



Parcerias Estratégicas

Número 27 - dezembro 2008

Mudança do clima no Brasil: Vulnerabilidade, impactos e adaptação

Mudanças climáticas e o Brasil

Cenários de mudança climática para a América do Sul para o final do século 21

Impacto, vulnerabilidade e adaptação das florestas à mudança do clima

Mudança do clima no setor agropecuário e solos agrícolas

Análise da vulnerabilidade da biodiversidade brasileira frente às mudanças climáticas globais

Mudança do clima no semi-árido do Brasil

Energia e recursos hídricos: possibilidades de adaptação da geração de energia hidrelétrica no Brasil às mudanças climáticas globais

Mudanças do clima e zonas costeiras brasileiras

Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil

Mudança climática global e saúde humana no Brasil

Parcerias Estratégicas

Número 27 – dezembro 2008 – Brasília, DF

Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação



ISSN 1413-9375

Parc. Estrat. | Brasília, DF | n. 27 | p. 1-360 | dez. 2008

PARCERIAS ESTRATÉGICAS – NÚMERO 27 – DEZEMBRO/2008

Publicação semestral do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

CONSELHO EDITORIAL

Adriano Batista Dias
Bertha Koiffmann Becker
Eduardo Baumgratz Viotti
Evando Mirra de Paula e Silva
Gilda Massari
Lauro Morhy
Lucia Carvalho Pinto de Melo
Ricardo Bielschowsky
Ronaldo Mota Sardenberg

EDITORIA

Tatiana de Carvalho Pires

CAPA

André Scofano

Endereço para correspondência:

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)
SCN Quadra 2 Bloco A Edifício Corporate Financial Center salas 1102/1103
70712-900 – Brasília, DF
Tel: (xx61) 3424.9600 / 3424.9666 Fax: (xx61) 3424.9671
e-mail: editoria@cgee.org.br
URL: <http://www.cgee.org.br>

Distribuição gratuita

Parcerias Estratégicas / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. - Vol. 1, n. 1 (maio 1996)- v. 1, n. 5 (set. 1998); n. 6 (mar. 1999)-. – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos : Ministério da Ciência e Tecnologia, 1996-1998; 1999-

v.; 25 cm.

Semestral.

n. 27 (dez. 2008)

ISSN 1413-9375

1. Política e governo – Brasil 2. Inovação tecnológica I. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.
II. Ministério da Ciência e Tecnologia.

CDU 323.6(81)(05)

ESTA EDIÇÃO DA REVISTA PARCERIAS ESTRATÉGICAS CORRESPONDE A UMA
DAS METAS DO CONTRATO DE GESTÃO CGEE/MCT/2008.

Os artigos publicados nesta edição são de exclusiva responsabilidade de seus autores.

PARCERIAS ESTRATÉGICAS

Número 27 · dezembro/2008 · ISSN 1413-9375

Edição Especial – Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação

Sumário

Apresentação

Lucia Carvalho Pinto de Melo 5

Mudanças climáticas e o Brasil – Contextualização

Carlos A. Nobre 7

Cenários de mudança climática para a América do Sul
para o final do século 21

Carlos A. Nobre, Gilvan Sampaio, Luis Salazar 19

Impacto, vulnerabilidade e adaptação das florestas à mudança do clima

Thelma Krug 43

Vulnerabilidades, impactos e adaptação à mudança do clima no setor
agropecuário e solos agrícolas

Magda Aparecida de Lima, Bruno José Rodrigues Alves 73

Análise da vulnerabilidade da biodiversidade brasileira frente
às mudanças climáticas globais

*Vanderlei Perez Canhos, Marinez Ferreira de Siqueira, Alexandre Marino,
Dora Ann Lange Canhos* 113

Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do
clima no semi-árido do Brasil

Jose A. Marengo 149

Energia e recursos hídricos: vulnerabilidade, impactos e possibilidades de adaptação da geração de energia hidrelétrica no Brasil às mudanças climáticas globais <i>Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, João Leonardo da Silva Soito</i>	177
Vulnerabilidade, impactos e adaptação às mudanças do clima: a zona costeira <i>Claudio Freitas Neves, Dieter Muebe</i>	217
Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil <i>Wagner Costa Ribeiro</i>	297
Mudança climática global e saúde humana no Brasil <i>Ulisses E. C. Confalonieri</i>	323
Apêndice – Recomendações para iniciativas de C,T&I	351

Apresentação

De acordo com o 4º relatório do Painel Intergovernamental sobre a Mudança Climática “o aquecimento do sistema climático é inequívoco, como agora é evidente pelas observações dos aumentos das temperaturas médias do ar e dos oceanos, o derretimento generalizado de neve e gelo e o aumento global médio do nível do mar”. A questão da adaptação à mudança do clima vem se tornando cada vez mais relevante no âmbito das negociações da Convenção do Clima. Com efeito, os relatórios do IPCC indicam que os países Não-Anexo I deverão ter maiores dificuldades para lidar com os impactos e enfrentar os custos crescentes de adaptação à mudança do clima.

O Brasil carece de um programa mobilizador das competências nacionais nessa área, capaz de conduzir o grau de conhecimento sobre esse assunto a um patamar condizente com as necessidades e a importância do tema. O setor de ciência e tecnologia nacional precisa integrar a relevância da questão das mudanças climáticas para o futuro sustentável do país. É fundamental aumentar o conhecimento em relação às vulnerabilidades e impactos setoriais e regionais, para poder estabelecer adequadas estratégias de adaptação.

A Revista Parceria Estratégica nº 27, Edição Especial “Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação” aborda esse tema. Ela é o resultado de uma das ações ligadas às mudanças climáticas globais desenvolvidas no âmbito do Contrato de Gestão de 2007, firmado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), sob a supervisão do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT).

O trabalho foi realizado com base em estudos conduzidos desde 2004 pelo CGEE, cujos primeiros resultados foram publicados no Caderno NAE nº 3, Mudança do Clima Vol. I, identificando, preliminarmente, alguns dos possíveis impactos causados pela mudança do clima no país.

As informações levantadas foram atualizadas e aprofundadas resultando na presente coletânea de artigos que abordam, para cada uma de nove áreas temáticas, um mapeamento e análise das vulnerabilidades à mudança do clima, um levantamento e exame dos riscos e impactos

decorrentes, e recomendações preliminares relativas à elaboração e adoção de políticas e estratégias de adaptação a essas mudanças.

Para tal, foram mobilizados dez especialistas brasileiros renomados na área, sendo cada um deles responsável pela abordagem de temas específicos e, em alguns casos, liderando trabalhos coletivos:

- Carlos A. Nobre: Cenários de mudança climática para a América do Sul para o final do Século 21
- Thelma Krug: Florestas
- Magda Aparecida de Lima: Agropecuário e solos agrícolas
- Vanderlei P. Canhos: Biodiversidade
- José A. Marengo: Semi-árido
- Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas: Recursos hídricos e energia
- Claudio Freitas Neves e Dieter Muehe: Zonas costeiras
- Wagner Costa Ribeiro: Zonas urbanas
- Ulisses E. C. Confalonieri: Saúde humana

Estes artigos foram apresentados pelos autores e debatidos por um seletivo grupo de representantes de entidades públicas e privadas, em uma oficina de trabalho realizada em fevereiro de 2008, antes de serem finalizados para publicação na revista.

No final desta edição está inserido um apêndice com recomendações preliminares para iniciativas de ciência, tecnologia e inovação (C,T&I) no âmbito de cada área temática, elaboradas com base nos artigos, com o objetivo de subsidiar a formulação de políticas e estratégias para este setor. Para a realização dessa etapa, contamos com o apoio do CentroClima, conduzido por Emílio La Rovere.

Meus especiais agradecimentos a Marcelo Khaled Poppe, pela coordenação dos trabalhos e sua equipe de especialistas Jürgen Leeuwestein Ana Carolina Perico e Mayra Juruá, que se empenharam exaustivamente para que mais essa meta fosse cumprida com sucesso no CGEE.

LUCIA CARVALHO PINTO DE MELO

Presidenta

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Mudanças climáticas e o Brasil – Contextualização

Em comparação a outros países em desenvolvimento, o Brasil e a América Latina não estão, de modo geral, no grupo dos países ou regiões mais vulneráveis do mundo às mudanças climáticas. Nessa categoria estão quase todos os países da África e do sul da Ásia, além das pequenas ilhas oceânicas e as principais vulnerabilidades desses países neste século decorrerão (já decorrem numa certa medida) do acesso à água e a susceptibilidade a inundações. Entretanto, isto não torna o Brasil um país “a prova das mudanças climáticas”.

Assim, uma pergunta fundamental é saber até que ponto o Brasil é vulnerável às mudanças climáticas. A economia brasileira tem forte dependência de recursos naturais renováveis e mais de 50% do PIB estão associados a esses, principalmente por intermédio da agricultura, hidroeletricidade, biocombustíveis, bioenergia, energia eólica, energia solar, entre outros. Portanto, a economia brasileira é potencialmente vulnerável a mudanças climáticas que possam eventualmente diminuir a utilização de recursos naturais renováveis, tanto aqueles presentemente utilizados como principalmente o uso futuro destes e de novas fontes destes recursos.

Em segundo lugar, deve-se destacar que as mudanças climáticas, assim como a variabilidade climática atual com seus extremos, acentuam a vulnerabilidade social dos mais pobres, pelo simples fato de que estes têm dificuldades estruturais de fazer frente a elas e aumentar sua capacidade adaptativa. O estágio de desenvolvimento do país ainda apresenta grande desigualdade social e regional e mais de 50% da população pode ser considerada pobre, tornando-se particularmente vulnerável às mudanças climáticas que se projetam, especialmente as populações rurais do semi-

árido do Nordeste e os habitantes pobres das periferias das cidades brasileiras e das áreas costeiras com baixas elevações.

E, finalmente, no aspecto ambiental e ecológico, considerando a nossa característica de país tropical mega-diverso e a relativamente pequena elasticidade de adaptação das espécies da fauna e da flora a mudanças ambientais abruptas, pode-se inferir que nosso patrimônio biológico possa ser muito vulnerável as mudanças climáticas.

Em resumo, o país pode apresentar vulnerabilidade socioeconômica e ambiental significativa às mudanças climáticas. Torna-se um imperativo estratégico, portanto, o conhecimento científico dos possíveis impactos das mudanças climáticas projetadas para ocorrer neste século em todos os setores, sistemas e regiões do país, especialmente sobre a agricultura, recursos hídricos, energias renováveis, saúde humana, ecossistemas e biodiversidade, zonas costeiras, cidades e indústria. A partir desse conhecimento, podem-se identificar nossas principais vulnerabilidades às mudanças climáticas, elaborar e implementar políticas públicas para redução dessas e aumento da capacidade adaptativa da população, da economia e, na medida do possível, dos ecossistemas.

A partir da repercussão mundial do Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), publicado em partes durante 2007, também o Brasil parece ter despertado para a questão ambiental sem precedentes da história da humanidade. Uma série de iniciativas nacionais está em curso. No terreno científico, destaca-se a criação pelo Ministério da Ciência e Tecnologia da “Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas” (Rede Clima), voltada a gerar informações científicas que ajudem o país a responder aos desafios das mudanças ambientais globais. Programas de pesquisa para tratar do tema florescem em vários Estados brasileiros. No âmbito das políticas públicas, encontra-se em processo de elaboração e aprovação a Política e o Plano Nacional de Mudanças Climáticas, idealmente constituindo-se em marcos legais para guiar as ações brasileiras para mitigar as mudanças climáticas e para aumentar a capacidade adaptativa.

Os artigos que seguem este capítulo inicial apresentam o panorama atual do conhecimento sobre as mudanças climáticas globais para setores chave ao desenvolvimento sustentável e que podem ser substancialmente

afetados e trazem à discussão, em especial, as vulnerabilidades de cada setor e ações de adaptação necessárias.

DEFINIÇÕES

Para o fim dos estudos sobre mudanças climáticas que seguem este capítulo introdutório, adotam-se as seguintes definições para mudança climática, impactos, vulnerabilidade, adaptação, capacidade de adaptação, e mitigação, baseadas nas definições do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

Mudança climática: refere-se a qualquer mudança do clima que ocorra ao longo do tempo em decorrência da variabilidade natural ou da atividade humana. Esse uso difere da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em que “mudança do clima” se refere a uma mudança do clima que possa ser atribuída direta ou indiretamente à atividade humana e que altere a composição da atmosfera global, sendo adicional à variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis de tempo.

Impactos: referem-se aos efeitos das mudanças climáticas nos sistemas naturais e humanos. Dependendo do nível de adaptação, podem-se distinguir dois tipos de impactos:

Impacto potencial: todos os impactos que podem ocorrer devido às mudanças projetadas, sem considerar a adaptação.

Impacto residual: os impactos das mudanças climáticas que podem ocorrer após a adaptação.

Vulnerabilidade: é o grau de susceptibilidade ou incapacidade de um sistema para lidar com os efeitos adversos da mudança do clima, inclusive a variabilidade climática e os eventos extremos de tempo e clima. A vulnerabilidade é uma função do caráter, magnitude e ritmo da mudança climática e da variação a que um sistema está exposto, sua sensibilidade e sua capacidade de adaptação.

Adaptação: refere-se ao ajustamento de sistemas naturais ou humanos, em resposta às mudanças climáticas reais ou esperadas, ou seus efeitos, o

qual regula ou explora oportunidades benéficas. Alguns tipos de adaptação podem ser distinguidos:

Adaptação antecipatória: é a adaptação que ocorre antes que os impactos das mudanças climáticas sejam observados. Também referida como adaptação pró-ativa.

Adaptação autônoma: trata-se da adaptação que não se constitui numa resposta consciente aos estímulos climáticos, mas é desencadeada por mudanças ecológicas nos sistemas naturais e por mudanças no mercado e no bem-estar nos sistemas humanos. Também referida como adaptação espontânea.

Adaptação planejada: refere-se à adaptação que é resultado de decisões e políticas deliberadas, baseadas na consciência de que ocorreram mudanças ou que essas mudanças podem vir a ocorrer e a ação é necessária para que o estado desejado das coisas retorne ou se mantenha.

Capacidade de adaptação: é a capacidade de um sistema de se ajustar à mudança climática (inclusive à variabilidade climática e aos eventos extremos de tempo e clima), moderando possíveis danos, tirando vantagem das oportunidades ou lidando com as conseqüências.

Mitigação: refere-se a uma intervenção antropogênica para reduzir a própria forçante antropogênica no sistema climático. Incluem-se estratégias para redução das fontes de emissões de gases do efeito estufa e também para o aumento dos sumidouros desses mesmos gases.

EMISSIONES DO BRASIL E POTENCIAL DE MITIGAÇÃO

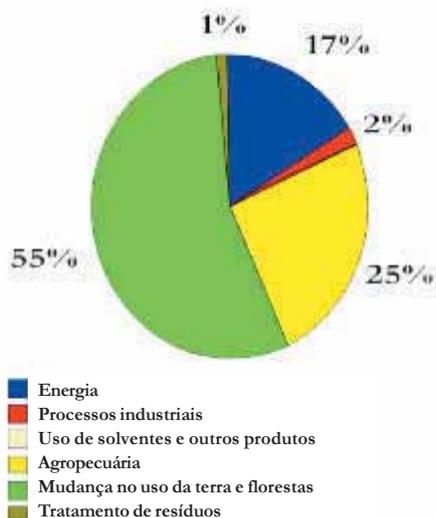
No quadro das emissões brasileiras de gases de efeito estufa (principalmente CO₂, CH₄ e N₂O), mostrado na Figura 1, 55% dessas são provenientes das alterações da vegetação, principalmente os desmatamentos na Amazônia e no Cerrado e 25%, da agricultura, principalmente metano emitido por ruminantes. Essa configuração diferencia enormemente o Brasil dos outros países desenvolvidos e mesmo de economias emergentes como China e Índia: enquanto nesses a queima de combustíveis fósseis é responsável por entre 60% e 80% das emissões, no Brasil, ao contrário, 80% das emissões são resultantes direta ou indiretamente da agricultura

(desmatamento para abrir novas áreas para a agricultura ou diretamente da agricultura) e apenas 17% são provenientes da queima de petróleo, carvão e gás natural.

Sem considerar as emissões provenientes das mudanças dos usos da terra, a emissão de CO_2 *per capita* do brasileiro estaria em torno de 0,5 tonelada de carbono por ano, bastante baixa em nível mundial, comparável àquelas da Índia, e bem abaixo daquelas dos países industrializados, tipicamente entre 2,7 e mais de 5 (EUA) toneladas de carbono por habitante por ano. Isto se deve à nossa matriz energética relativamente “limpa”. Porém, ao considerar que aproximadamente 75% das emissões brasileiras de gás carbônico – o principal gás de efeito estufa – provém dos desmatamentos, as emissões *per capita* ultrapassam 1,5 toneladas por ano, a mais alta emissão *per capita* de um país em desenvolvimento e acima da emissão *per capita* da China de aproximadamente 1,1 tonelada de carbono por ano, e que vem crescendo rapidamente nos últimos anos.

Figura 1. Percentual das emissões brasileiras de gases de efeito estufa (CO_2 equivalente) por setores a partir do Inventário de Emissões de 1994. Para fim desse cálculo, o potencial de aquecimento do CH_4 foi considerado 21 vezes maior do que o do CO_2

Emissões Brasileiras de CO_2 eq (1994)



Fontes: Ministérios da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente

Para mitigar as emissões no Brasil é necessário e urgente reduzir os desmatamentos. Afinal, a maior parte das emissões brasileiras de gases de efeito estufa resulta do desmatamento e da queima das florestas para dar lugar principalmente à pecuária. As atividades econômicas associadas à mudança dos usos da terra na Amazônia e nos Cerrados responsáveis pelas emissões – pecuária, soja, madeira, etc. – e praticadas na totalidade das áreas já alteradas nos biomas floresta tropical Amazônica e Cerrado, respondem por aproximadamente 1% do PIB brasileiro. Se computarmos as atividades econômicas diretamente vinculadas à expansão da fronteira agrícola num determinado ano, esta relação se reduz para uma insignificante fração do PIB, tornando a relação emissões por desmatamentos e queimadas/ PIB gerado nas áreas desmatadas muito desfavorável. Sob essa ótica, grande parte das emissões brasileiras está dissociada de real crescimento econômico, ao contrário de China e Índia, por exemplo, e similar ao padrão de emissões de outras nações tropicais como Indonésia.

As metas de redução global de emissões requerem a contribuição do Brasil ao esforço mundial de mitigação do aquecimento global, o que nos coloca de frente com a obrigatoriedade de reduzir as emissões dos desmatamentos. Para reduzir consideravelmente os desmatamentos da floresta Amazônica a valores próximos de zero, deve-se levar em conta, primeiro, que existe um grande estoque de áreas já desmatadas, degradadas ou abandonadas no Brasil. Estima-se em mais de 150 mil km² de áreas degradadas ou abandonadas somente na Amazônia. Essas áreas devem servir prioritariamente ao crescimento da cadeia de produção agropecuária, da agricultura familiar ao agronegócio, porém utilizando modernas técnicas agronômicas.

Outra vertente de grande potencial vem dos serviços ambientais dos ecossistemas amazônicos, especialmente da grande capacidade biológica de armazenamento de carbono na biomassa. O clima tropical também favorece o rápido crescimento das plantas, o que recomenda reflorestamentos em grande escala nas áreas desmatadas para retirar gás carbônico da atmosfera através da fotossíntese e contribuir para a mitigação das emissões. Projetos de reflorestamento constituindo-se em Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto, ainda que o país apresente o maior potencial mundial presente e futuro deste tipo de projeto de aumento dos sumidouros de gás carbônico, têm sido pouco utilizados.

Até o presente, a motivação ambiental não tem sido suficiente para mudança de comportamento com respeito à Amazônia. Porém, o valor dos serviços ambientais da floresta tropical em pé começa a receber grande atenção, pelo potencial valor econômico a eles associados através de novo mecanismo em análise no âmbito da Convenção Climática, mecanismo este conhecido como REDD (*Reduction of Emissions from Deforestation and Degradation*). Baseado nos levantamentos Inpe, a área total desmatada em 2004 foi de aproximadamente 27 mil km² na Amazônia brasileira. Entre 2005 e 2007 foi registrada uma redução do desmatamento da ordem de 60%. Com isso, 17 mil km² de floresta deixaram de ser derrubados, em relação à média histórica de 20.000 km² anuais de desmatamentos, o que equivale à emissão evitada de cerca de 220 milhões de toneladas de carbono para a atmosfera. Se o mercado mundial de carbono já valorasse a redução das emissões por desmatamento evitado, isso equivaleria a cerca de US\$ 2,2 bilhões de divisas, caso a base de remuneração fosse US\$ 10,00/tonelada de carbono.

Esse potencial deve definir o controle do desmatamento como a primeira estratégia do Brasil para mitigar emissões e o recém-criado Fundo Amazônia, o qual já recebeu aporte substancial da Noruega – US\$ 140 milhões iniciais, chegando até US\$ 1 bilhão até 2015 se o Brasil demonstrar reduções de desmatamentos continuados – já é uma demonstração do alcance desse caminho.

