se qualificar ou quantificar esses impactos devido às incertezas associadas às emissões futuras de gases de efeito estufa, as quais estão intrinsecamente associadas à extensão da mudança global do clima. Esses impactos podem ser negativos quando, por exemplo, a mudança no regime de chuvas acarreta longos períodos de estiagem, aumentando a flammabilidade das florestas, com conseqüente mortalidade de árvores e espécies florestais. Mas também podem ser positivos, quando a resposta das florestas ao aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono for positiva, acumulando mais biomassa e a uma taxa de crescimento mais alta.

A habilidade das florestas adaptar-se naturalmente à mudança do clima dependerá da taxa e da magnitude desta mudança. Projeta-se, entretanto, limites acima dos quais as florestas não terão mais capacidade de adaptar-se à mudança do clima sem comprometer suas funções básicas. Projeta-se que a mudança do clima altere a frequência e a intensidade de distúrbios naturais, tais como fogo, incidência de doenças e pragas, impactando as florestas naturais e o setor florestal como um todo. Esses impactos variam entre regiões e são dependentes do tipo de manejo e das medidas de adaptação implementadas.

As florestas têm um potencial importante de mitigação da mudança do clima, que incluem reflorestamento e florestamento, atividades de manejo florestal, redução da taxa de desmatamento e o uso de produtos e resíduos florestais na produção de bioenergia para substituição de combustíveis fósseis, entre outros.

É fundamental aprofundar-se o conhecimento sobre a vulnerabilidade das florestas e do setor florestal à mudança do clima, de forma a se desenvolver e implementar medidas de adaptação. Neste particular, o papel da comunidade científica e do setor privado tornam-se fundamentais.

## Palavras-chave

Mudança global do clima. Impactos. Florestas. Vulnerabilidade. Comunidade científica.

## Abstract

*This paper synthesizes the principal expected impacts of climate change on forests systems, although its is very difficult to qualify and quantify these impacts due to uncertainties related to the future greenhouse gases emissions, which are directly associated to the magnitude of global climate change. These impacts could be adverse when, for example, a change in the precipitation patterns causes long periods of drought, increasing the flammability of the forests with consequent mortality of trees and forest species. Climate change could also have positive impacts if the increased concentration of carbon dioxide in the atmosphere leads to greater and faster accumulation of biomass in trees.*

*The ability of forests to naturally adapt to climate change will depend on the rate and magnitude of this change. However, there are thresholds above which the forests will not have the ability to adapt to climate change without compromising their basic functions. Climate change is predicted to alter the frequency and intensity of natural disturbances, such as fires, occurrence of diseases and plagues, having impacts on natural forests and the forest sector as a whole. These impacts vary between regions and depend on the type of management and the implemented adaptation measurements.*

*Forests have an important climate change mitigation potential, which includes reforestation and afforestation, forest management activities, reduction of deforestation rates and the use of forest products and residues for biofuel production to replace fossil fuel use, among others.*

*It is fundamental to expand knowledge about the vulnerability of forests and the forest sector to climate change to develop and implement adaptation measures. The role of the scientific community and the private sector is of fundamental importance in this respect.*

## Keywords

*Global climate change. Impacts. Forests. Vulnerability. Scientific community.*

## A autora

THELMA KRUG é mestre em Ciências – Probabilidade e Estatística (Universidade de Roosevelt/USA) e doutora em Estatística Espacial (Universidade de Sheffield/Inglaterra). É pesquisadora titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).