Outro importante fator de mitigação são os biocombustíveis e a bioenergia, porém deve-se evitar que a expansão da produção brasileira de biocombustíveis signifique um vetor a mais de desmatamento da floresta tropical. Para substituir cerca de 10% do consumo mundial de gasolina, mais de 25 milhões de hectares devem ser convertidos para cana de açúcar. Ainda que haja suficiente área de pastagens pouco produtivas para sustentar este potencial crescimento fora da Amazônia, se tal potencial for de fato realizado, pode pressionar a pecuária ainda mais para áreas de floresta, principalmente através do deslocamento de atividades pecuárias do Cerrado para a Amazônia.

Ainda que seja imperativo mitigar as emissões como a única solução aceitável moralmente no longo prazo, a inevitabilidade de que algum grau de mudança climática acontecerá de qualquer maneira faz com que igual ênfase deve ser dada tanto à redução acelerada das emissões globais nas

próximas décadas como à necessidade de adaptação às mudanças climáticas que já se tornaram inevitáveis. Poderá o Brasil atuar, com liderança, nestas duas frentes?

É POSSÍVEL ESCOLHER ENTRE MITIGAÇÃO E ADAPTAÇÃO?

Na melhor das hipóteses, mesmo que as emissões globais forem reduzidas em 80% até 2050, em relação a 1990; mesmo que o pico de emissões aconteça até, no máximo, 2015 e a partir daí comece a diminuir após; ainda assim, um grau de aquecimento global e de mudanças climáticas já se tornou inevitável e a temperatura subiria quase 2 °C até o final do século, conforme previsto pelo IPCC. A atitude lógica que nos cabe é a adaptação, associada às ações para mitigação, pelo menos para fazer frente ao que já se tornou inevitável.

Mitigar as mudanças climáticas é fundamental e cabe às atuais gerações a responsabilidade de transformar atitudes e comportamentos. Se isso não for alcançado num prazo de 30 a 40 anos, corremos o risco de assistir o cenário mais pessimista se concretizar, onde o aumento da temperatura pode passar de 4 graus até o final deste século. Adaptar é a alternativa para o risco que não se pode mais eliminar.

Se o conhecimento que temos hoje sobre o funcionamento do sistema climático global estivesse disponível para as gerações anteriores, de nossos pais ou avós, e uma reação tivesse ocorrido, talvez houvesse tempo de evitar a maior parte das mudanças climáticas. O ponto de reação para evitar o rápido crescimento das emissões teria sido o período do pós-guerra. Mas, ao contrário, um espírito de otimismo tomou conta do planeta após o final da Segunda Grande Guerra, a apropriação de energia cresceu exponencialmente para atender ao crescimento populacional sem precedentes e a reconstrução da Europa, do Japão e de várias outras regiões. Não se imaginava o que poderia acontecer como efeito colateral.

A diferença entre aquela geração e a atual está na posse do conhecimento. E por isso a responsabilidade maior de quem está construindo agora o planeta que será deixado para nossos descendentes. Se a trajetória não for alterada, a experiência humana relegará às gerações futuras um planeta num grau incomparavelmente maior de crise ambiental em relação às condições ambientais que recebemos de nossos pais.

O Brasil é responsável atualmente por 3% a 4% das emissões globais. A classe média brasileira tem um padrão de emissões que não difere muito da média de emissões dos habitantes dos países europeus. Como lá, o padrão de consumo daqui se exemplifica por conduzir um veículo de duas toneladas para transportar apenas uma pessoa – 96% da energia utilizada são para mover a estrutura e não o passageiro. Esse caminho é completamente insustentável se todos os habitantes do planeta buscarem esse padrão de consumo de energia e põe o futuro em risco.

Ainda assim, é a mesma classe média que tem maior capacidade de adaptação, de resistência e transformação. Ela pode buscar e incorporar as soluções à vida num mundo mais quente e com mudanças climáticas. O problema do Brasil está nos dois terços da população que não têm essa capacidade, aumentando a vulnerabilidade do país com relação à adaptação necessária.

Mas adaptar a quê? Em primeiro lugar, necessitamos de cenários climáticos confiáveis. Em nível global, os cenários climáticos futuros ainda apresentam considerável incerteza, principalmente nas projeções do ciclo hidrológico, nas particularidades do clima regional e na determinação de como os extremos climáticos poderão mudar. Isto dificulta se estudar os impactos e, portanto, identificar vulnerabilidades.

Para fornecer tais respostas, a ciência brasileira começa a dar os primeiros passos, ainda que com dificuldades. Um dos primeiros obstáculos a vencer é expandir enormemente a base de conhecimentos de como o clima está mudando no país: praticamente não há qualquer sítio observacional com estudos de longa duração de como sistemas físicos e biológicos estão respondendo às mudanças climáticas que já estão ocorrendo. Igualmente, são pouquíssimos os pontos com tais estudos no mundo em desenvolvimento. Além dos registros de que as temperaturas à superfície subiram cerca de 0,75°C no país nos últimos 50 anos e que as chuvas estão mais abundantes no Sul, pouco mais se sabe de como o clima está mudando no Brasil e quais podem já ser as conseqüências destas mudanças.

Ainda que o desafio de gerar novos conhecimentos sobre como o clima está mudando e sobre impactos e vulnerabilidades, os últimos dois anos foram especialmente frutíferos e promissores para quebra a inércia e iniciar o preenchimento destas lacunas. Por um lado, tornaram-se disponíveis no

país cenários climáticos regionais de alta resolução espacial até o final do século 21 (MARENGO et al., 2007 e AMBRIZZI et al., 2007), cenários estes que permitiram iniciar estudos de impactos em diversos setores: agricultura, energias renováveis, ecossistemas, saúde humana, bacias de drenagem, economia, mega-cidades, região semi-árida, além de outros estudos sobre impactos nas zonas costeiras e na biodiversidade dos principais biomas brasileiros. Os resultados iniciais desses estudos de impactos estão sumarizados nos capítulos que se seguem, mas, de modo geral, permitem antever que a sociedade, a economia e o ambiente apresentam claros indícios de serem vulneráveis em vários graus às mudanças climáticas, e a maioria dos impactos são negativos e requerem políticas de adaptação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crise financeira global que se abateu sobre o mundo no final de 2008 pode levar a uma recessão econômica de contornos incertos. Por um lado, ela pode significar uma redução do crescimento acelerado dos últimos anos e conseqüente diminuição na taxa de crescimento da emissão atmosférica de gases de efeito estufa, lembrando que o aumento médio das emissões de CO₂ de origem fóssil foi de 3,5% ao ano no período de 2000 a 2007, um crescimento completamente insustentável em vista da necessidade de estabilização das concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa. Por outro lado, a preocupação das nações com questões econômicas de curto-prazo pode diminuir o foco e atenção e mesmo a vontade política de se chegar a compromissos de reduções significativas das emissões, no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas para a Mudança do Clima, para o período pós-Quioto (pós-2012), compromissos estes que devem ser atingidos até a Conferência das Partes da Convenção, a ser realizada em dezembro de 2009, em Copenhague (Dinamarca).

Ainda que seja virtualmente impossível prever a evolução de complexos sistemas sociais, é possível imaginar que a humanidade encontre-se perante uma grande encruzilhada. Pode seguir o curso que embasou o modelo de desenvolvimento dos séculos 19 e 20 de energia fóssil barata, mas com externalidades ambientais crescentes – por exemplo, o aquecimento global – e cujos impactos tornaram-se inevitáveis ou pode escolher um caminho menos trilhado, mas talvez o único a levar a um porto seguro para a sustentabilidade da vida na Terra. Esse caminho exige, no que concerne à

redução do risco do aquecimento global, uma radical descarbonização dos sistemas de produção e consumo em escala mundial e um crescente uso de recursos naturais renováveis. Este caminho oferece desafios e oportunidades ao Brasil.

Em primeiro lugar, devemos focar a redução de emissões de todos os setores do país, mas especialmente visando frear a expansão da fronteira agrícola sobre a floresta tropical e sobre os cerrados como forma de reduzir a menos da metade as emissões brasileiras. Políticas públicas guiadas por conhecimento científico e tecnológico moderno em agronomia devem maximizar e intensificar o uso de áreas já alteradas destes dois biomas, aliadas a políticas de agregação de valor, via industrialização, aos produtos agrícolas ou florestais primários. Isso permitiria se ganhar tempo para o desenvolvimento de um novo paradigma econômico para a Amazônia, com base na floresta em pé e na exploração do potencial econômico e social da extraordinária biodiversidade dos ecossistemas tropicais. A ausência de outros modelos de desenvolvimento econômico e social baseado em recursos da biodiversidade e serviços dos ecossistemas em qualquer outro país tropical mega-diverso do mundo para serem copiados pelo Brasil dificulta a quebra do modelo atual. Não há outra saída do que a de inventar um novo modelo, baseado em C,T&I, expandido as atuais e criando novas unidades de pesquisa básica e aplicada e fixação maciça de pesquisadores e engenheiros nestas instituições.

Poderá o Brasil, no século 21, tornar-se uma “potência ambiental” ou, ainda, o primeiro país tropical desenvolvido? O desafio de uma geração é inventar um novo paradigma de desenvolvimento para o Brasil, baseado em C,T&I, reconhecendo que os usos racionais dos abundantes recursos naturais renováveis e da biodiversidade podem ser a grande alavanca para o desenvolvimento sustentável, no qual o país não somente tornar-se-ia uma das nações com o menor índice de emissões *per capita*, mas também um modelo de desenvolvimento para os países tropicais.

CARLOS A. NOBRE

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe)

Cenários de mudança climática para a América do Sul para o final do século 21

*Carlos A. Nobre
Gilvan Sampaio
Luis Salazar*

A melhor ferramenta para projetar cenários prováveis de alterações climáticas para o futuro são os modelos matemáticos do sistema climático global (MCG), que levam em conta de forma quantitativa (numérica) o comportamento dos compartimentos climáticos (atmosfera, oceanos, criosfera (áreas com gelo e neve), vegetação, ciclos biogeoquímicos, etc.) e de suas interações. Esses modelos permitem que se simulem prováveis cenários de evolução do clima para vários cenários de emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Porém, há duas grandes fontes de incertezas ao utilizar estes modelos. A primeira, é que não sabemos precisamente a trajetória futura das emissões dos GEE e de aerossóis atmosféricos, que depende de decisões humanas sobre o caminho socioeconômico-ambiental desejado e que venha a ser efetivamente implementado. A segunda fonte de incerteza advém do fato que os modelos matemáticos são representações imperfeitas da natureza e diferentes modelos climáticos diferem substancialmente em suas projeções para o clima do futuro, dado o mesmo cenário de evolução das concentrações de GEE e de aerossóis na atmosfera. A maneira de abordar essas duas incertezas é utilizar vários cenários de emissões de GEE e diferentes modelos climáticos.

As Figuras 1 a 4 mostram cenários climáticos para o período 2071-2100 para 15 diferentes modelos climáticos globais e dois cenários de emissões de GEE do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC (“World Climate Research Programme’s (WCRP’s) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multimodel dataset”): A2 é o cenário chamado de “pessimista”, isso é, a manutenção dos padrões de emissões de GEE observados nas últimas décadas; esse cenário implicaria em chegarmos a 2100 com concentrações atmosféricas de CO₂ de cerca de

850 partes por milhão em volume (ppmv); e, B1 é o cenário de menores emissões ou cenário “otimista”, tendendo à estabilização das emissões de GEE, e concentração, no final deste século, de cerca de 550 ppmv (NAKICENOVIC e SWART, 2000).

As análises desses cenários mostram maiores diferenças nas anomalias de precipitação e temperatura entre os diferentes modelos do que entre os diferentes cenários para o mesmo modelo. Como esperado, as maiores fontes de incertezas dos cenários de mudança climática regional estão associadas às projeções dos diferentes MCG. O aquecimento projetado para América do Sul varia de 1° a 4°C para o cenário B1 e de 2° a 6°C para o cenário A2. Em resumo, um clima substancialmente mais quente para qualquer dos cenários e modelos climáticos tomados. Essa análise é mais complicada para as mudanças na precipitação pluviométrica, uma vez que os diferentes modelos apresentam diferenças na magnitude e mesmo no sinal da anomalia. Em termos gerais para América do Sul, as regiões mais afetadas seriam a Amazônia e o Nordeste brasileiro, em processos relacionados principalmente com a intensidade e posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Entre esses processos destacam-se o provável enfraquecimento da célula de Hadley no Hemisfério Norte (ocasionando uma ZCIT mais ao norte, já que o gradiente de temperatura neste hemisfério diminuiria) e aumento da concentração de vapor de água atmosférico na região equatorial. Porém, a discordância é grande: enquanto alguns modelos apontam para anomalias positivas de precipitação sobre partes da Amazônia e Nordeste Brasileiro, outros apontam para anomalias negativas (GIORGI e FRANCISCO, 2000; OYAMA, 2003), muito embora o centro-leste da Amazônia e o norte do Nordeste sejam relativamente tidas como locais de grande previsibilidade climática (MOURA e HASTENRATH, 2004). O que entra em cena aqui são as diferentes formas em que cada modelo representa os processos físicos e hidrológicos globais e, regionalmente, culminando na limitada representação de sistemas convectivos de mesoescala (como complexos convectivos de mesoescala ou linhas de instabilidade). Tanto na Amazônia como no Nordeste brasileiro, esses sistemas convectivos de mesoescala, junto com a ZCIT, são de suma importância para os regimes de precipitação locais (SATYAMURTY et al., 1998). Portanto, o estado da ciência atual ainda não permite estabelecer cenários inequívocos de mudanças do regime hidrológico.

Figura 1. Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário B1) em relação ao período base de 1961-1990 para 15 diferentes modelos climáticos globais disponíveis através do IPCC

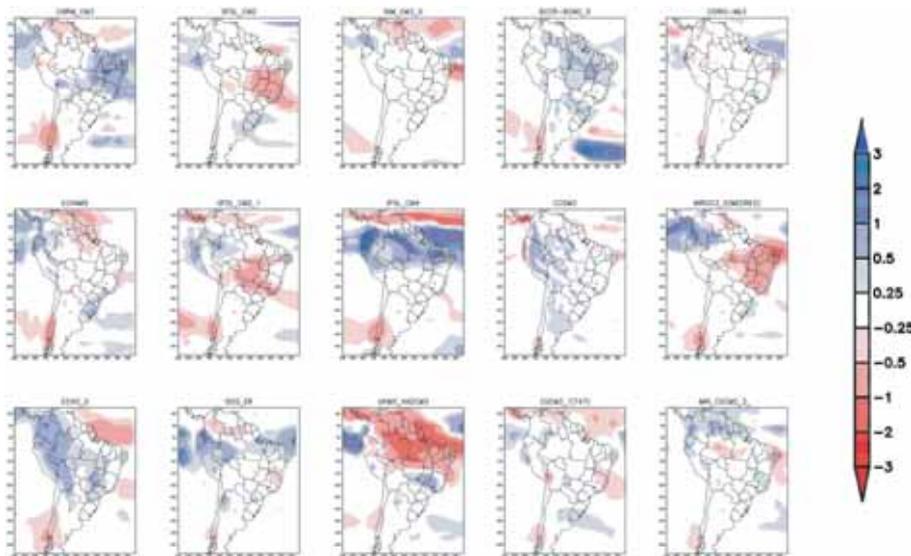


Figura 2. Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário B1) em relação ao período base de 1961-1990 para 15 diferentes modelos climáticos globais disponíveis através do IPCC

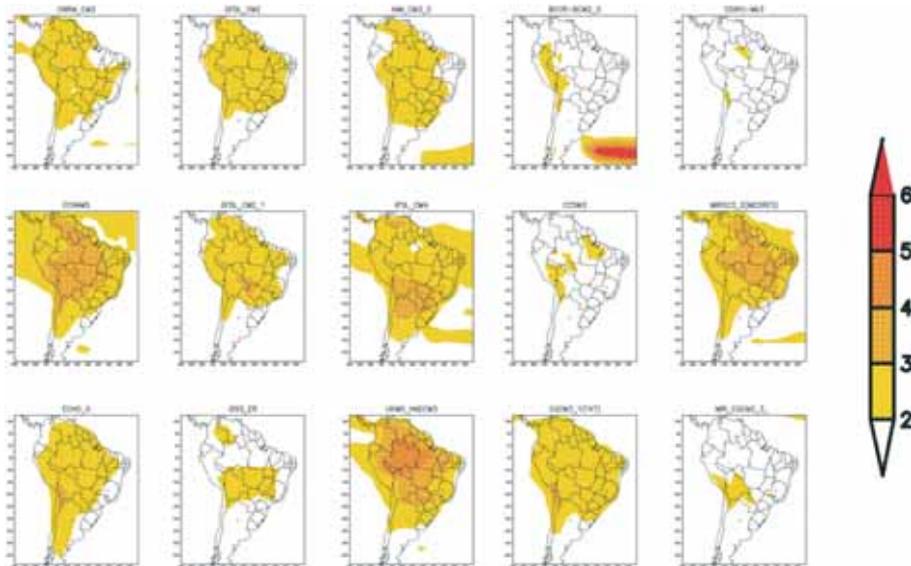


Figura 3. Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A2) em relação ao período base de 1961-1990 para 15 diferentes modelos climáticos globais disponíveis através do IPCC

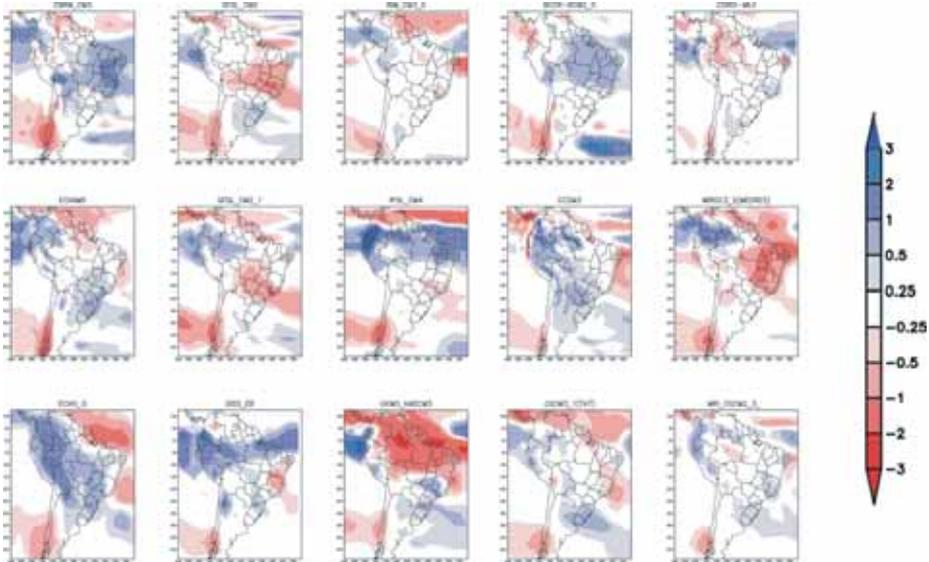
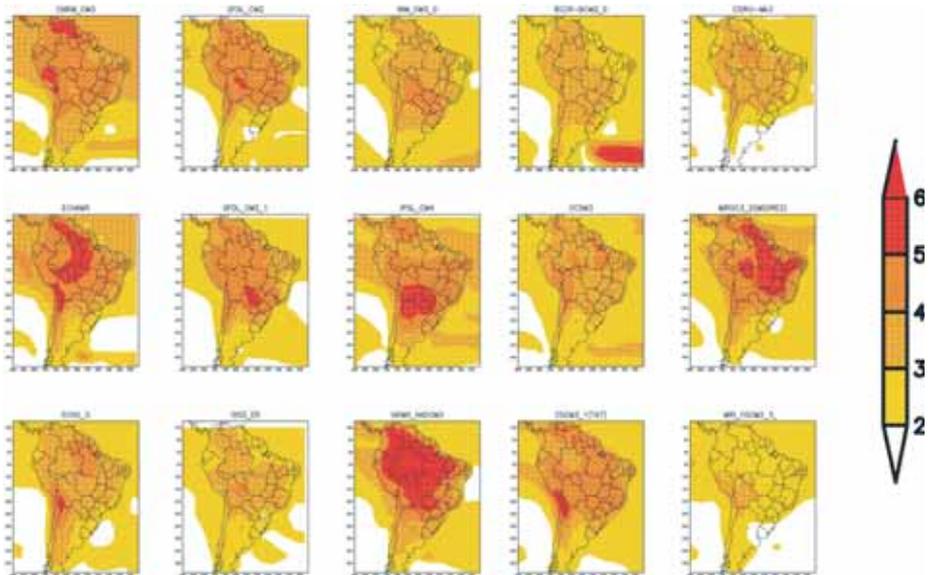
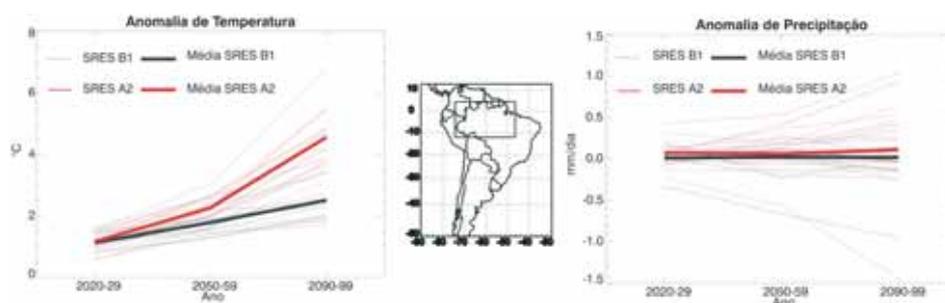


Figura 4. Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A2) em relação ao período base de 1961-1990 para 15 diferentes modelos climáticos globais disponíveis através do IPCC



A Figura 5 apresenta as anomalias de precipitação e temperatura para a Amazônia, projetadas por 15 diferentes modelos para os cenários A2 e B1. Como descrito nas análises anteriores, existe muita variabilidade nas anomalias de precipitação projetadas entre os diferentes modelos na magnitude e no sinal da anomalia até o final do século 21. A diferença entre as anomalias de precipitação para diferentes modelos sugere que ainda temos um grau de incerteza nos cenários de projeções do clima futuro, o que indica a necessidade de melhorar a representação dos processos físicos como nuvens, precipitação, aerossóis e interação da vegetação e clima. Espera-se que para o próximo relatório do IPCC os modelos climáticos globais utilizados também considerem a dinâmica da vegetação de modo que as mudanças na vegetação se refletem em mudanças no clima, e vice-versa. Na análise da temperatura para a Amazônia, todos os modelos concordam com o sinal da anomalia, com um aquecimento médio entre todos os modelos de 4°C (2°C) para o cenário A2 (B1) para o final deste século. A anomalia de temperatura aumenta com tempo no decorrer do século, sendo maior para o cenário mais “pessimista” (A2).

Figura 5. Anomalias de precipitação e temperatura para a região Amazônica (área destacada no mapa) de 15 modelos climáticos globais para os cenários de emissões A2 (linhas vermelhas) e B1 (linhas azuis). A linha grossa representa o valor médio de todos os modelos



É importante ressaltar que os modelos climáticos globais utilizados para fazer as projeções futuras descritas antes têm resolução espacial entre 200 e 400 km de latitude/longitude, ou seja, baixa resolução espacial. Todavia, existe uma técnica para traduzir a relativa baixa resolução espacial dos modelos climáticos globais para escalas mais refinadas por meio da regionalização (*downscaling*) das projeções desses modelos usando modelos

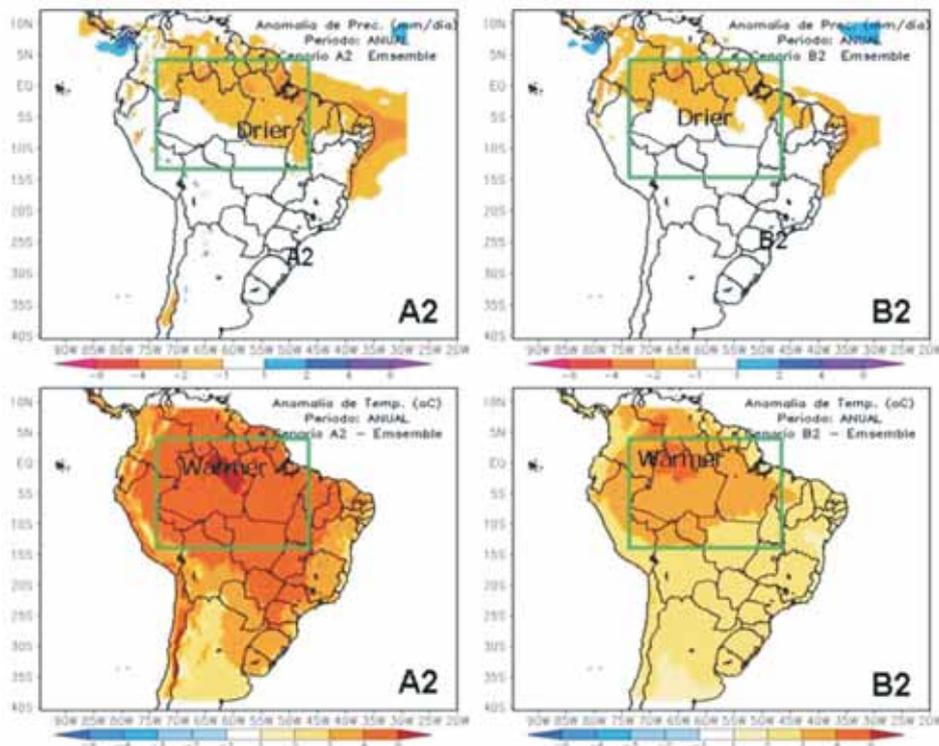
climáticos regionais de mais alta resolução sobre a área de interesse, e tendo como condições de fronteira dados provenientes de modelos climáticos globais (AMBRIZZI et al., 2007).

Com o objetivo de produzir cenários de mudança climática numa escala espacial mais alta (50 km) para América do Sul, o projeto “Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao Longo do Século 21”, (MARENGO et al., 2007, MARENGO and AMBRIZZI, 2006) utilizaram três modelos regionais (ETA/CPTEC-Inpe, RegCM3 e HadRM3P) para elaborar cenários de mudança climática. Esse exercício de regionalização utilizou os cenários globais provenientes do modelo climático global do Centro Hadley de Pesquisas Climáticas, do Reino Unido. Esses modelos regionais projetam um aumento médio de temperatura para a Amazônia de 2° a 4°C e diminuição de precipitação de 1mm/dia a 4 mm/dia, principalmente no leste da Amazônia, para o final deste século (Figura 6). Segundo Ambrizzi et al. (2007), as mudanças climáticas mais intensas para o final do século 21, relativo ao clima atual vão acontecer na região tropical, especificamente Amazônia e Nordeste do Brasil. Estas duas regiões constituem o que poderia ser chamado de *hot spots* de mudanças climáticas e representam as regiões mais vulneráveis do Brasil às mudanças climáticas, tanto na componente socioeconômica como em termos da biodiversidade.

As projeções derivadas desses modelos regionais (AMBRIZZI et al. 2007) podem apresentar um viés associado ao fato de que simulações do modelo climático global do Centro Hadley foram utilizadas como condição de contorno para as integrações com os modelos regionais, sendo que esse modelo climático global é aquele que projeta climas bastante secos e quentes para a Amazônia e Nordeste, em comparação com vários outros resultados dos demais modelos do IPCC.

O avanço do conhecimento científico sobre o funcionamento do complexo sistema climático levará, em pouco tempo, à diminuição das incertezas nas projeções das alterações das mudanças climáticas em escala regional. De qualquer maneira, uma das projeções importantes é a que diz respeito a maior ocorrência de extremos climáticos e de eventos intensos, como secas, veranicos, vendavais, tempestades severas, inundações, etc., num planeta mais aquecido. A ocorrência de eventos extremos e suas graves conseqüências associadas ocorridos no Brasil nos últimos anos, ilustram

Figura 6. Anomalias anuais de precipitação (painel superior, em mm/dia) e temperatura (painel inferior, em °C) (para América do Sul, período 2071-2100) em relação a 1961-90, para os cenários A2 de altas emissões e B2 de baixas emissões. As projeções representam a média aritmética dos cenários produzidos pelos modelos regionais Eta/CPTEC, RegCM3 e HadRM3P (50 km de resolução)



Fonte: Ambrizzi et al. (2007).

bem a necessidade de uma estratégia de adaptação para o país. Com a ampliação esperado no aumento da frequência dos eventos extremos, vários setores de atividades econômicas terão que se adaptar. Por exemplo, o setor de construções de barragens e grandes obras de engenharia, uma vez que o período de recorrência de enchentes poderá se modificar. Enxurradas mais frequentes afetam negativamente a atividade agrícola, inclusive com aceleração da perda de fertilidade dos solos.

A questão do possível aumento dos extremos climáticos automaticamente nos remete ao problema da vulnerabilidade das populações e dos ecossistemas a estas mudanças. A vulnerabilidade social aos efeitos

do clima pode ser definida como “conjunto de características de uma pessoa ou grupo que determina a sua capacidade de antecipar, sobreviver, resistir e recuperar-se dos impactos dos fatores climáticos de perigo” (BLAIKIE et al., 1994). O IPCC a define como “o grau de suscetibilidade de indivíduos ou sistemas ou de incapacidade de resposta aos efeitos adversos da mudança climática, incluindo-se a variabilidade climática e os eventos extremos” (McCARTHY et al., 2001). Uma boa medida da capacidade de adaptação a potenciais mudanças futuras no clima é verificar como populações enfrentam a variabilidade natural do clima atual e no passado histórico. Nesse ponto, já podemos distinguir uma profunda diferença na resposta à variabilidade e aos extremos climáticos entre nações desenvolvidas e em desenvolvimento. Como as periódicas secas do Nordeste, as enchentes e inundações, os deslizamentos em encostas em regiões metropolitanas e serranas não nos cansam de ensinar, a vulnerabilidade das populações do país a tais extremos é realmente muito alta. Decorre, assim, que devemos esperar que, mantidas as condições atuais de desenvolvimento, a vulnerabilidade do Brasil às mudanças climáticas prováveis será igualmente muito alta, podendo ser potencialmente um significativo óbice ao desenvolvimento sustentável do país no futuro. Com um clima mais quente, haverá mais vapor d’água na atmosfera e uma aceleração do ciclo hidrológico. Essa é uma das projeções de mudanças climáticas onde há bastante confiança. A aceleração do ciclo hidrológico implica em aumento da frequência de tempestades severas e intensas. Deslizamentos de terra em encostas, enchentes e inundações provocadas por tempestades severas são dois desastres naturais responsáveis por grande número de vítimas no país, principalmente nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro, Recife, Salvador e Belo Horizonte, e nas Serras do Mar e da Mantiqueira, inclusive com repercussões na saúde em termos de aumento da mortalidade-morbidade. Os sistemas de defesa civil e de saúde pública devem, portanto, levar em consideração que tais desastres tenderão a se tornar mais freqüentes no futuro, se o aquecimento do planeta prosseguir.

Eventos extremos, como a seca de 2005 no oeste e sudoeste da Amazônia, num cenário futuro de aumento de CO₂ e diminuição de aerossóis, podem se tornar mais freqüentes. É provável que um aumento na temperatura da superfície do mar no Atlântico norte tropical tenha sido a causa da seca de 2005 na Amazônia, já que havia a ausência de episódio El Niño e a região mais afetada foi o sudoeste da Amazônia, ao passo que secas

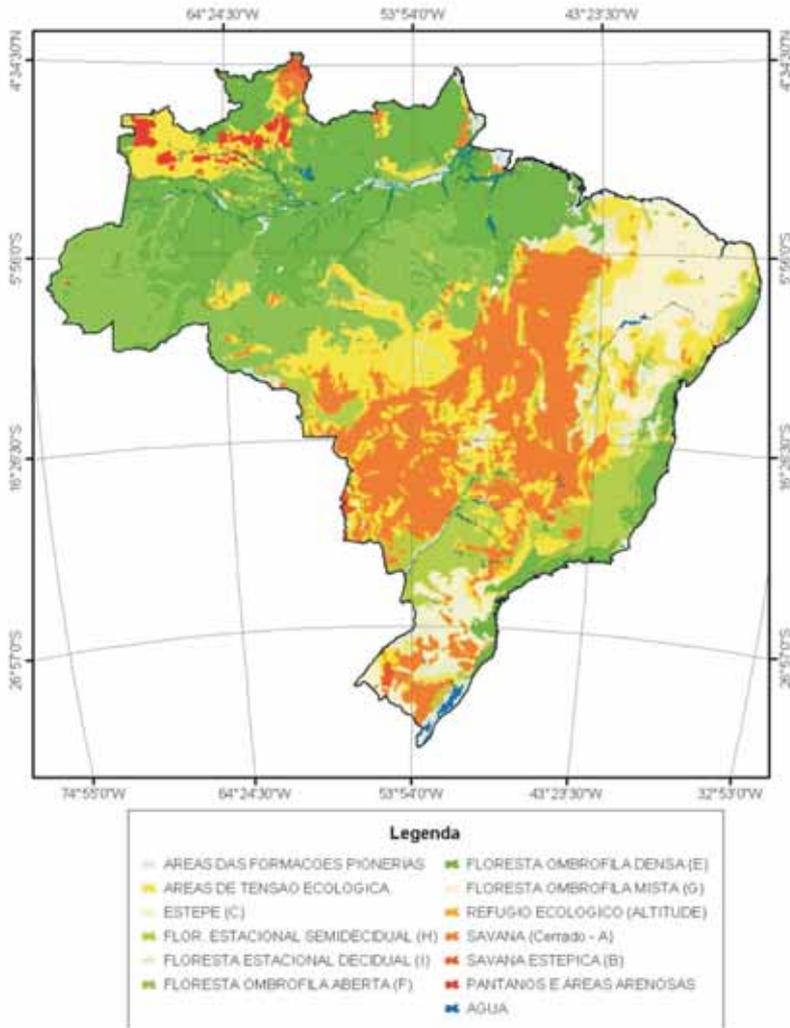
associadas a episódios El Niño fortes acontecem no norte e leste daquela região. Isso implicou numa diminuição da intensidade dos ventos alísios de nordeste e do transporte de umidade do Atlântico tropical em direção a Região Amazônica. Segundo Marengo et al. (2007), as causas da seca ocorrida na Amazônia em 2005 não estão relacionadas ao El Niño, mas a três possíveis fatores interconectados: 1) o Atlântico norte tropical anormalmente mais quente do que o normal; 2) a redução na intensidade do transporte de umidade pelos alísios de nordeste em direção ao sul da Amazônia durante o pico da estação de verão; e, 3) a diminuição do movimento vertical sobre esta parte da Amazônia, resultando num reduzido desenvolvimento convectivo e reduzida precipitação. Esses três fatores são dinamicamente consistentes na medida em que águas mais quentes no oceano Atlântico tropical norte induziriam movimentos ascendentes atmosféricos sobre essa região, com abaixamento da pressão atmosférica, e movimentos descendentes compensatórios sobre a região da seca no oeste-sudoeste da Amazônia, e conseqüente aumento da pressão atmosférica. Esse padrão de anomalias de pressão reduziria a intensidade dos ventos alísios transportando umidade do oceano para a Amazônia (NOBRE et al., 2007).

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS ECOSISTEMAS

Este capítulo trata da questão das possíveis alterações nos grandes biomas brasileiros (Figura 7) como resposta aos cenários de mudanças climáticas indicadas nas Figuras 1 a 5. A distribuição geográfica das comunidades da vegetação e sua relação para o clima têm sido examinadas com modelos biogeográficos ou modelos de biomas. Esses modelos usam como paradigma central o fato que o clima exerce controle dominante sobre a distribuição da vegetação. Os modelos biogeográficos podem simular a vegetação potencial (sem os efeitos dos usos da terra e do solo) baseando-se em alguns parâmetros climáticos, tais como a temperatura e a precipitação, entre outros. Devido à simplicidade destes modelos e a existência de regras empíricas globais entre a vegetação natural e o clima, esses modelos têm sido utilizados para a estimativa de impactos das mudanças climáticas na cobertura vegetal (KING e NEILSON, 1992; CLAUSSEN e ESCH, 1994, NOBRE et al., 2004, SALAZAR et al., 2007). Oyama e Nobre (2004) desenvolveram um modelo de vegetação potencial (CPTEC-PVM) que consegue representar a distribuição global dos diferentes biomas, e em escala regional, os biomas da América do Sul, onde outros modelos extensamente

utilizados como o Biome (PRENTICE et al., 1992) e o Biome3 (HAXELTINE e PRENTICE, 1996) têm algumas deficiências.

Figura 7. Principais biomas brasileiros



Fonte: MMA

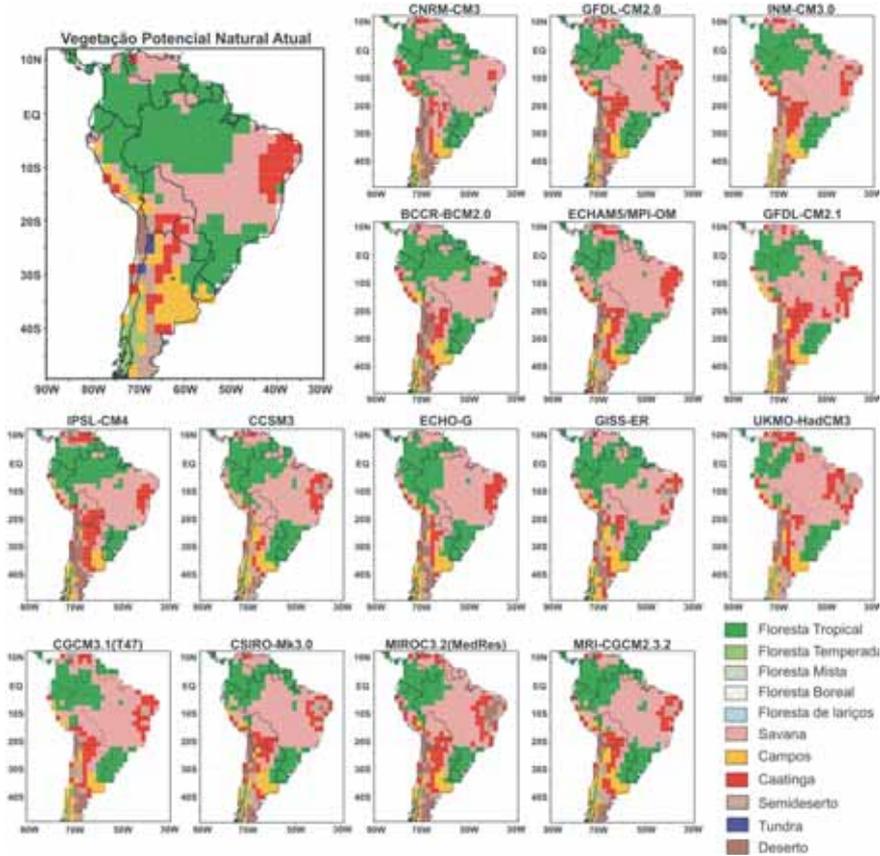
Preliminarmente, deve-se mencionar que ecossistemas naturais como um todo não têm capacidade intrínseca de migração ou adaptação à magnitude das projetadas mudanças climáticas na escala de tempo em que estão ocorrendo, isto é, décadas. Ecossistemas migram ou se adaptam

naturalmente a flutuações climáticas ocorrendo na escala de muitos séculos a milênios. Portanto, devemos esperar rearranjos significativos dos biomas, com sérias conseqüências para a manutenção da mega-diversidade biológica dos biomas brasileiros, com o resultado muito provável de sensível empobrecimento biológico.

Para avaliar quantitativamente as prováveis alterações e redistribuições dos biomas na América do Sul para o século 21, em resposta aos cenários de mudanças climáticas, Salazar et al. (2007) utilizaram o modelo de vegetação potencial CPTEC-PVM (OYAMA e NOBRE, 2004) para calcular biomas de equilíbrio com as saídas de quinze modelos climáticos globais preparados para o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – Quarto relatório de Avaliação (IPCC/AR4), apresentadas nas Figuras 1 a 5. Foram analisados os cenários climáticos A2 e B1 que representam cenários de alta e baixa emissão de CO₂, respectivamente. A resolução horizontal dos modelos varia entre 1.5 a 4°C, o que indica que esta análise foi feita na grande escala.

A Figura 8 apresenta a vegetação potencial atual e a redistribuição de biomas projetados com o modelo de vegetação potencial CPTEC-PVM para América do Sul para o cenário A2 e o período 2090-2099, dos quinze modelos analisados. Para a América do Sul Tropical, tomando-se uma média dessas projeções, constata-se a projeção do aumento da área de savanas (com o cerrado invadindo o Pará) e um substituição de área de caatinga por semi-deserto no núcleo mais árido do Nordeste do Brasil (NOBRE et al., 2004). Em particular, o modelo HADCM3 é o que coloca o cenário mais extremo para a Amazônia, chegando a se especular de um possível quase completo desaparecimento da floresta Amazônia (COX et al., 2000). Em termos simples, o aumento de temperatura induz a uma 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 tropicais substituindo florestas tropicais, caatinga substituindo savanas tropicais, semi-deserto substituindo caatinga).

Figura 8. Distribuição projetada dos biomas naturais na América do Sul para o período 2090-2099 dos 15 MCG para o cenário A2. O painel superior à esquerda representa os biomas potenciais em equilíbrio com o clima atual (representa os biomas potenciais, mais não a distribuição atual da vegetação, que é resultado das mudanças na cobertura vegetal e nos usos do solo)

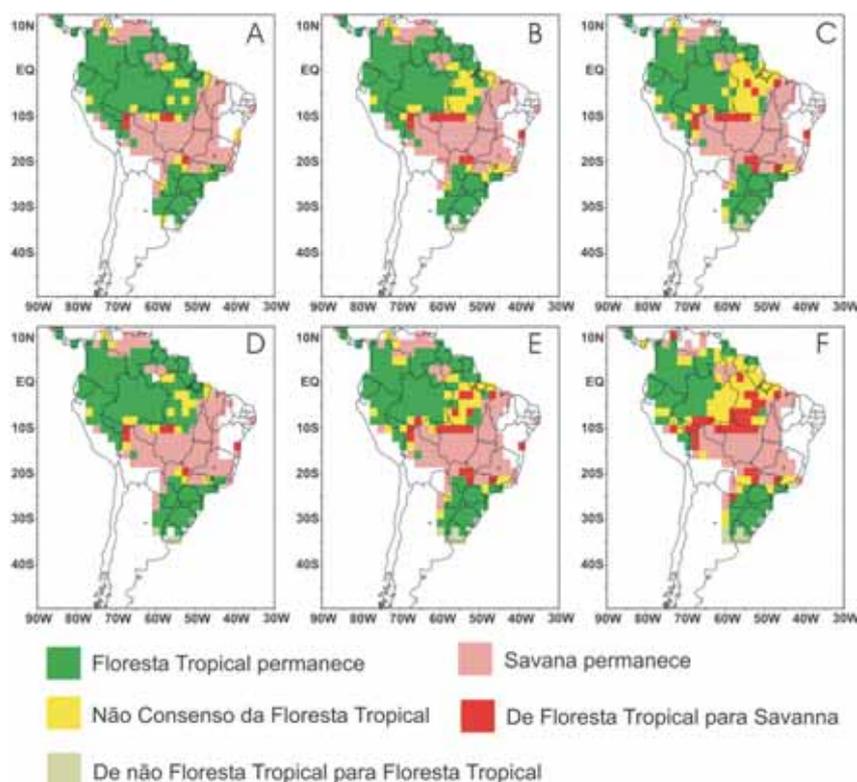


Fonte: Salazar et al., 2007

A Figura 9 apresenta os pontos de grade onde mais de 75% dos 15 modelos (> 11 modelos) coincidem na condição futura (onde um determinado bioma permanece, desaparece, aparece ou não existe consenso entre os modelos da sua condição futura) da floresta tropical e da savana para os dois cenários analisados em três períodos de tempo no século 21. Para a América do Sul tropical, os resultados indicam que para os cenários analisados, os modelos apresentam regiões de consenso de redução da floresta tropical que é substituída por savana tropical. Essa redução da floresta

tropical aumenta com o tempo através do século 21. Para o bioma catinga, no nordeste do Brasil, não existe consenso da sua condição futura, especialmente para o período 2090-2099. Esse “não-consenso” está relacionado com as diferenças nas projeções de precipitação e temperatura entre os modelos para esta região. Para o período 2090-2099 nos dois cenários, a floresta tropical na Colômbia e no Oeste da Amazônia é mantida, e a mata Atlântica estende-se para o sul, no sul do Brasil (Figuras 9c e 9f).

Figura 9. Pontos de grade onde mais de 75% dos modelos (> 11 modelos) coincidem na projeção da condição futura da floresta tropical e da savana, em relação à vegetação potencial atual, resultando nas seguintes possibilidades: a floresta tropical permanece; a savana permanece; mudança da floresta tropical para savana; mudança da floresta tropical para não-floresta tropical. A figura também apresenta os pontos de grade onde não existe consenso entre os diferentes modelos para os períodos (a) 2020-2029, (b) 2050-2059 and (c) 2090-2099 para o cenário B1 e (d), (e) e (f) para o cenário A2



Fonte: Salazar et al., 2007

Em termos gerais, é possível que exista uma redução de áreas cobertas por floresta tropical (18% [8%] desaparecem, com 30% [23%] de não-consenso para o cenário A2 [B1] e o período de tempo de 2090-2099) e um correspondente aumento de áreas cobertas com savana. Outras projeções de mudanças na vegetação mostram redução das áreas de floresta na América do Sul (por exemplo, SCHOLZE et al., 2006, COOK e VIZY, 2007) ou um *die-back* da floresta (por exemplo, JONES et al., 2003; COX et al., 2000; 2004). Considerando que a escala natural de migração dos ecossistemas de séculos a milênios e muito maior que a escala de tempo da ocorrência de mudanças climáticas (décadas), essas têm o potencial de influir profundamente na diversidade ecológica de plantas e animais.

Outros experimentos com uma versão atualizada do CPTEC-PVM que inclui o ciclo de carbono e o bioma de floresta tropical sazonal foram feitas por Lapola (2007). Os resultados indicaram que no sudeste da Amazônia não existe consenso entre os modelos, em relação à substituição da floresta por savana. Esse resultado mostra o efeito de fertilização do CO₂ o que favoreceria a manutenção ou mudança para biomas de maior porte nas áreas onde a temperatura aumenta, portanto, a diminuição da precipitação precisa ser maior para substituição de floresta para savana. Isso mostra que a resposta da floresta tropical para valores elevados de CO₂ é uma questão crítica que precisa ser estudada mais profundamente.

Às mudanças climáticas por origem do aquecimento global, há que se adicionar aquelas devido às alterações da cobertura da vegetação. Há projeções que os desmatamentos da floresta tropical amazônica levarão a um clima mais quente e seco na região (NOBRE et al., 1991, SAMPAIO et al., 2007, COSTA et al., 2007). As várias simulações dos efeitos climáticos da substituição da floresta por pastagens na Amazônia produzidas por tais estudos e as observações dos projetos Abracos (GASH et al., 1996; GASH e NOBRE, 1997) e LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia; <www.cptec.inpe/lba>) indicam que há um aumento da temperatura entre 0,3°C e 3°C, redução da evapotranspiração entre 15% e 30% e redução da precipitação entre 5% e 20% devido à mudança de vegetação de floresta para pastagem. Esse aumento de temperatura é maior do que aquele projetado pelo cenário B1, mas bem inferior àquele previsto pelo cenário A2 para o final do século 21. Provavelmente os efeitos de aumento de temperatura induzidos pelas mudanças globais e aqueles advindos dos desmatamentos se somariam

sinergicamente, aumentando o risco de incêndios florestais porque o secamento da vegetação na estação seca e sua flamabilidade são maiores com temperaturas mais altas (NEPSTAD et al., 1999), aumentando a vulnerabilidade dos ecossistemas tropicais.

Em Scholze et al. (2006), o risco de perda da floresta em algumas partes da Amazônia é de mais de 40% para os cenários que apresentam uma anomalia de temperatura maior que 3°C. Por outro lado, se houver tendência ao aumento das precipitações, estes atuam para contrabalançar a redução das chuvas devido ao desmatamento e o resultado final seria mais favorável à manutenção dos ecossistemas e espécies.

Adicionalmente, alguns estudos têm mostrado que o estômato da planta abre menos com altas concentrações de CO₂ (FIELD et al., 1995), o que reduz diretamente o fluxo de umidade da superfície para a atmosfera (SELLERS et al., 1996). Isso pode aumentar a temperatura do ar próximo da superfície pelo aumento da razão entre o fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. Numa região como a Amazônia, onde muito da umidade para a precipitação advém da evaporação da superfície, a redução da abertura estomatal pode também contribuir para um decréscimo na precipitação (BETTS et al., 2004).

Se grandes áreas da Amazônia forem substituídas por savana, o grau relativo de aridez poderá aumentar já que a vegetação adaptada ao fogo tem uma menor transpiração. Em Scholze et al. (2006) conclui-se que é provável uma maior frequência de fogo (risco > 60% para temperatura > 3°C) em muitas zonas da América do Sul. Em Hutyrá et al. (2005) é mostrado que as florestas presentes em áreas com alta frequência de secas (> 45% de probabilidade de seca) podem mudar para savana, se a aridez aumentar como previsto pelos cenários de mudança climática (COX et al., 2004; FRIEDLINGSTEIN et al., 2003). Portanto, cerca de 600.000 km² de floresta estarão em potencial risco de desaparecer (> 11% da área total vegetada). O aumento da aridez, portanto, pode levar à divisão da Amazônia (HUTYRA et al., 2005), com uma cunha de savanas tropicais penetrando desde a região de Cerrados do Brasil Central através do leste da região, separando o contínuo de florestas desde a costa Atlântica até os Andes.

Quando a floresta é sujeita a períodos anormalmente secos, aumenta a probabilidade de ocorrência de queimadas e incêndios florestais que podem

destruir centenas de milhares de hectares de floresta e injetar na atmosfera grandes quantidades de fumaça e aerossóis que poluem o ar em extensas áreas, afetando a população e com potencial de atrasar o início da estação chuvosa e a quantidade de chuva na região (ANDREAE et al. 2004). Considerando os cenários de mudança climática do modelo do HadCM3 para o IPCC/AR4, a duração da estação seca poderia aumentar em até dois meses ou mais na maior parte da Amazônia, o que levaria ao aumento da estação seca dos atuais 3-4 meses para 5-6 meses na Amazônia central e oriental. Esse aumento da estação seca implicaria num aumento do risco da ocorrência de queimadas e mudança na climatologia da chuva o que favoreceria a substituição da floresta por savana (LI et al., 2006). Esses impactos ecológicos afetam a possibilidade de manejo sustentável da floresta na região, o que é uma premissa básica para a economia regional (BROWN et al., 2006). Tomando em seu conjunto, as evidências desses estudos auxiliam a dar consistência aos resultados apresentados na Figura 9 de cálculos de redistribuição de biomas na América do Sul tropical, principalmente com respeito à hipótese de “savanização” de partes da Amazônia.

A floresta Amazônica contém uma grande parte da biodiversidade do mundo, pois mais de 12% de todas as plantas com flores são encontradas na Amazônia (GENTRY, 1982). Sendo assim, ameaças à existência da floresta amazônica indicam sérias ameaças à biodiversidade. Entretanto, existem poucos estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas na distribuição de espécies. Em nível global, Thomas et al. (2004) avaliaram o risco de extinção de espécies para áreas que cobrem cerca de 20% da superfície terrestre, e encontraram que entre 15% e 37% das espécies estariam comprometidas com risco de extinção até o ano de 2050. Esse trabalho foi feito considerando três cenários de mudança climática: 1) mínima (aumento da temperatura de 0.8-1.7°C e aumento de CO₂ de 500 ppmv), 2) média (aumento de temperatura de 1.8-2.0°C e aumento de CO₂ de 500-550 ppmv), e 3) máxima (aumento de temperatura de mais de 2°C e aumento de CO₂ de mais de 550 ppmv).

Em nível regional, as simulações de Miles et al. (2004), baseadas nos cenários futuros do HADCM2Gsa1 (que assume um aumento anual de 1% na concentração de CO₂), analisaram o que poderia acontecer com a distribuição de 69 espécies de *angiospermas* na Amazônia entre 1990 e 2095. Chegaram à conclusão que 43% das espécies poderiam tornar-se inviáveis

até 2095, com máximo impacto no nordeste da Amazônia e melhores condições para preservação de espécies da planície amazônica nos extremos ocidental da Amazônia, e recomendaram a extensão de áreas protegidas para o oeste da região como forma de manter grande resiliência da biodiversidade Amazônica às mudanças climáticas.

Essencialmente, essa é a mesma conclusão que se segue aos resultados com modelos de biomas mencionados acima. Para que as espécies afetadas possam atingir novas zonas bioclimáticas, a dispersão e migração deverão ser feitas em centenas de quilômetros (HARE, 2003). Muitos desses experimentos de modelagem não têm considerado as influências não-climáticas como as mudanças do uso do solo, o desmatamento, a disponibilidade de água, as pestes e doenças, queimadas e incêndios florestais, e todas as outras que possam limitar a migração e dispersão de espécies (CASE, 2006). No trabalho de Sala et al. (2000), eles estudaram a mudança na biodiversidade para o ano 2100, considerando alguns destes aspectos e identificaram que para os biomas tropicais os principais agentes que afetam a biodiversidade são mudanças nos usos da terra e as mudanças climáticas.

Um raciocínio análogo pode ser feito sobre impactos das projeções das mudanças climáticas nos agro-ecossistemas. De modo geral, com algumas exceções, há tendência de menor disponibilidade hídrica em partes da Amazônia, Nordeste e Centro-Oeste, que poderiam afetar negativamente a agricultura principalmente no Nordeste e Centro-Oeste. No Sul e Sudeste, essas projeções indicam modificações bem menores no regime hidrológico. Entretanto, para projeções de impactos no setor agrícola e, conseqüentemente, para avaliação das vulnerabilidades deve-se considerar os efeitos da temperatura e da concentração do dióxido de carbono, o chamado efeito de “fertilização” de CO₂, sendo que geralmente um aumento pronunciado da temperatura média é prejudicial às culturas se colocá-la fora de sua faixa ótima e, ao contrário, o aumento da concentração de CO₂ resulta normalmente em maior produtividade para as culturas.

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS AGROSSISTEMAS

Um pequeno número de estudos tratou da questão dos impactos das mudanças climáticas na agricultura brasileira. Alguns dos estudos utilizaram cenários futuros de mudanças climáticas a partir de modelos climáticos globais

e buscaram calcular efeitos negativos e positivos sobre a produtividade das culturas de trigo, milho e soja (SIQUEIRA et al., 1994; SIQUEIRA et al., 2001; TRAVASSO et al., 2004) ou sobre o impacto das mudanças climáticas na incidência de pragas na cultura de trigo no sul do Brasil (FERNANDES et al., 2004). Por outro lado, alguns estudos analisaram o risco agroclimático da cultura de café a extremos climáticos (MARENGO, 2001; PINTO et al., 2002; ASSAD et al., 2004). Para o Estado de São Paulo, por exemplo, Pinto et al. (2002) calcularam que, com um aumento de 3 °C na temperatura média e 15% nas chuvas, somente 15% da área do Estado seriam propícias à cultura do café arábica e para um aumento de 5,8 °C, somente 1,1%, mesmo se considerando que não haveria mais risco provocado por geadas nesses cenários. Para o clima atual, 40% do Estado são indicados para essa cultura.

De modo geral, os vários estudos sobre impactos na produtividade agrícola das culturas de milho, trigo e soja não permitem conclusões seguras no sentido que o efeito do aumento das temperaturas contribui à redução da produtividade, inclusive devido à maior incidência de pragas, mas que pode ser compensada, até certo ponto, pelo aumento da concentração de dióxido de carbono. Especificamente para a cultura do café no Sul-Sudeste do país, os estudos indicam geralmente que o risco agroclimático desta cultura poderia aumentar consideravelmente devido a temperaturas mais altas, mesmo se considerando menor frequência de geadas. Nota-se que todos os estudos utilizaram modelos matemáticos para estimar os impactos na agricultura, porém falta maior validação dos resultados com experimentação de campo.

REFERÊNCIAS

AMBRIZZI, T. et al. *Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais: relatório 3*. Brasília: MMA, 2007.

ANDREAE, M. O. et al. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, n. 303, p. 1337-1342, 2004.

ASSAD, D. A. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 11, p.1057-1064, 2004.

BETTS, R. A. The role of ecosystematmosphere interactions in simulated Amazon forest dieback under global climate warming. *Theoretical and Applied Climatology*, n. 78, p.157-175, 2004.

BLAIKIE, P. et al. *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. New York: Outledge, 1994.

BROWN, I. F. Fires in rain forests of southwestern Amazonia: Multi-national satellite imagery for monitoring and for informing the public. *EOS Transactions*, v. 87, n. 26, p. 253-264, 2006.

CASE, M. Climate change impacts in the Amazon: review of scientific literature (World Wildlife Fund – WWF). In: CONFERENCE OF THE PARTIES TO THE CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY, 8., 2006, Curitiba. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2006.

CLAUSSEN, M.; ESCH, M. Biomes computed from simulated climatologies. *Climate Dynamics*, n. 9, p. 235-243, 1994.

COOK, K. H.; VIZY, E. K. *Effects of 21st century climate change on the amazon rainforest*. [S.l.: s.n.], 2007. No prelo.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, n. 13, p.18–34, 2000.

_____ et al. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007. Doi: 10.1029/2007GL029271.

COX, P. M. et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, n. 408, 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. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, v. 7, n. 4, p. 357-373, 2001.

FERNANDES, J. M. et al. Expected impacts of climate change on the incidence of crop disease in the Pampas region of Argentina, Brazil and Uruguay: modeling fusarium head blight in wheat under climate change using linked process-based model. In: AIACC REGIONAL WORKSHOP FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN, 2., 2004, Buenos Aires, Argentina. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2004. (AIACC Project, n. LA27).

FIELD, C. B.; JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A. Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale. *Plant, Cell and Environment*, v. 18, n. 10, p. 1214-1225, 1995.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle. *Tellus*, n. 55, p. 692– 700, 2003.

_____. Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of Climate*, v. 19, n. 14, p. 3337-3353, 2006.

GASH, J. H. C. et al. *Amazonian deforestation and climate*. Chichester: Wiley, 1996.

_____; NOBRE, C. A. Climatic effects of amazonian deforestation: some results from ABRACOS. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 5, p. 823-830, 1997.

GENTRY, A. H. Neotropical floristic diversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, n. 69, p. 557–593, 1982.

GIORGI, F.; FRANCISCO, R. Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate. *Geophysical Research Letters*, v. 27, n. 9, p. 1295-1298, 2000.

HARE, W. *Assessment of knowledge on impacts of climate change contribution to the specification of art. 2 of the UNFCCC*. Berlin: WBGU Potsdam, 2003.

HAXELTINE, A.; PRENTICE, I. C. BIOME3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, n. 4, p.693-709, 1996.

HUTYRA, L. R. et al. Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia. *Geophysical Research Letters*, n. 32, 2005. Doi: 10.1029/2005GL024981.2005.

JONES, C. D. et al. Strong carbon cycle feedbacks in a climate model with interactive CO₂ and sulphate aerosols. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 9, p. 1479, 2003.

KING, G. A.; NEILSON, R. P. The transient response of vegetation to climate change: a potential source of CO₂ to the atmosphere. *Water, Air and Soil Pollution*, n. 64, p. 365-383, 1992.

LAPOLA, D. *Consequências das mudanças climáticas globais nos biomas da América do sul: um modelo de vegetação potencial incluindo ciclo de carbono*. 2007. Tese (Mestrado em Meteorologia)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.

MARENGO, J. A. Impactos das condições climáticas e da variabilidade e mudanças do clima sobre a produção e os preços agrícolas: ondas de frio e seu impacto sobre a cafeicultura nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. In: LIMA, M. A. de;

CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. (Ed.). *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 97-123.

_____. *Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade-caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI: CREAS (Cenários Regionalizados de Clima para América do Sul)*. [S.l.: s.n.], 2004. Encontro dos coordenadores dos subprojetos apoiados pelo PROBIO, Brasília, DF, 27 a 29 de Outubro, 2004.

_____; AMBRIZZI, T. Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scales. In: ICSHMO, 8., 2006, Foz do Iguaçu. *Proceedings...* São Paulo: INPE, 2006. p. 291–296.

_____ et al. The drought of amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 2007.

MCCARTHY, J. J. (Ed.). *Climate change 2001: impacts, adaptation & vulnerability*. United Kingdom: Cambridge University Press, 1000 p. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

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

MOURA, A. D.; HASTENRATH, S. Climate prediction for Brazil's Nordeste: performance of empirical and numerical modeling methods. *Journal of Climate*, v. 17, n. 13, p. 2667-2672, 2004.

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. (Ed.). *Emissions scenarios 2000: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom: Cambridge University, 2000. 570 p.

LI, W.; FU, R.; DICKINSON, E. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. *Journal of Geophysical Research*, n. 111, 2006.

NEPSTAD, D. C. et al. Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, v. 398, n. 6727, p. 505-508, 1999.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climatology*, n. 4, p. 957-988, 1991.

_____; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. F. Mudanças climáticas e amazônia. *Ciência e Cultura*, v. 59, p. 22-27, 2007.

_____. Impacts of climate change scenarios for 2091-2100 on the biomes of South America. In: CLIVAR INTERNATIONAL CONFERENCE, 2004, Baltimore. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2004.

NOWAK, R. S.; ELLSWORTH, D. S.; SMITH, S. D. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂—Do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions?. *New Phytologist*, v. 162, n. 2, p. 253–280, 2004.

OYAMA, M. D. *Consequências climáticas da mudança de vegetação do Nordeste brasileiro: um estudo de modelagem*. 2003. Tese (Doutorado)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.

PINTO, H. S. et al. Variabilidade climática. In: ÁGUA, Agricultura e meio ambiente: avanços e desafios. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. V. 1, p. 1-13.

PRENTICE, L. C. et al. A global bio'me model based on plant physiology and dominance, soil properties, and climate. *Journal of Biogeography*, n. 19, p. 117-134, 1992.

SALA, O. E. Biodiversity-global biodiversity scenarios for the year (2100). *Science*, n. 28, p. 1770–1774, 2000.

SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007. Doi: 10.1029/2007GL029695.

SAMPAIO, G. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007. Doi: 17710.11029/12007GL030612.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; Dias, P. L. S. South America. *Meteorological Monographs*, v. 27, n. 49, p. 119-139, 1998. Southern Hemisphere Meteorology, cap. 3C.

SCHOLZE, M. et al. A climate-change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n. 103, p.13116-13120, 2006.

SELLERS, P. J. et al. Comparison of radiative physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, v. 271, n. 5254, p. 1402-1406, 1996a.

SIQUEIRA, O. J. et al. Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture and adaptive strategies for wheat, maize and soybean. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, n. 2, p. 115-129, 1994.

_____. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A. de; CABRAL, O. M.

R.; MIGUEZ, J. D. G. (Ed.). *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 65-96.

THOMAS, C. D. et.al. Extinction risk from climate change. *Nature*, v. 427, n. 6970. p. 145-148, 2004.

TRAVASSO, M. et al. Expected impacts of climate change on crop yields in the Pampas region of Argentina, Brazil and Uruguay. In: AIACC REGIONAL WORKSHOP FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN, 2., 2004, Buenos Aires, Argentina. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2004. (AIACC Project, n. LA27).

Resumo

Este artigo apresenta as projeções de anomalias de precipitação e temperatura para a América do Sul, e analisa os seus possíveis impactos sobre os ecossistemas e agrossistemas brasileiros, a partir de diferentes modelos climáticos globais do IPCC e modelos regionais. Os modelos regionais indicam que as mudanças climáticas mais intensas para o final do século 21 vão acontecer na região tropical, especificamente Amazônia e Nordeste do Brasil. Porém, apesar do avanço do conhecimento científico sobre o funcionamento do complexo sistema climático, ainda há um grau de incerteza nos cenários do clima futuro, o que indica a necessidade de melhorar a representação dos processos físicos como nuvens, precipitação, aerossóis e interação da vegetação e clima.

Palavras-chave

Mudanças climáticas. América do Sul. Gases de efeito estufa.

Abstract

This article presents the projections of precipitation and temperature anomalies for South America and examines its possible impacts on Brazilian ecosystems and agrosystems, using the different IPCC global climate models and regional models. Regional models point out that more extreme climate change at the end of the 21 century will occur in the tropical region, particularly the Amazon and Northeast of Brazil. However, although the progress in scientific knowledge, there still exist some degree of uncertainty over future climate scenarios, which shows the need to improve the representation of physical processes, such as precipitation, aerosols and vegetation-climate interaction.

Keywords

Climatic changes. South America. Greenhouse gas emissions.

Os autores

CARLOS A. NOBRE é engenheiro eletrônico pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), doutor em meteorologia pelo Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT/USA), e pós-doutor pela Universidade de Maryland (EUA). É pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Foi um dos arquitetos do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia (LBA) e diretor do CPTEC-Inpe.

GILVAN SAMPAIO DE OLIVEIRA é mestre e doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente faz parte do Grupo de Interação Biosfera-Atmosfera da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/Inpe).

LUIS FERNANDO SALAZAR é engenheiro civil e mestre em Engenharia – Recursos Hídricos (Universidade Nacional da Colômbia). Atualmente faz doutorado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).

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 biomas¹, particularmente na Amazônia e no Cerrado. A floresta primária na Amazônia Legal abrange uma área de aproximadamente 3.5 milhões de km² (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 estrito² enquanto o Cerrado (parque de cerrado, cerrado *stricto sensu*, campo cerrado, entre outros) ocupa cerca de 2 milhões de km², 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 original³. 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. Cinqüenta

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

² 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>

³ 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 clima⁴. 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

⁴ 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*)⁵ baseados em cenários⁶ 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 ppm⁷ (CRAMER et al., 2004). A incerteza sobre a magnitude dos impactos promovidos pelo aumento da concentração de CO₂, pelas mudanças na temperatura e precipitação, e pelo desmatamento futuro, na concentração atmosférica de CO₂, aponta para a necessidade de se ter melhores estimativas das taxas de desmatamento atual e futura, em nível global.

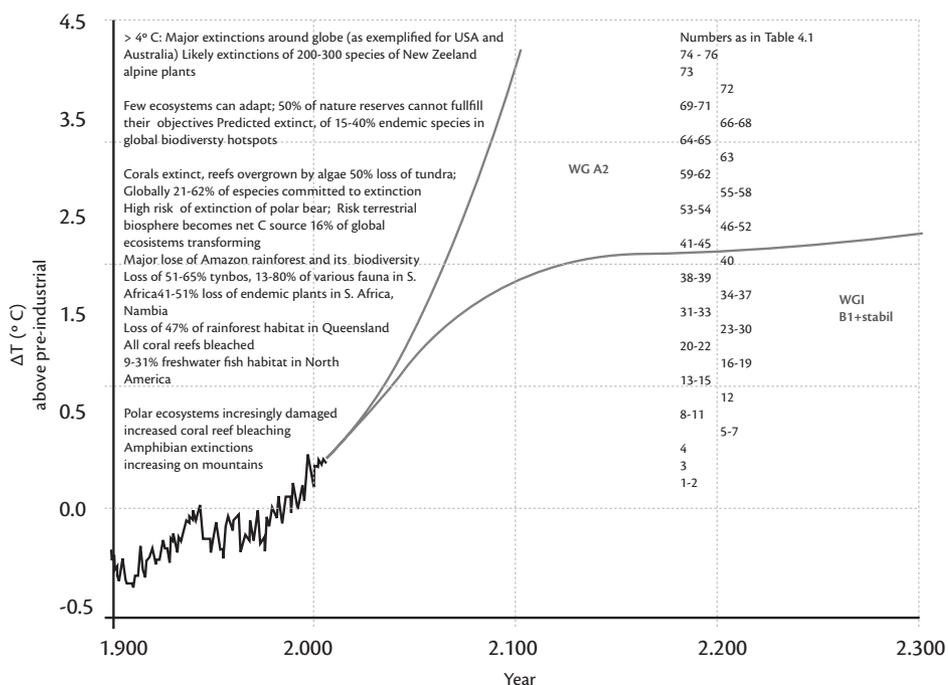
Estudos (PHOENIX e LEE, 2004; MEEHL et al, 2007; CALLAGHAN et al., 2005) indicam que alguns ecossistemas e espécies serão muito vulneráveis à mudança do clima, particularmente nas altas latitudes, a exemplo das florestas boreais. Entretanto, a Amazônia é também

⁵ 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).

⁶ 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.

⁷ 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, ΔT , 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 carbono⁸ 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 (CO₂). Dependendo do seu mecanismo de fotossíntese, certos tipos de plantas são mais sensíveis às mudanças na concentração atmosférica de CO₂. 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 CO₂ 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 CO₂. O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) indica que nas duas últimas décadas o fluxo de CO₂ 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

⁸ A melhora no crescimento das plantas como resultado do aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂). Dependendo do seu mecanismo de fotossíntese, certos tipos de plantas são mais sensíveis à mudanças na concentração atmosférica de CO₂. 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 CO₂ 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 GtC⁹ (IPCC, 2007b). Segundo o IPCC (2007c), no período de 1970 a 2004, o maior crescimento de emissões de CO₂ 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.

⁹ 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 provável¹⁰ 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 cenários¹¹. 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)¹², 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

¹⁰ Probabilidade relativa maior que 66%.

¹¹ Cenário A1B (ver seção V – Cenários).

¹² 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 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.

¹³ 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_x 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 CO₂. 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 Terrestre¹⁴, 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 Clima¹⁵ 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 Dinâmica¹⁶ (*Dynamic Global Vegetation Models*), para o final deste século e

¹⁴ 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.

¹⁵ 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.

¹⁶ 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 km².” 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 CPTEC¹⁷, 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 CO₂ (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).

¹⁷ 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 agrícolas¹⁸.

É muito provável¹⁹ 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).

¹⁸ 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.

¹⁹ Probabilidade percentual maior que 90%.

As florestas são impactadas pelo aumento da concentração atmosférica de CO₂, 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*²⁰ e cenários globais do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões²¹

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).

²⁰ *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).

²¹ 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 CO₂ e à mudança do clima na produtividade líquida indicam grandes incertezas.

6. FUTURO E NECESSIDADES

Segundo o IPCC (2007a)²², “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

²² 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂. *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 CO₂ 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 CO₂ 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>. 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-CO₂ 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 CO₂ and H₂O 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).

Vulnerabilidades, impactos e adaptação à mudança do clima no setor agropecuário e solos agrícolas

Magda Aparecida de Lima
Bruno José Rodrigues Alves

1. INTRODUÇÃO

Segundo o IPCC (2001a), até o ano 2100 a temperatura média global aumentará entre 1,6 °C e 5,8 °C, representando taxas de aquecimento de 0,1 °C a 0,4 °C por década. Para o Brasil, os valores mais elevados da taxa de aquecimento serão observados na floresta amazônica e os menores nos estados do Sudeste, junto à costa da Mata Atlântica (MARENGO, 2006).

De acordo com Marengo (2006), tem sido observada desde o início do século 20, uma tendência de aquecimento no país, sendo essa detectada especialmente no inverno, com a temperatura mínima apresentando uma taxa de aquecimento maior do que a temperatura máxima. Segundo o autor, o indicador desse aquecimento seria a tendência a uma maior frequência de dias mais quentes no inverno, e em menor grau, de um maior número de dias mais quentes no verão e no inverno. Com relação à chuva, a tendência seria mais incerta devido à existência de poucos estudos, porém, um aumento na frequência de extremos de chuva tem sido observado nas Regiões Sul e Sudeste, e na Amazônia.

A agricultura é uma atividade amplamente dependente de fatores climáticos, cujas alterações podem afetar a produtividade e o manejo das culturas, além de fatores sociais, econômicos e políticos, e, portanto, será influenciada pela mudança climática global. Essa influência é específica a cada cultura e região. As condições de adaptação de estabelecimentos agrícolas à mudança do clima podem ser bem variáveis, colocando-os em posições mais ou menos vulneráveis, em função de diferentes cenários climáticos. A ameaça da mudança climática global sobre a agricultura traduz-

se, principalmente, na queda da produtividade e diminuição de áreas adequadas à condução de lavouras.

Segundo as previsões de longo prazo a partir de modelos climáticos globais do IPCC (IPCC, 2001a), as regiões tropicais e subtropicais, ou de baixas latitudes, serão as mais afetadas pela mudança do clima (IPCC, 2001b; FAO, 2003; RAMANKUTTY et al., 2002; JONES & THORNTON, 2003; MENDELSON et al., 2004c). Aponta-se também que países em desenvolvimento poderão ser mais vulneráveis às alterações climáticas devido à predominância da agricultura em suas economias, à escassez de capital para medidas de adaptação e sua elevada exposição a eventos extremos (PARRY et al., 2001; FISCHER et al., 2005), bem como à deficiência de mercados, entre outros fatores. De acordo com IPCC (2001b, 2007), a capacidade adaptativa de sistemas de produção na América Latina, como também na África e Ásia, é baixa e a vulnerabilidade é alta, especialmente para produtores de baixa renda, que dependem de sistemas agrícolas mais tradicionais ou de terras marginais.

O IPCC (2001b, 2007) sinaliza uma grande probabilidade de ocorrer degradação de recursos naturais como solo e água, devido a mudanças na temperatura e pluviosidade, com conseqüências negativas para a agricultura. Projeta também um decréscimo na produtividade de muitas culturas, mesmo quando considerados os efeitos diretos de concentrações dobradas de CO₂ e de implementação de medidas de adaptação moderadas ao nível de fazenda. Apesar da alta variabilidade nas projeções de produtividade, algum comportamento parece ser consistente ao indicar redução nas produções de arroz após o ano de 2010, e o aumento das produções de soja quando os efeitos do aumento de CO₂ são considerados (IPCC, 2007).

O efeito de enriquecimento de CO₂ pode ter um efeito positivo em algumas plantas bem como na melhoria da eficiência de uso da água. Entretanto, sob cenários de aumentos crescentes de temperatura, este efeito pode ser anulado pelos impactos da variabilidade climática.

Incertezas permanecem como desafios para a elaboração de futuros cenários, como a magnitude e a persistência dos efeitos de crescentes concentrações de CO₂ sobre a produção agrícola sob condições realísticas de produção, as mudanças potenciais nas perdas de produção por doenças de plantas e animais, a variabilidade espacial nas respostas à mudança do

clima, os efeitos de mudanças na variabilidade climática e eventos extremos sobre a agropecuária.

Impactos da mudança do clima previstos para a agricultura brasileira, e conseqüentes riscos a esse setor, são apresentados neste artigo, bem como algumas estratégias de adaptação para o enfrentamento do problema.

2. EFEITO DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES ATMOSFÉRICAS DE CO₂ EM PLANTAS

Estudos apontam que a concentração de CO₂ atmosférico aumentou de 280 ppm no período pré-industrial para 379 ppm em 2005. Por volta do ano 2100, modelos de acoplamento de clima e ciclo de carbono (C⁴MIP) projetam aumentos na concentração de CO₂ entre 730-1020 ppm (IPCC, 2007). O efeito deste aumento nas plantas tem sido objeto de estudos, especialmente com relação ao impacto na agricultura e na oferta de alimento.

Pesquisas recentes mostram que os efeitos de CO₂ sobre o crescimento vegetal e produtividade dependerão da via fotossintética, das espécies, do estágio de crescimento e regime de manejo de água e aplicações de fertilizantes (JABLONSKI et al. 2002; KIMBALL et al., 2002; e outros citados em IPCC, 2007).

Uma das características de espécies vegetais que determinam seu potencial produtivo é a via fotossintética. As espécies arbóreas e arbustivas, que representam os principais componentes vegetais de importantes biomas do globo terrestre, apresentam a via fotossintética C3 (ver Quadro 1). Da mesma forma, culturas de importância agrícola incluindo-se alguns representantes da família das gramíneas, como arroz e trigo, também apresentam essa via, enquanto várias gramíneas forrageiras, entre elas as braquiárias, e as usadas em lavouras como milho, sorgo e cana-de-açúcar, apresentam via C4. Essa última via caracteriza-se por maior eficiência na fixação do CO₂, notadamente por modificações morfológicas e fisiológicas do sistema fotossintético, que trazem diferenças quanto ao desempenho das plantas em diferentes condições ambientais (Tabela 1). As plantas C4 fazem fotossíntese mais eficientemente quanto mais elevada for a intensidade luminosa sem, portanto, apresentar uma saturação na assimilação de CO₂ em condições de iluminação relativamente baixa, como ocorre nas plantas

C3. Se a luz solar não for limitante, a produção de plantas C4 podem ser duas a três vezes maiores do que as de plantas C3.

Quadro 1. Plantas C3 e C4

Há três tipos de assimilação fotossintética de CO_2 pelas plantas clorofiladas, pelos quais estas são classificadas em plantas C3, C4 e CAM. A denominação C3 ou C4 refere-se ao número de átomos de carbono presentes no primeiro produto da fixação do CO_2 . No caso das plantas C3 o primeiro produto da cadeia bioquímica da fotossíntese é o ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA), uma molécula com 3 carbonos. A via fotossintética C3 envolve um processo de carboxilação, que é a adição de uma molécula de CO_2 a uma molécula de ribulose 1,5 bisfosfato, através da enzima Rubisco (ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase-oxigenase), uma simplificação do chamado ciclo de Calvin.

Nas plantas C4, o sistema fotossintético produz uma molécula de quatro carbonos, o ácido oxalacético. Essas plantas possuem uma estrutura diferenciada nas folhas, que se caracteriza por uma camada de células que envolvem os vasos condutores de seiva, como uma bainha (anatomia Kranz), nas quais se encontra a enzima Rubisco. A carboxilação é feita nas demais células da folha através da adição da molécula de CO_2 a uma molécula de fosfoenolpiruvato (PEP), através da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase), formando o ácido oxalacético, que imediatamente é transformado em malato e aspartato. Nos cloroplastos (organelas que contêm a clorofila, substância que transforma energia luminosa em química) das células da bainha, o aspartato e o malato são transformados em CO_2 e piruvato. O CO_2 é capturado pela Rubisco, seguindo o ciclo de Calvin.

As plantas C3 são limitadas pelo CO_2 , ou seja, mesmo sob abundância de luz a taxa de suprimento de CO_2 ao cloroplasto é muito lenta. As plantas C4 superam esta limitação, uma vez que usam o CO_2 disponível mais eficientemente, com conseqüentes maiores taxas de produção líquida em altos níveis de luz. Os fatores ambientais limitantes à fotossíntese nas plantas C4 são o nível de luminosidade e temperatura.

Considerando uma média de várias espécies sob condições de não estresse, estudos mostram que haveria um aumento de 10-20% na produtividade de plantas C3 e de 0-10% em plantas C4 sob uma concentração de 500 ppm de CO₂, em relação às concentrações atmosféricas atuais (AINSWORTH et al., 2004; GIFFORD, 2004; LONG et al., 2004, citados em IPCC, 2007). De modo geral, a resposta fotossintética ótima é obtida em níveis mais elevados de temperatura e de radiação nas plantas C4 do que nas espécies C3 (Tabela 1). O estresse devido a altas temperaturas causa um conjunto de mudanças morfo-anatômicas, fisiológicas e bioquímicas nas plantas C3 (WAHID et al, 2007), que afetam seu desenvolvimento, e podem resultar, em alguns casos, em drásticas reduções de produtividade.

Tabela 1. Resposta fotossintética média para quatro grupos de culturas à radiação e à temperatura

Características	Grupo de adaptabilidade da cultura			
	I	II	III	IV
Via fotossintética	C ₃	C ₃	C ₄	C ₄
Taxa de fotossíntese em condições de saturação de luminosidade e temperatura ótima, em mg CO ₂ dm ⁻² h ⁻¹	20-30	40-50	70-100	70-100
Temperatura ótima para fotossíntese máxima, em °C	15-20	25-30	30-35	20-30
Intensidade de radiação em fotossíntese máxima	0,2-0,6	0,3-0,8	> 1,0	> 1,0
Culturas	Trigo Batata Feijão (cultivares temperadas e tropicais de alta altitude)	Feijão (cultivares tropicais) Soja Arroz Algodão Batata doce Mandioca	Milheto Sorgo (cultivares tropicais) Milho (cultivares tropicais) Cana-de-açúcar	Sorgo (cultivares temperadas e tropicais de alta altitude) Milho (cultivares temperadas e tropicais de alta-altitude)

Nas concentrações atuais de CO₂ na atmosfera, a saturação do sistema fotossintético das plantas C3 ou C4 não é atingida, sendo este o fator mais comum para a limitação das taxas fotossintéticas (LARCHER, 2000). Devido à menor eficiência de utilização de CO₂ por plantas com via fotossintética

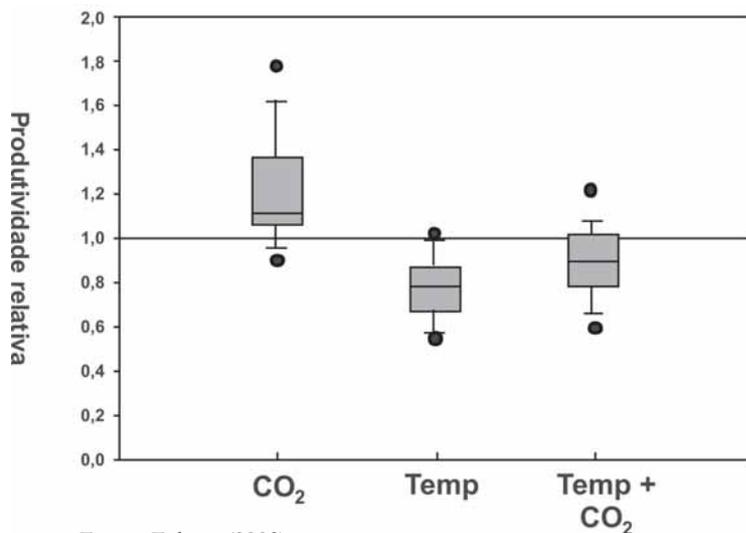
C3, cuja saturação do sistema fotossintético somente ocorreria com concentrações de CO₂ na faixa de 1000 ppmv, esperar-se-ia significativo aumento da produção primária dessas plantas em resposta aos aumentos de CO₂ da atmosfera. Um efeito direto seria o aumento da produção primária das florestas tropicais, desde que outros fatores não se manifestassem de forma negativa sobre as plantas (KARNOSKY, 2003). Estudos sob condições controladas, incluindo-se temperatura e umidade, apontam para incrementos médios de 30% na produtividade de várias culturas C3 submetidas à atmosfera com o dobro da concentração atual de CO₂. Sob condições menos controladas, em campo, os ganhos de produtividade foram menores (10 a 28%). As plantas com via fotossintética C4 praticamente não se beneficiam com a maior concentração de CO₂ (FUHRER, 2003).

O maior acúmulo de biomassa pelas plantas beneficiadas por concentrações mais elevadas de CO₂ na atmosfera também é acompanhada por maior eficiência de uso de nitrogênio, sem necessariamente proporcionar grãos mais ricos em proteína (FUHRER, 2003). No longo prazo, espera-se que a produtividade decresça devido à diminuição das reservas de N do solo, o que poderia ser compensado com a fertilização do solo. Isso pode ser um fator negativo para a agricultura de países em desenvolvimento devido à utilização de doses de fertilizante nitrogenado abaixo da requerida pelas culturas. Nesse sentido, rotações de culturas com o uso de leguminosas fixadoras de N₂ atmosférico podem contribuir para uma maior oferta de N do solo. A cultura da soja, que ocupa uma extensa área no Brasil nas safras de verão, além de sua importância como fonte de óleo e proteínas, pode amenizar um cenário futuro de deficiência de N do solo como componente da rotação de culturas, capaz de fixar nitrogênio do ar suficiente para alta produtividade e deixar um excedente para a próxima cultura na forma de resíduos de colheita.

Apesar de ser evidente que uma elevação dos níveis de CO₂ possa resultar em maiores taxas fotossintéticas de espécies com via C3, com reflexos diretos na produtividade, em cenários de maior aumento de temperaturas globais, este efeito benéfico do enriquecimento de CO₂ seria compensado pelos efeitos negativos decorrentes de altas temperaturas. A Figura 1, que reúne dados compilados por Fuhrer (2003), exemplifica bem o efeito das alterações de temperatura sobre a produtividade da cultura do trigo, anulando os efeitos positivos de uma atmosfera mais rica em CO₂.

Existem marcadas diferenças na adaptabilidade à temperatura e ao comprimento do dia entre culturas com via de assimilação de carbono (via fotossintética) C4 e aquelas com a via C3. De modo geral, a resposta fotossintética ótima é obtida em níveis mais elevados de temperatura e de radiação nas plantas C4 do que nas espécies C3 (Tabela 1). O estresse devido a altas temperaturas causa um conjunto de mudanças morfo-anatômicas, fisiológicas e bioquímicas nas plantas C3 (WAHID et al, 2007), que afetam seu desenvolvimento, e podem resultar, em alguns casos, em drásticas reduções de produtividade.

Figura 1. Efeitos da alta concentração de CO₂ e de temperatura elevada, e da combinação de ambas sobre a produtividade relativa de trigo; produtividades nas condições alteradas em relação às condições normais do ambiente dos estudos



Fonte: Fuhrer (2003).

Segundo dados de cenários de clima gerados por modelos gerais de circulação, em 2050 a cultura da soja no Brasil seria beneficiada pela maior concentração de CO₂ na atmosfera, com aumentos de produtividade da ordem de 20%. As produtividades de trigo e milho seriam reduzidas por efeitos de temperatura sobre os ciclos das culturas (SIQUEIRA *et al*, 2001). Destaca-se, entretanto, que não foram considerados efeitos de pragas e doenças e de riscos climáticos, que poderiam modificar drasticamente as previsões de produtividade para as culturas.

Nowak et al. (2004) e Ainsworth e Long (2005), observaram um aumento de 10% na produção de biomassa aérea em pastagens de plantas C3. Em áreas de pastagens tropicais, há uma predominância de plantas C4, as quais, segundo estudos revisados por Poorter (1993) (citado in HOWDEN et al., 1999), apresentam um menor aumento na produção de matéria seca (28%) comparada a plantas C3 (71%), sob concentrações atmosféricas dobradas de CO₂. Os ganhos seriam atribuídos mais ao aumento da eficiência de uso da água que propriamente a maiores taxas de assimilação de CO₂. O aumento na eficiência de uso da água decorre de uma menor condutividade estomatal que reduz a perda de umidade enquanto os níveis aumentados de CO₂ atmosférico mantêm as concentrações internas de CO₂ e, assim, a fotossíntese. Ainda, há que se considerar o efeito combinado de concentrações crescentes de CO₂ e variações da temperatura, as quais em regiões tropicais podem ter um efeito mais adverso se comparadas às regiões temperadas, em função de uma maior evaporação e evapotranspiração, além de outros efeitos diretos (temperatura, precipitação) e indiretos (ex., pragas e doenças) sobre a planta.

Reconhece-se atualmente que os efeitos de elevadas concentrações de CO₂ observados em sítios experimentais podem estar superestimando as respostas reais ao nível de fazenda, devido a que fatores limitantes tais como ocorrência de pragas e doenças, ervas daninhas, competição por água e nutrientes, entre outros fatores, não são ainda bem conhecidos em grandes escalas, e nem suficientemente implementados nos mais sofisticados modelos disponíveis (IPCC, 2007).

3. VULNERABILIDADE DE ÁREAS DE PASTAGEM E SISTEMAS DE PRODUÇÃO ANIMAL

Há ainda uma grande incerteza sobre os efeitos da mudança global sobre sistemas de produção animal. Há previsão de que a produção animal na América Latina, predominantemente caracterizada pelo sistema de pastagem, será negativamente afetada pela maior variabilidade da precipitação. O padrão sazonal de disponibilidade de água e a baixa disponibilidade de nutrientes dos solos constituem fatores limitantes nas áreas de pastagem de boa parte da região, e o já baixo valor nutricional das pastagens tropicais pode diminuir ainda mais como consequência do aumento da relação C:N (carbono:nitrogênio) (ZHAO et al., 2005).

Entre os fatores de maior importância para os sistemas de produção animal estão o aumento da temperatura e o efeito de fertilização do CO₂. Segundo estudo da FAO (2003), a atividade pecuária nas regiões temperadas, especialmente em países desenvolvidos, será mais favorecida, enquanto em países em desenvolvimento será prejudicada por perdas devido ao estresse de calor nas criações.

Em relação a um efeito direto sobre os animais, a temperatura é o fator mais importante. A variação no regime de chuvas pode afetar os animais por efeito da secagem de reservatórios e impossibilidade de fornecimento de água para consumo. O estresse ao calor influi negativamente na produção de leite e reprodução de vacas leiteiras, bem como na fertilidade de suínos (BERMAN, 1991; HAHN & MADER, 1997; HAHN, 1999, citados em ZHAO et al. 2005).

O Brasil, maior exportador de carne do mundo, possui um rebanho bovino predominantemente de raças zebuínas, que é um aspecto favorável para termotolerância, frente a um cenário futuro de temperaturas mais elevadas. O gado zebu ou indiano (*Bos indicus*) apresenta vantagens sobre o europeu (*Bos taurus*) quanto a termotolerância, pois os animais zebuínos têm maior capacidade de regular a temperatura do corpo em condições de estresse térmico, e as altas temperaturas têm menor efeito sobre as células de seu corpo, em comparação ao gado europeu. Além disso, os pêlos do gado zebu têm propriedades que aumentam a perda de calor e reduzem a absorção da radiação solar (HANSEN, 2004). Quanto às criações de frangos, que dão ao Brasil o segundo lugar em produção, também poderão ser afetadas pelas mudanças no clima. Os animais adultos têm desenvolvimento ótimo em temperaturas entre 18 e 20°C, e são sensíveis a altas temperaturas, com elevada mortalidade quando a temperatura ambiente excede 38°C. O estresse por calor é responsável por grandes perdas no rendimento de frangos, ocorrendo diminuição do peso corporal e aumento de mortalidade (FABRÍCIO, 1994). A termotolerância tem sido pesquisada, porém os avanços são pequenos. Aclimação com exposição dos pintos recém-nascidos (até cinco dias de idade) ao estresse por calor não letal (ARJONA et al., 1988), ou aves com o genes que conferem redução no empenamento, com maior perda de calor (CAHANER et al., 1993), são tentativas para se conseguir melhor comportamento dessas aves em condições de estresse pelo calor. Uma possível solução pode estar no investimento em instalações que amenizem os efeitos de altas temperaturas.

Além dos fatores climáticos diretos, outros fatores que afetam a pecuária são o impacto de mudanças na disponibilidade de alimento e preço de grãos, impactos nas áreas de pastagem e culturas forrageiras, e incidência de doenças de plantas e animais (ZHAO et al., 2005).

4. VULNERABILIDADE DE SOLOS AGRÍCOLAS

Efeitos potenciais das mudanças climáticas sobre a matéria orgânica do solo ainda são muito incertos. É, porém, um consenso que uma alteração significativa nas reservas de carbono desse compartimento terá importante efeito na composição de gases da atmosfera e, conseqüentemente, impactos no clima do planeta. Uma mudança climática pode induzir a perdas de matéria orgânica do solo, perturbando o balanço de entrada e saída de nutrientes, de modo a influenciar a produtividade dos sistemas agrícolas.

A quantidade de carbono existente no solo é o resultado líquido dos processos de deposição e decomposição de resíduos orgânicos, estando o primeiro em função da produção primária da vegetação existente. Estima-se que os estoques originais em áreas sob vegetação nativa, nos primeiros 30 cm de profundidade, eram aproximadamente de 37 Pg de C, sendo os maiores estoques observados na região Sul do País (Figura 2).

A inevitável remoção de parte da vegetação nativa para uso do solo na agricultura significou uma redução dos estoques de carbono dos solos, cujo grau dependeu da intensificação do uso, tal como mostrado na Tabela 2 que exemplifica o efeito sobre o uso do solo em importantes biomas do país. A perda de carbono do solo explica-se em parte pela menor produção de resíduos em áreas cultivadas em comparação com as de vegetação nativa, e em parte devido ao manejo do solo, que por muito tempo foi praticamente realizado em bases convencionais, com arados e grades.

A crescente adoção de sistemas de produção baseados no plantio direto, e cultivo mínimo, com rotações de culturas em que se consideram espécies vegetais que promovam a cobertura do solo e alta produção de resíduos, destacando-se aqui os sistemas de integração lavoura-pecuária, vem permitindo não somente a redução nas perdas, mas uma acumulação de carbono do solo, contribuindo para mitigar o efeito-estufa do planeta (BODDEY et al, 2006; CERRI et al, 2007).

Figura 2. Estoques de carbono (kg m^{-2}) no território brasileiro (www.mct.gov.br)

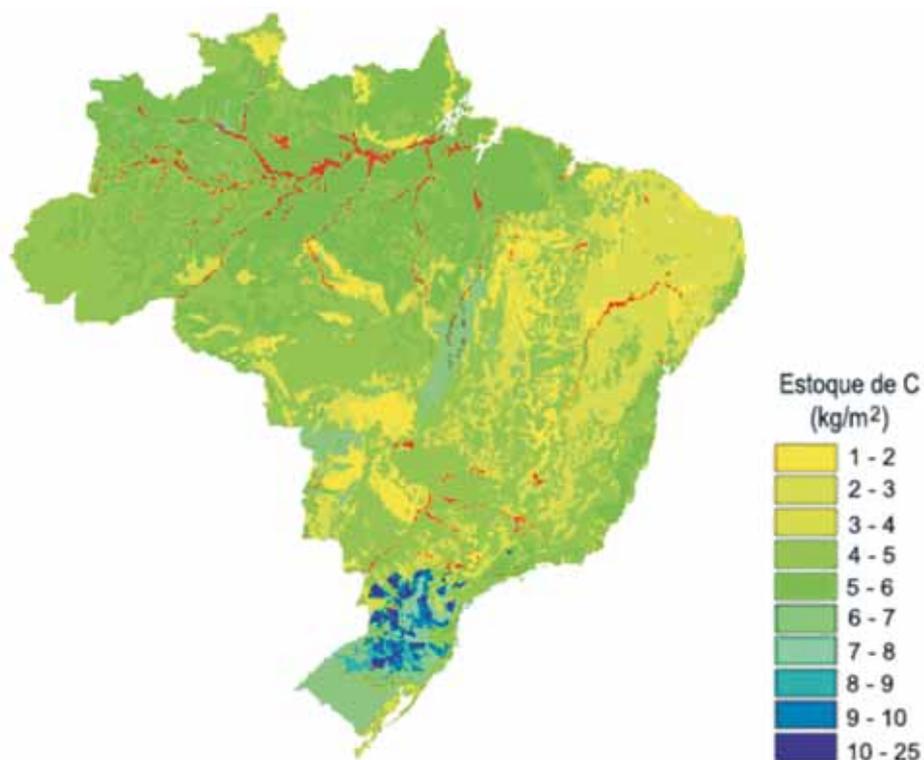


Tabela 2. Efeito do uso do solo sobre o estoque de carbono até 1 metro de profundidade, em regiões de floresta subtropical e Cerrados

Uso do solo	Estoque de C (kg m^{-2}) para diferentes camadas de solo (cm)	
	0-30	0-100
Florestas (subtropical)	13,04	28,99
Cultivado (ex. Floresta)	6,56	13,58
Cerrados	9,35	19,46
Pastagens (ex. Cerrados)	7,52	13,61
Cultivado (ex. Cerrados)	6,33	16,11

Adaptado de Lal & Kimble (2000)

Mudanças no regime de chuvas e na temperatura afetarão diretamente a produção vegetal, com conseqüente alteração do equilíbrio entre deposição e decomposição de resíduos (GREENLAND et al., 1992). O aumento da temperatura média do solo, em função do aumento de temperatura do ar, terá efeito direto no metabolismo dos organismos que atuam na decomposição da matéria orgânica do solo. Conforme discutido por Davidson e Janssens (2006), a decomposição da matéria orgânica é acelerada com o aumento da temperatura, mas esse efeito varia em função do componente da matéria orgânica, de modo que a fração que está protegida pelos agregados do solo não se alteraria muito somente pelo efeito da temperatura. Porém, se ocorre desagregação do solo por impacto direto das gotas de chuva ou pela mecanização do solo, a matéria orgânica se torna desprotegida e fica suscetível à mineralização, que será mais intensa em um cenário de altas temperaturas. Neste caso, o sistema de plantio direto, que pressupõe proteção contínua do solo pela manutenção da palha, seria um componente importante na atenuação dos efeitos da mudança do clima sobre as perdas de carbono do solo.

A consideração de uma mudança no regime de chuvas, junto à elevação da temperatura, traz incertezas sobre as conseqüências da mudança do clima no estoque de carbono do solo. Chuvas mais intensas podem quebrar agregados e expor a matéria orgânica do solo, sendo que o solo úmido favorece a atividade de microrganismos e o acesso destes à matéria orgânica. Por outro lado, em condições mais secas, a decomposição é reduzida. Além disso, o umedecimento do solo após longos períodos de estiagem é dificultado por um efeito que repele a água. Esse efeito também ocorre em áreas sujeitas a queimadas freqüentes (DAVIDSON e JANSSENS, 2006), o que pode ocorrer em um cenário de temperatura mais altas, principalmente em regiões florestais.

Essas possibilidades alimentam as incertezas sobre o impacto da mudança do clima sobre as reservas de carbono dos solos.

Com relação às crescentes concentrações de CO₂ na atmosfera, recentes pesquisas indicam que o estoque de carbono na matéria orgânica do solo pode aumentar, e inclusive pode haver uma saturação deste estoque sob elevadas concentrações atmosféricas de CO₂ (IPCC, 2007).

Há ainda incertezas sobre o efeito de eventos extremos (ex. altas temperaturas, inundações, etc.) e de outros poluentes atmosféricos (ex. ozônio

troposférico) no carbono dos solos, especialmente em relação a solos tropicais, o que reforça a necessidade de mais pesquisa neste tema no país.

Na tentativa de encontrar possíveis formas de reduzir a vulnerabilidade de solos agrícolas aos riscos da mudança do clima, o IPCC (2007) destaca a importância de se identificar sinergias entre as estratégias de adaptação e de mitigação nos sistemas agrícolas, vinculando as questões sobre seqüestro de carbono, emissões de gases de efeito estufa, mudança de uso da terra e sustentabilidade de sistemas de produção dentro de redes coerentes de política de clima .

5. EFEITOS DA MUDANÇA DE CLIMA SOBRE AS FLORESTAS

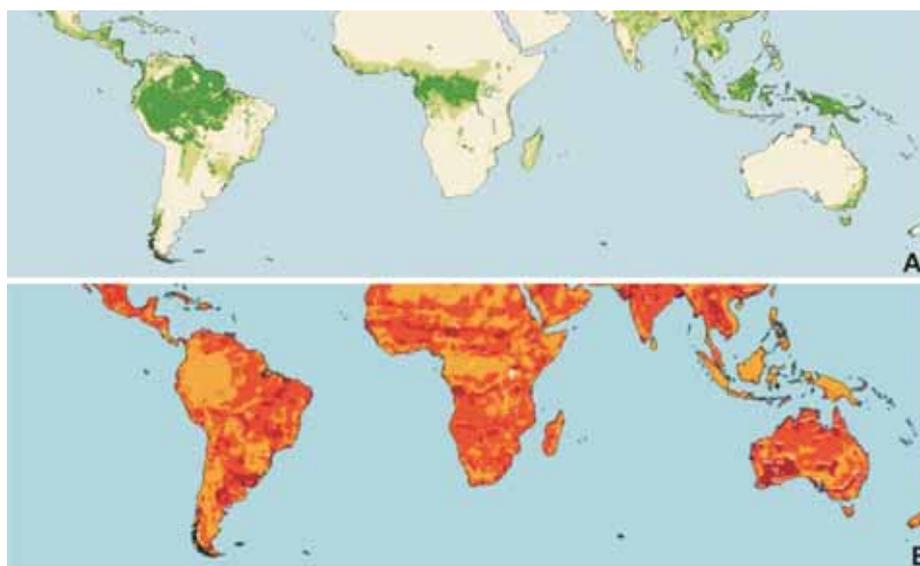
A queimada de áreas florestais e a utilização dos solos para agricultura de forma intensiva contribuem grandemente para a elevação dos gases de efeito estufa na atmosfera, no caso do Brasil representando mais de 80% de suas emissões totais por efeito antrópico (TEIXEIRA et al, 2006).

Ecossistemas florestais podem ser profundamente afetados pelas alterações nas concentrações de CO₂ da atmosfera e pelas alterações de variáveis climáticas. Os modelos de circulação global apontam para aumentos de temperatura significativos em áreas sob vegetação natural, incluindo-se a Amazônia (Figura 3). Nesse caso, a produção de biomassa e a diversidade podem ser influenciadas de modo negativo ou positivo.

A grande elevação das concentrações de CO₂ na atmosfera prevista para as próximas décadas deverá ter um efeito positivo no crescimento das árvores, cuja magnitude será influenciada pelas espécies vegetais, fertilidade do solo e efeito de outros poluentes no ar (KARNOSKY et al, 2003). Oren et al (2001) comprovou o efeito fertilizante de atmosferas mais ricas em CO₂ sobre espécies de *Pinus taeda*, mas os experimentos mostraram que em solos de baixa fertilidade o efeito fertilizante não foi observado. Como a maioria das florestas encontra-se em solos de baixa fertilidade, sendo o nitrogênio um importante fator limitante do crescimento das árvores (VITOUSEK & HOWARTH, 1991), não se pode esperar um efeito compensatório muito expressivo do excesso de CO₂ na atmosfera pelo seqüestro de C na biomassa das florestas. Aumentos na biomassa aérea em concentrações de 500 ppm de CO₂ para árvores foram observados na faixa de 0-30%, com valores mais elevados em árvores jovens e pouco ou sem

resposta em florestas naturais maduras (NOWAK et al., 2004; AINSWORTH e LONG, 2005, citados em IPCC, 2007).

Figura 3. (A) Áreas sob florestas tropicais no globo, em verde;
(B) vulnerabilidade em função das mudanças climáticas



VINHO – ALTO
VERMELHO – MEDIA
LARANJA – BAIXA

Fonte: WWF - www.panda.gov.br

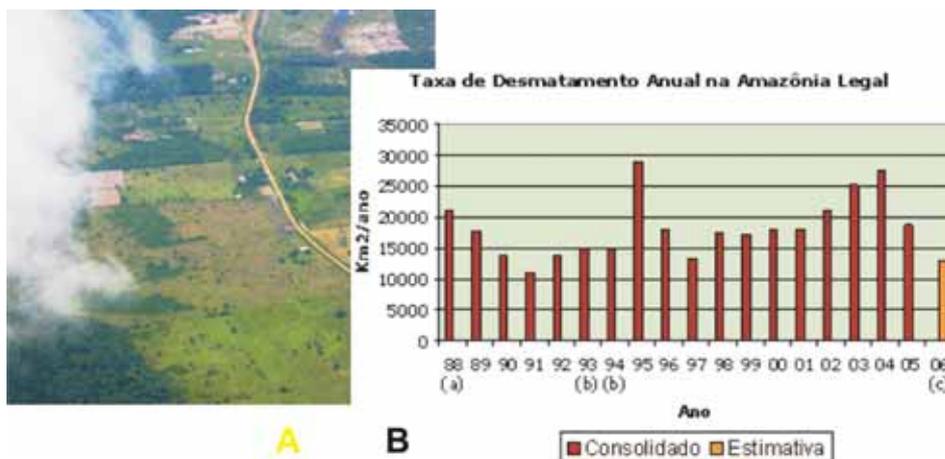
A elevação da temperatura tem efeito direto no mecanismo fotossintético, e em condições extremas pode levar ao colapso do sistema (LARCHER, 2000). A disponibilidade de água é fator-chave nesse processo, e algumas regiões, como a Amazônia, poderão sofrer de estresse hídrico, tornando-se muito vulneráveis, embora as incertezas ainda sejam grandes (NOBRE, 2001).

A disponibilidade de N e outros nutrientes no solo poderão aumentar devido à uma aceleração na decomposição da matéria orgânica do solo pelo aumento de temperatura (MELILLO et al, 2002), ficando mais disponíveis para o desenvolvimento das plantas, o que permitiria aumentar os estoques de C do sistema na forma de biomassa. A presença de poluentes na troposfera, como o O₃, em efeito combinado com maiores concentrações de

CO₂, pode diminuir as defesas da planta e aumentar a ocorrência de pragas, cujo efeito seria a redução na produção vegetal (PERCY et al 2002). No entanto, algumas pragas e doenças podem ser negativamente afetadas, possibilitando melhor desenvolvimento da floresta (ZHAO et al, 2005).

A Floresta Amazônica tem sido foco de especial atenção quanto aos possíveis efeitos da mudança do clima. A região Amazônica guarda a maior parcela remanescente de floresta tropical do mundo, cuja importância reside em seu papel na regulação hidrológica e do clima de vasta área da América do Sul, além de possuir um grande estoque de carbono e de biodiversidade (FEARNSIDE, 1999). Devido à sua importância, existe grande receio quanto aos potenciais impactos globais que ocorreriam com o gradual desaparecimento da Floresta Amazônica. Essa preocupação advém das elevadas taxas de desmatamento que têm sido registradas ao longo dos anos, fruto de aberturas de estradas que facilitam o acesso, a exploração dos recursos florestais, e o estabelecimento de pastagens, normalmente acompanhados por queimadas (Figura 4).

Figura 4. Desmatamento próximo das estradas abertas em meio a Floresta Amazônica (A). A exploração dos recursos da floresta e uso do solo para atividade agrícola respondem por elevadas taxas de desmatamento (B).



Fonte: www.inpe.br, Inpe divulga estimativa do desmatamento na Amazônia Legal para o período Agosto 2005 – Agosto 2006, em 26/10/2006).

O desmatamento traz impactos desastrosos para o meio ambiente, e os fragmentos remanescentes ficam cada vez mais vulneráveis aos eventos climáticos. Laurance e Williamson (2001) mostraram que os fragmentos de floresta são mais vulneráveis do que as florestas intactas aos danos periódicos causados pelas secas geradas do fenômeno El-Niño, que leva a danos fisiológicos e até morte de árvores situadas nas bordas da floresta. Essas áreas ficam mais secas e as chances de incêndio aumentam, e provavelmente será mais determinante da permanência de cobertura vegetal do que a própria mudança climática (ZHAO et al, 2005). A substituição de áreas de floresta por pastagens tem efeito imediato sobre a temperatura, evapotranspiração e precipitação. Estudo realizado com modelos de circulação global confirma esses efeitos, com aumento dos períodos de seca, o que seria limitante para o desenvolvimento das florestas tropicais úmidas adaptadas a condições de ausência ou curto período de seca (NOBRE et al, 1991).

O predomínio de um ambiente mais seco tem efeito negativo direto sobre as grandes árvores da floresta, que acabam dando lugar a outras espécies mais tolerantes à seca, o que pode culminar com a savanização da Amazônia.

Os resultados disponíveis na literatura ainda trazem muita incerteza sobre o impacto da mudança do clima sobre a produtividade e a sobrevivência das florestas, especialmente as tropicais. No entanto, parece consistente que a região Amazônica deverá sofrer com temperaturas mais elevadas, e por eventos periódicos de El-Niño cada vez mais intensos, aumentando os riscos das queimadas. Sem dúvida, as áreas de florestas no país tornam-se mais vulneráveis devido ao desmatamento e às queimadas.

Finalmente, as florestas exercem um grande efeito sobre a umidade e temperatura do ar, dentro de escalas locais, regionais e globais. A evapotranspiração na Floresta Amazônica, por exemplo, alimenta as chuvas que passam pelos Andes e chegam ao centro-sul do Brasil (FEARNSIDE, 2006), região que responde pela grande maioria da produção agrícola nacional. Assim, alterações nas áreas sob florestas podem resultar em grande impacto para a agricultura do país.

6. EVENTOS EXTREMOS SIGNIFICANTES PARA A AGRICULTURA

A frequência e a magnitude de muitos eventos climáticos extremos aumentam mesmo com uma pequena elevação da temperatura, e se tornará

maior sob temperaturas mais elevadas. Eventos extremos incluem inundações, déficits de umidade do solo, ciclones tropicais, tormentas, altas temperaturas, e incêndios. Os impactos dos eventos extremos são freqüentemente grandes localmente e podem afetar significativamente setores específicos e regiões. A agricultura tende a ser mais vulnerável aos extremos hidrológicos e de temperatura, já que este setor depende fortemente dos recursos naturais. O crescimento de culturas e a qualidade da produção podem ser relativamente mais sensíveis a eventos climáticos extremos de curta duração, tais como temperaturas muito elevadas, geadas severas, chuvas de granizo, e seca persistente, situações essas verdadeiramente temidas pelos agricultores.

A dimensão do dano que uma cultura sofre depende do estágio de desenvolvimento da cultura no momento em que se dá o evento extremo. Um exemplo pode ser dado pela cultura de cereais, em que sob altas temperaturas imediatamente antes do período de florescimento, ocorre uma redução no número de grãos formados, resultando em produções reduzidas de grãos.

Para quantificar o risco de eventos extremos e suas conseqüências para as culturas, estudos devem considerar atividades de modelagem de culturas. Modelos de ampla escala mascaram, freqüentemente, eventos extremos locais. Daí a importância de se desenvolver modelos de eventos extremos específicos para cada cultura.

Segundo Marengo (2006), os modelos climáticos globais não têm apresentado uma simulação satisfatória de eventos extremos de chuva no presente, e as afirmações de que extremos poderão ser mais intensos e freqüentes baseiam-se mais nas observações feitas nos últimos 50 anos e não necessariamente nas projeções dos modelos.

Registros para o Rio Grande do sul, por exemplo, mostram que os eventos de enchentes e de secas prolongadas neste Estado estão relacionados, respectivamente, aos fenômenos de El-Niño (aquecimento das águas do Oceano Pacífico) e de La-Niña (esfriamento das águas Oceano Pacífico). Perdas de safra são observadas durante esses eventos. Pela estatística disponível para as últimas duas décadas, a cada dez safras, quatro foram afetadas por eventos de seca. Mesmo com um sistema de previsão em funcionamento, baseado em monitoramento das águas do Pacífico, grandes prejuízos ainda são observados nas áreas de produção. A precipitação pluvial

ocorrida nos três meses de verão de 2004/2005 foi menor que 200mm em grande parte do Estado, a menor dos últimos 53 anos (BERLATO e CORDEIRO, 2005). Segundo esses autores, a forte estiagem ocasionou uma quebra na safra de grãos, que no Brasil foi da ordem de 20 milhões de toneladas.

Somente no Rio Grande do Sul, os prejuízos foram superiores a 3,5 bilhões de reais. As quebras de safra afetam mais drasticamente as populações rurais mais pobres, que perdem escassos recursos investidos para seu sustento, e que em situações mais extremas são atingidas pela fome, tal como se observa durante os eventos de seca na Região Nordeste.

7. PROJEÇÕES DE IMPACTOS E RISCOS À AGRICULTURA NO PAÍS

Não se tem ainda uma razoável dimensão das conseqüências da mudança climática na agricultura brasileira de modo geral, embora sejam de grande interesse em vista da contribuição econômica desse setor ao país, com um PIB de aproximadamente 6,4 % (média dos PIBs de 2000 a 2005, considerando o Valor Adicionado da Agropecuária a Preços Básicos, segundo o IBGE (comunicação pessoal). O Brasil é um importante exportador de produtos agrícolas, como açúcar, suco de laranja, carne de frango, carne bovina, carne suína, café, tabaco, farelo de soja, soja, óleo de soja, algodão, além de celulose e frutas, condição esta que poderá ser mudada em função das condições climáticas das áreas atualmente recomendadas para a produção dessas culturas.

Com base em evidências observacionais e tendências já observadas no Brasil, assim como em estudos feitos considerando projeções climáticas derivadas de modelos climáticos do IPCC, entre outras fontes, Marengo (2006) aponta, que as culturas perenes, como a laranja, tendem a procurar regiões com temperaturas máximas mais amenas com a produção se deslocando para o sul do país. Elevadas temperaturas no verão irão condicionar o deslocamento das culturas para áreas com clima mais favorável, podendo implicar em redução de área plantada, como é o caso do arroz, feijão e soja.

No Brasil, destacam-se os estudos realizados por Siqueira et al. (1994, 2001), Alves e Evenson (1996), Assad et al (2007), Pinto et al. (2004), Zullu Jr. et al. (2006), cujas principais conclusões serão apresentadas a seguir.

7.1. SIMULAÇÃO BASEADA EM MODELOS DE CIRCULAÇÃO GLOBAL E DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO PAÍS

A projeção de futuras produções agrícolas sob diferentes cenários de mudança do clima, por meio de modelos de simulação que integrem componentes do sistema solo-planta-clima, tem-se mostrado importante instrumento para a avaliação de estratégias tecnológicas e de impactos ambientais.

Usando modelos de circulação geral (General Circulation Models-GCMs), como GISS, GFDL e UKMO, e modelos de produção agrícola, Siqueira et al. (1994, 2001) apresentaram projeções sobre os efeitos potenciais da mudança climática global na agricultura brasileira, tomando como referência 13 diferentes locais do país e as culturas de trigo, milho e soja. O impacto na produção de grãos seria relativamente grande, de forma a serem previstas reduções na produção de trigo e de milho. De outro lado, a produção nacional da cultura da soja apresentaria aumento.

Segundo Siqueira et al. (1994, 2001), para o cultivo de trigo os modelos projetaram uma redução na produtividade em cerca de 30%, com encurtamentos do ciclo de crescimento da planta entre 14% e 15%, onde os maiores efeitos previstos ocorreriam na região centro-sul (zona climática de transição entre clima tropical e temperado). As projeções para o cultivo de milho no país não se mostraram favoráveis de acordo com as projeções dos autores, com reduções na produtividade estimadas em 14% e 33% (16% em média), afetando mais as regiões centro-sul e norte, com encurtamentos de ciclo entre 33% e 21%, respectivamente.

As projeções para a cultura da soja foram positivas, com previsão de aumento na produtividade entre 5% a 34% (21% em média), sendo que os efeitos no comprimento do ciclo são variáveis entre as regiões, com maiores impactos nas regiões centro-sul e sul, e inexpressivos nacionalmente (SIQUEIRA et al., 2001).

A Região Nordeste seria especialmente vulnerável aos decréscimos de produções de milho e as regiões central e centro-sul às reduções na produção de trigo. A Região Sul seria vulnerável às reduções de trigo e de milho e a Região Norte às reduções de milho.

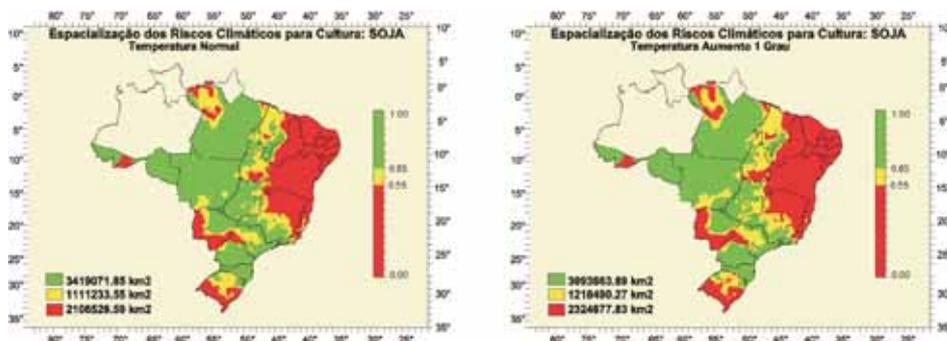
Usando o modelo de equilíbrio atmosférico GISS *transient*, Siqueira et al. (1994, 2001) simularam cenários com modificações graduais de CO₂ nas plantas, para a avaliação de possíveis impactos na produção agrícola. As projeções apontaram para um declínio da produção de trigo e de milho no período de 1990-2060, com maior expressão na região centro-sul, enquanto as projeções apresentaram-se lineares para a produção de soja, e menos intensas para a Região Nordeste.

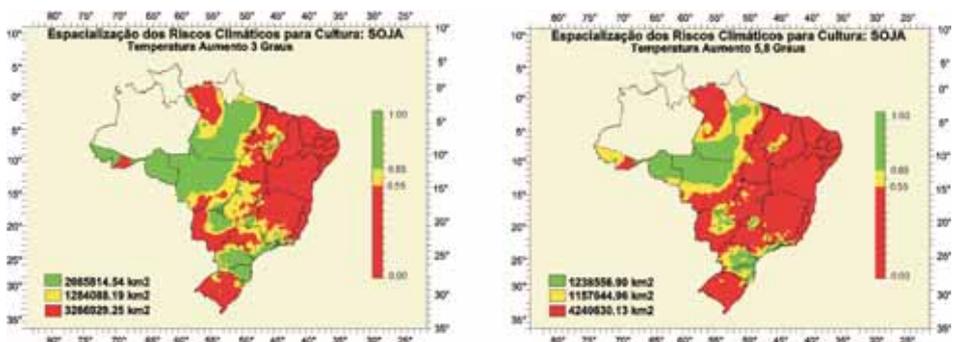
Segundo esses autores, as principais limitações do estudo residiram no fato de que os simuladores utilizados não foram validados para todas as regiões analisadas e que a tecnologia e o uso das terras foram assumidos constantes, mesmo cientes de que os mesmos provavelmente seriam modificados no futuro. Também apontaram a necessidade de estudos para avaliar as reais implicações dos efeitos fisiológicos diretos do CO₂ no desenvolvimento e na produtividade das culturas.

7.2. RISCOS AO ZONEAMENTO CLIMÁTICO DE CULTURAS

Recentes estudos indicam que, em função de cenários de aumento de temperatura, poderão ser aumentados os riscos de perda de produção de várias culturas, assumindo-se que permaneceriam nas mesmas áreas, atualmente consideradas apropriadas para agricultura. Para o país, cenários de riscos ao zoneamento climático mostram uma redução de área favorável ao cultivo de importantes culturas do país, sendo a cultura do café a mais prejudicada, seguida pela soja (Figura 5 e Tabela 3). Existem incertezas

Figura 5. Impacto da variação da temperatura média do ar sobre a disponibilidade de áreas potencialmente favoráveis ao cultivo da soja no Brasil. Do verde para vermelho, passando pelo amarelo, significa variação de área mais favorável para menos favorável ao cultivo da soja





nessas estimativas, principalmente pela carência de informações para as muitas variáveis envolvidas, mas servem para nortear o desenvolvimento de estratégias de adaptação para a agricultura, e certamente subsidiar o planejamento de políticas públicas para o setor.

Tabela 3. Redução futura de área de plantio de algumas culturas esperada para um cenário otimista de aumento de +1 °C na temperatura média global, e para um cenário pessimista, com aumento de + 5,8 °C, tendo como referência a área atual potencialmente utilizável

Cultura	Área atual Potencial (km ²)	Redução de área (%)	
		Cenário otimista (+1 °C)	Cenário pessimista (+5,8 °C)
Arroz	4.755.204	4	41
Feijão	5.141.047	3	23
Soja	3.419.072	10	64
Milho	5.169.034	2	14
Café	904.971	23	92

Modificado de Assad et al (2007)

Potenciais impactos do aumento da temperatura média do ar de 1°C, 3°C e 5,8°C e de um incremento de 15% na precipitação pluvial no zoneamento agroclimático do café (*Coffea arábica* L.) foram simulados e avaliados por Assad et al. (2004) para os Estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Os riscos climáticos para a cafeicultura nesses Estados foram definidos a partir dos valores de deficiência hídrica anual, temperatura média anual, e probabilidade de geadas, gerando um mapa de zoneamento dos riscos. Na simulação, com base nos mapas de temperatura (1°C, 3°C, 5,8°C), as evapotranspirações e valores de balanço hídrico foram recalculados. Os autores apontaram uma potencial redução de 95% da área apta ao cultivo

do café em Goiás, Minas Gerais e São Paulo, e de 75% no Paraná, sob um cenário de aumento de 5,8°C na temperatura. Com base nessa metodologia, impactos sobre a produção de milho foram também avaliados por Zullu Jr. et al. (2006). Segundo suas projeções, a produção de grãos diminuiria mais rapidamente em regiões com solos de textura arenosa do que nos de textura argilosa à medida que a temperatura aumentar. Com um aumento de 5,8 °C na temperatura, haveria uma redução drástica da aptidão para a produção de milho, independentemente da textura do solo. Ainda segundo os autores, aumentos na pluviosidade não seriam suficientes para amenizar os impactos associados aos aumentos nas temperaturas médias.

7.3. MODELO RICARDIANO

Sob outra abordagem metodológica, Alves e Evenson (1996) e Sanghi et al. (1997) estimaram o impacto da mudança climática global na agricultura brasileira usando o modelo *Ricardiano* (MENDELSON, NORDHAUS e SHAW, 1994). O modelo consiste em avaliar a influência de variáveis como produção, trabalho, fertilizantes, construções, estradas, pesquisa científica, adoção de tecnologia, extensão rural, e de variáveis climáticas (temperatura, pluviosidade, radiação solar, etc.) e edáficas (tipo de solo, declividade, textura, etc.), sobre a produtividade da terra, e por conseguinte, sobre o preço desta. O modelo *Ricardiano* analisa os valores da terra por meio de diferentes nas climáticas, associando estes valores com variáveis climáticas (temperaturas e precipitações) e outros fatores. Trata-se de uma aproximação de corte transversal (*cross-section*), que se baseia na hipótese formulada por David Ricardo, de que o valor da terra reflete o valor presente da produtividade esperada da terra no futuro. Os resultados são apresentados em termos da diferença entre o valor estimado da terra em um cenário climático futuro e o valor da terra no cenário atual. A partir dessa análise, seria possível estimar os impactos de adaptações dos produtores às alterações climáticas sobre a produção e a produtividade de estabelecimentos agrícolas. Segundo os autores, o impacto líquido da mudança do clima seria negativo para a agricultura brasileira, sobretudo para a Região Centro-Oeste, onde predominam os cerrados, enquanto a Região Sul seria moderadamente beneficiada pelo aquecimento.

Em continuação a esse trabalhos, recentemente, foi realizado um estudo em sete países da América do Sul (Argentina, Brasil, Chile, Colômbia,

Equador, Uruguai e Venezuela), com o objetivo de avaliar o impacto da mudança climática sobre a agricultura, bem como as vulnerabilidades e possíveis rumos de adaptação em cada país. Este estudo (*Climate and Rural Poverty: Incorporating Climate into Rural Development Strategies*) é parte de um projeto maior da *Yale School of Forestry and Environmental Studies* financiado pelo Banco Mundial e aplicado aos países do Cone Sul e Andinos da América do Sul. Nesse trabalho foram identificados impactos da variabilidade do clima e da mudança do clima sobre os recursos naturais e sobre a pobreza rural em regiões do Brasil. Também foram exploradas as adaptações que os fazendeiros já estão usando para adaptar-se ao clima e novas adaptações possíveis de serem adotadas tendo em vista cenários futuros. Os resultados indicaram que as mudanças na temperatura e na precipitação afetarão negativamente os valores de terra para produtores de pequena escala em 9-31%, e de produtores comerciais em 47-80% (MENDELSON et al., 2007).

7.4. EFEITO DA MUDANÇA DO CLIMA SOBRE PATÓGENOS

Mudanças do clima estão associadas à sensibilidade das plantas à umidade e respostas a patógenos. A mudança do clima pode levar a doenças emergentes por meio de alterações graduais do clima (por meio de alteração de vetores invertebrados ou aumentando estresses de temperatura e água nas plantas) e uma maior frequência de eventos de clima incomuns (tendência a tempo seco favorece insetos vetores e viroses, enquanto tempo úmido favorece patógenos fúngicos e bacterianos) (ANDERSON et al., 2004).

Em estudo sobre a sigatoka-negra da bananeira, usando mapas de distribuição da doença e cenários do IPCC, Ghini et al (2007) sinalizaram para uma redução da área favorável à doença no país, especialmente nos cenários A2 e B2¹. O estudo considerou a premissa de que o desenvolvimento da doença é favorecido por temperaturas entre 20°C e 30°C, e umidade relativa acima de 70%, de modo que regiões com temperaturas médias

¹ O cenário A2 é um cenário de elevadas emissões de gases de efeito estufa, isto é, assume a manutenção dos padrões atuais de emissões. Descreve um mundo futuro muito heterogêneo, alto crescimento da população humana, O desenvolvimento econômico é principalmente orientado regionalmente. O cenário B2 é um cenário de menores emissões, com características mais otimistas em relação ao cenário A2. Descreve um mundo no qual a ênfase está em soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. Apresenta moderado crescimento populacional, níveis intermediários de desenvolvimento econômico. É orientado para a proteção do meio ambiente e a equidade social, mas com foco nos níveis local e regional (IPCC, 2001c)

inferiores a 20 °C ou superiores a 30 °C ou umidade relativa média inferior a 70% foram consideradas desfavoráveis à doença.

Segundo Fernandes et al. (2004), o risco de incidência de *Fusarium* nas culturas de trigo é muito provável de aumentar sob mudança do clima no sul do Brasil e no Uruguai.

Poucos experimentos de mensuração em campo têm sido conduzidos no país com vistas à avaliação dos efeitos de mudança do clima sobre a agricultura, sendo os mesmos de grande importância para a validação de modelos de simulação utilizados para estimativa dos impactos nos solos agrícolas, culturas e atividades agropastoris.

8. ADAPTAÇÃO DA AGROPECUÁRIA À MUDANÇA DO CLIMA

A faixa de adaptabilidade fisiológica de espécies vegetais é ampla, o que fornece considerável capacidade de efeito tampão contra a variabilidade associada à mudança do clima. Por outro lado, é necessário ampliar o conhecimento sobre as potencialidades e as limitações dos sistemas de produção à mudança climática, considerando fatores determinantes da sustentabilidade agroclimática e grau de flexibilidade para tolerar as mudanças climáticas. Os fatores principais relacionados às plantas seriam as vias de assimilação de carbono, tolerância a estresses por altas temperaturas e períodos de seca, além do fotoperíodo, que poderia ser importante no caso da necessidade de migração das lavouras para diferentes latitudes. O tipo de solo, considerando-se suas características de estocagem de umidade, drenagem e risco à erosão, assim como manejo, também deve ser considerado.

A FAO (2003) identificou algumas ações destinadas à adaptação do setor agrícola à mudança do clima, como exemplo:

- formulação de mecanismos de apoio aos produtores de modo a auxiliá-los à adaptar-se à mudança do clima;
- manutenção de uma ampla base genética para culturas e desenvolvimento de variedades de culturas e raças de animais mais tolerantes à seca;

- melhoramento da resiliência de ecossistemas agrícolas pela promoção de práticas agroflorestais que utilizem e mantenham a diversidade biológica;
- melhorar a eficiência de uso da água e recarga de água subterrânea pela agricultura conservacionista;
- apoiar sistemas de pastagem e outros sistemas de produção animal, com atividades voltadas à produção de suplementos alimentares, serviços veterinários, e de suprimento de água, entre outras medidas.

A seguir, apresentam-se algumas estratégias de adaptação para sistemas agrícolas no Brasil, considerando o atual estágio de conhecimento.

8.1. ZONEAMENTO AGROCLIMATOLÓGICO

O zoneamento agroclimatológico é feito por meio da compilação de dados sobre clima, possíveis de serem obtidos de levantamentos em escala regional, com informações de temperatura e água requeridas para ótimo desenvolvimento de uma cultura. As informações geradas permitem estimar os riscos de produção de cada cultura servindo como orientação ao melhor uso do solo.

O uso dessa ferramenta tem sido importante para identificar as melhores áreas para cada tipo de cultura, permitindo maiores produtividades, como por exemplo ocorreu com o cultivo de arroz de terras altas no Estado do Mato Grosso, atualmente o segundo maior produtor de arroz do Brasil, trabalho que vem sendo conduzido em várias regiões dos Cerrados pela Embrapa Arroz e Feijão (www.cnpaf.embrapa.br). O zoneamento agroclimatológico permitirá, dessa forma, identificar áreas com maior vulnerabilidade à mudança do clima, assim como áreas que serão mais apropriadas para cada cultura em função do regime de chuvas e temperatura.

8.2. MELHORAMENTO VEGETAL

A temperatura e o regime de chuvas são as principais variáveis do clima que terão impacto na agricultura global devido às mudanças climáticas. Nesse sentido, o melhoramento vegetal é chave na adaptação das culturas às condições de estresse, que poderão ocorrer em maior intensidade em cenários futuros.

O estresse provocado pelas altas temperaturas, seja ele transitório ou contínuo, já afeta algumas regiões onde se pratica agricultura, inclusive no Brasil. Por meio da transferência entre indivíduos de características que garantem termotolerância, acredita-se ser possível superar o estresse térmico. O estresse por altas temperaturas pode ocorrer em diferentes fases de desenvolvimento das plantas, desde a germinação ao enchimento de grãos, o que alimenta o desafio para a pesquisa de controlar esta característica. Além disso, algumas espécies como a soja e feijão desenvolvem associações com bactérias do solo que nutrem a planta naturalmente. Essas associações também são afetadas pelas altas temperaturas. Diversos estudos vêm sendo conduzidos para seleção de variedades com potencial para tolerar os efeitos da temperatura, mas os avanços são lentos.

Algumas variedades que mostram tolerância à seca prolongada podem conter genes que garantem termotolerância, como deve ser o caso de algumas variedades de feijoeiro, especialmente plantados no nordeste brasileiro. O mapeamento dos genes e o desenvolvimento de técnicas que permitem sua transferência são objetivos prioritários para futuras pesquisas (WAHID et al 2007).

Quanto aos microrganismos, estudos envolvendo seleção de rizóbio capaz de nodular e fixar nitrogênio em condição de alta temperatura já permitiram o isolamento de estirpes eficientes para o feijoeiro (HUNGRIA et al 2000).

Além do impacto negativo das altas temperaturas, a seca é um dos estresses ambientais que mais afeta a produtividade das culturas no mundo. No entanto, o simples melhoramento das culturas para alta produtividade em condições livres do estresse hídrico já permite que as produtividades sejam mais elevadas quando as culturas passam por situações leves a moderadas de estresse (CATTIVELLI et al, 2008). Existem várias características nas plantas relacionadas ao estresse por déficit hídrico, e o melhoramento tradicional por cruzamentos entre indivíduos compatíveis é um caminho para se obter cultivares tolerantes a esse estresse. O cafeeiro da espécie robusta, por exemplo, possui características genéticas que lhe confere maior tolerância aos períodos de estiagem, e faz parte de pesquisas da Embrapa Recursos Genéticos para transferência dessas características ao cafeeiro da espécie arábica através de melhoramento convencional (Cenargen, Boletim Pecuário de 14/04/2007) Por outro lado, com os avanços

das técnicas moleculares, que permitiram o seqüenciamento genético de muitas espécies vegetais, foram identificados conjuntos de genes relacionados a características de tolerância a períodos de seca. O feijão-de-corda nordestino produz grande quantidade de um aminoácido chamado prolina, que dá à planta maior tolerância à seca e ao excesso de calor, cujos genes responsáveis foram isolados e agora fazem parte de estudos para transformação genética de culturas sujeitas ao estresse hídrico, tais como soja, milho, cana-de-açúcar etc. (ACT, 2007), com provável efeito positivo na termotolerância dessas espécies.

A Embrapa, em cooperação com o governo japonês, está testando uma nova variedade de soja que recebeu, através da biotecnologia, um gene que lhe dá maior capacidade de tolerar períodos mais secos (Figura 6) extraído da primeira espécie de planta a ter o genoma seqüenciado, denominada *Arabidopsis thaliana*. É uma planta herbácea da família das Brassicaceae, a que também pertence a mostarda. É um dos organismos modelo para o estudo de genética, em botânica, tendo um papel semelhante ao da drosófila, noutros tipos de pesquisa genética. As pesquisas ainda estão em andamento para avaliar o desempenho em condições de campo e possíveis impactos no ambiente, antes de ser liberada para uso comercial.

Figura 6. Soja com genes de tolerância a seca. Os quatro vasos à esquerda contêm o gene de tolerância, e os outros quatro vasos correspondem à soja comum.

Fotografia gentilmente cedida pelo Dr. Alexandre Nepomuceno, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR



8.3. MANEJO DE CULTURAS E SOLOS

Enquanto esforços são feitos para o melhoramento de plantas capazes de tolerar períodos anormais de altas temperaturas e estiagem, o manejo dos sistemas de produção pode contribuir de forma mais imediata para aliviar o problema. A cultura do café, por exemplo, é muito sensível a mudanças na temperatura, e segundo Assad et al. (2004), mais de 90% das áreas hoje utilizadas pela lavoura de café estariam comprometidas com uma elevação de cerca de 6 °C na temperatura média do ar. Uma possibilidade para atenuar este processo é a utilização de sistemas sombreados, tal como é feito na Costa Rica. Sob a copa das árvores as temperaturas seriam mais amenas, colaborando para a redução de riscos de perda de produtividade pelas altas temperaturas. Essa possibilidade já é tema de discussões para o futuro da cultura no País (artigo “Debate sobre arborização e mudanças climáticas traz alerta a cafeicultores” publicado em 21/11/2006 no Portal do Agronegócio – www.portaldoagronegocio.com.br), e já é implementada em fase experimental pela Embrapa em sistemas de produção de café orgânico (Figura 7), que conta com maior diversificação de espécies.

Figura 7. Cafeeiro sombreado em sistema orgânico, cultivado em consórcio com leguminosas arbóreas e bananeiras. Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ



A arborização é uma estratégia que pode ter benefícios para sistemas de produção de grãos e pastagens. Recentemente, a Embrapa vem investindo no desenvolvimento de sistemas silvipastoris e de produção integrada lavoura-pecuária-floresta. A presença das árvores no sistema de produção cria microclimas favoráveis não somente para as forrageiras, mas também para os animais, que também poderão ser afetados por ondas de calor causadas pela mudança do clima.

Outro sistema de grande impacto na economia de água do solo é o plantio direto (Figura 8). É um sistema que é utilizado em quase metade da área de produção de grãos no país, e é caracterizado pela ausência de movimentação do solo para o plantio, e por isso fica coberto por resíduos de colheita. O plantio direto passou a substituir o sistema convencional de preparo do solo como forma de conter o escoamento superficial da água (*run-off*) que arrastava grande quantidade de solo provocando a erosão. Segundo dados compilados por De Maria (1999), o plantio direto pode diminuir em 20% a perda de água por escoamento, devido à menor velocidade de escoamento pela presença dos resíduos sobre o solo. Além

Figura 8. Plantio direto na palha: redução das perdas de água por escoamento superficial e maior preservação de água no solo pela menor evaporação promovida pela cobertura de resíduos



disso, a presença de resíduos sobre a superfície do solo diminui a evaporação e relativamente mais água fica disponível para as plantas (SILVA et al, 2005), aumentando as chances da lavoura superar períodos de estiagem. No Brasil, estima-se que esta prática seja atualmente adotada em mais de 20 milhões de hectares, principalmente nas Regiões Sul e Centro-Oeste (CERRI et al., 2007).

9. RECOMENDAÇÕES PRELIMINARES DE POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO PARA O SETOR AGROPECUÁRIO À MUDANÇA DO CLIMA

Devido à necessidade de tomada de decisão frente a possíveis mudanças do clima, através de formulação de políticas públicas, é fundamental que os modelos de previsão regionais sejam aperfeiçoados, não somente em relação a ocorrências climáticas futuras, mas que sejam acompanhadas das incertezas, ou das probabilidades de perdas associadas. Opções de inação, mitigação e adaptação são decorrentes das expectativas e magnitude dos efeitos anormais do clima.

1) Estabelecimento e implantação de sólidos programas de P&D sobre avaliação de impactos da mudança do clima na agricultura e possíveis medidas de adaptação, considerando as principais culturas agrícolas e forrageiras, e incluindo eventos extremos significantes para a agricultura. Para isso será fundamental promover e fomentar a capacitação técnica sobre avaliação de riscos em função da mudança do clima, tendo em vista diferentes abordagens metodológicas aplicáveis às estimativas de vulnerabilidade.

Efeitos de crescentes concentrações de CO₂ no sistema solo-planta de ecossistemas agrícolas existentes no país, aliadas a aumentos previstos de temperatura, balanço de água e nutrientes, carecem de estudo no país. Pesquisas de campo e de laboratório devem ser fomentadas, de modo a gerar conhecimento sobre as respostas reais dos sistemas à mudança do clima, dando suporte a modelos de previsão.

Outras ações de P&D incluem iniciativas para implementar e melhorar bases de dados e informações socioeconômicas, meteorológicas, ambientais, agrícolas e demográficas, de modo a propiciar avaliações mais consistentes de impactos da mudança do clima na segurança alimentar e nas propriedades rurais do país, visando oportunidades para a redução da vulnerabilidade da pobreza rural que levem a ações ao nível local sobre medidas de mitigação

e de adaptação da mudança climática. Estudos que trabalhem a sinergia de práticas de mitigação e de adaptação deveriam ser apoiados.

2) Extensão rural com vistas à conscientização de produtores rurais sobre potenciais impactos de mudança do clima, e à orientação sobre medidas de adaptação.

3) Desenvolvimento de serviços de alerta quanto à ocorrência de eventos extremos e de variação climática.

4) Adoção de incentivos para a manutenção e ampliação de áreas florestadas, corredores florestais, sistemas integrados de lavoura-floresta, além do aumento da fiscalização sobre o uso do solo sob termos legais.

5) Desenvolvimento e adoção de tecnologias de gerenciamento de uso das terras e de melhoramento vegetal.

6) Adoção de incentivos para a manutenção e ampliação de áreas florestadas, corredores florestais, sistemas integrados de lavoura-floresta, além do aumento da fiscalização sobre o uso do solo sob termos legais.

7) Incentivo a sistemas de produção mistos (ex. sistema integrado de lavoura-pecuária-floresta).

8) Estímulo a projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) com vistas ao desenvolvimento sustentável e impacto positivo nas comunidades locais. Em face do perfil de emissões atuais do Brasil, é recomendável a discussão e adoção de um novo modelo de relação entre os principais interessados no processo de MDL: agentes de governo, agricultores e proprietários de terras e empresas privadas. O governo federal deveria incentivar projetos contendo atividades de uso da terra para MDL, definindo políticas claras que minimizem riscos e promovam o envolvimento de todos os atores no processo. A implementação mais abrangente de uma estratégia de cunho econômico, como os créditos de carbono ou pagamento de serviços ambientais, pode ser um caminho interessante.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA CIÊNCIA E TECNOLOGIA - ACT. Revolução em marcha nos laboratórios. *Clipping Online: transgênicos*, 22 out. 2007. Disponível em: <www.agenciact.mct.gov.br>. Acesso em: 2007.

AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? a meta-analysis of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production of rising CO₂. *New Phytology*, n. 165, p. 351-372, 2005.

ALVES, D. C. O.; EVENSON, R. E. Global warming impacts on Brazilian agriculture: estimates of the Ricardian model. In: CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL METRICS IN BRAZIL, 1996, São Paulo, SP. *Abstracts...* São Paulo: USP, 1996. p. B30-B31.

ANDERSON, P. K. et al. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, v. 19, n. 10, p. 535-544, 2004.

ARJONA, A. A.; DENBOW, D. M.; WEAVER JR., W. O. Effect of heat stress early in life on mortality of broilers exposed to high environmental temperatures just prior to marketing. *Poultry Science*, v. 67, n. 2, p. 226-231. 1988.

ASSAD, E. D. et al. Mudanças climáticas e agricultura: uma abordagem agroclimatológica. *Ciência e Ambiente*, v. 34, p. 169-182. 2007.

_____. Impacto das mudanças climáticas no zonamento agroclimático do café no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Variabilidade climática e agricultura do Rio Grande do Sul. In: FEDERAÇÃO DOS CLUBES DE INTEGRAÇÃO E TROCA DE EXPERIÊNCIA-FEDERACITEA. (Org.). *As estiagens e as perdas na agricultura: fenômeno natural ou imprevidência?*. 1. ed. Porto Alegre: Ideograf Editora Gráfica, 2005. p. 43-59.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2007. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: nov. 2007.

CAHANER, A.; DEEB, N.; GUTMAN, M. Effects of the plumage-reducing naked neck (Na) gene on the performance of fast-growing broilers at normal and high ambient temperatures. *Poultry Science*, v. 72, n. 5, p. 767-775, 1993.

CATTIVELLI, L. et al. Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research*, v. 105, p. 1-14. 2008.

CERRI, C. E. P. et al. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. *Scientia Agricola*, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CGIAR. *CGLAR Mid-Term Meeting 1998*: preliminar end-of-meeting report. [S.l.], 1998.

DAVIDSON, E. A; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, v. 440, p. 165-173, 2006.

DE MARIA, I. C. Erosão e terraços em plantio direto. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p 17-21, 1999.

FABRICIO, J. R. Influência do estresse calórico no rendimento da criação de frangos de corte. In: CONFERÊNCIA APINCO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AVÍCOLAS, 1994, Santos. *Anais...* Campinas: FACTA, 1994. p.129-136.

FEARNSIDE, P. M. Biodiversity as an environmental service in Brazil's Amazonian forest: risks, value and conservation. *Environmental Conservation*, v. 26, p. 305-321, 1999.

_____. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazonica*, v. 36, p. 395-400. 2006.

FERNANDES, J. M. et al. Modelling fusarium head blight in wheat under climate change using linked process-based models. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FUSARIUM HEAD BLIGHT, 2., Michigan. *Proceedings...* Michigan: Michigan State University, [s.d.]. p. 441-444.

FISCHER, G. et al. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v. 360, p. 2067-2083, 2005.

FUHRER, J. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 97, p.1-20, 2003.

GHINI, Raquel et al. Análise de risco das mudanças climáticas globais sobre a sigatoka-negra da bananeira no Brasil. *Fitopatologia Brasileira*, v. 32, n. 3, p.197-204, jun. 2007.

GREENLAND, D. J.; WILD, A.; ADAMS, D. Organic matter dynamics in soils of the tropics: from myths to complex reality. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. A. (Org.). *Myths and science of soils of the tropics*. [S.l.: s.n.], 1992. p. 17-33. (SSSA Special Publication, n. 29).

HANSEN, P. J. Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Animal Production Science*, v. 82-83, p. 349-360, 2004.

HOWDEN, S. M.; HALL, W. B.; BRUGET, D. Heat stress and beef cattle in australian rangelands: recent trends and climate change: people and rangeland: building the future. In: INTERNATIONAL RANGELAND CONGRESS, 6., 1999, Austrália. *Proceedings...* Australia: [s.n.], 1999. p. 43-45.

HUNGRIA, M. et al. Isolation and characterization of new efficient and competitive bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobia from Brazil. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 32, n. 11-12, p. 1515-1528, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *Climate change 2001: the scientific basis*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2001a. 944 p. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

_____. *Technical summary: climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. [S.l.: s.n.], 2001b. 56 p. A report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

JOBBAGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecologic Applications*, v. 10, p. 423-436, 2000.

JONES, P. G.; THORNTON, P. K. The potential impacts of climate change on maize production in África and Latin América in 2055. *Global Environmental Change*, v. 13, p. 51-59, 2003.

KARNOSKY, D. F. Impacts of elevated atmospheric CO₂ on forest trees and forest ecosystems: knowledge gaps. *Environment International*, v. 29, p. 161-169, 2003.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Rima Editora, 2000. 531 p.

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

MARENGO, J. 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*. Brasília: MMA, 2006. 212 p. (Biodiversidade, 26).

MELILLO, J. M. et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, v. 298, p. 2173-2176, [s.d.].

MENDELSON, R.; DINAR, A.; WILLIAMS, L. Impacts of climate change on poor countries. In: AEA MEETING, 2004, San Diego, CA. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2004c.

_____; ÁVILA, A. F. D.; SEO, S. N. *Proyecto: incorporación del cambio climático a las estrategias de desarrollo social: síntesis de los resultados em América Latina*. Montevideo: Procisur, 2007. 48 p.

_____; NORDHAUS, W.; SHAW, D. Measuring the impact of global warming on agriculture. *American Economic Review*, n. 84, p. 753-771, 1994.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. *Parcerias Estratégicas*, n. 12, p. 239-258, 2001.

_____; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, v. 4, p. 957-988, 1991.

NOWAK, R. S. et al. Tansley review: functional responses of plant to elevated atmospheric CO₂: do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions?. *New Phytology*, v. 162, p. 253-280, 2004.

OREN, R. et al. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere. *Nature*, v. 411, p. 469-472, 2001.

PARRY, M. L. et al (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 976 p. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

_____. Effects of climate change on global production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, v. 14, p. 53-67, 2004.

PERCY, K. E. et al. Altered performance of forest pests under atmospheres enriched by CO₂ and O₃. *Nature*, v. 420, p. 403-407, 2002.

RAMANKUTTY, N. et al. The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. *Global Ecology & Biogeography*, v. 11, p. 377-392, 2002.

SANGHI, A. et al. Global warming impacts on Brazilian agriculture: estimates of the Ricardian model. *Economia Aplicada*, v. 1, n. 1, p. 7-33, 1997.

SILVA, M. A. S. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciência Rural*, v. 35, n. 3. p. 544-552, 2005.

SIQUEIRA, O. J. W.; SALLES, L. A. B.; FERNANDES, J. M. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. V. R.; MIGUEZ, J. D. G. (Ed.). *Mudanças climáticas globais e a agricultura brasileira*. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 33-63.

SIQUEIRA, O. J. F. de; FARIAS, J. R. B; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate change for brazilian agriculture: applied simulation studies for wheat, maize and soybeans. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 2, p. 115-129, 1994.

TEIXEIRA, M. A.; MURRAY, M. L.; CARVALHO, M. G. Assessment of land use and land use change and forestry (LULUCF) as CDM projects in Brazil. *Ecological Economics*, v. 60, p. 260-270, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09218009>>. Acesso em: 2008.

VIUTOUSEK, P.M.; HOWARTH, R.W. Nitrogen limitations on land and in the sea: how can it occur?. *Biogeochemistry*, v. 13, p. 87-115, 1991.

WAHID, A. et al. Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany*, v. 61, p. 199-223, 2007.

YADAV, V.; MALANSON, G. Progress in soil organic matter research: litter decomposition, modeling, monitoring and sequestration. *Progress in Physical Geography*, v. 31, p. 131-154. 2007.

ZHAO, Y. et al. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the humid and sub-humid tropics. *Climate Change*, v. 70, p. 73-116, 2005.

ZULLU JR., J.; Pinto, H. S.; Assad, E. D. Impact assessment study of climate change on agricultural zoning. *Meteorology Applied*, p. 69-80, 2006.

Resumo

A agricultura é uma atividade amplamente dependente de fatores climáticos, cujas alterações podem afetar a produtividade e o manejo das culturas, com consequências sociais, econômicas e políticas.

Segundo as previsões de longo prazo a partir de modelos climáticos globais do IPCC, as regiões tropicais e subtropicais seriam as mais afetadas pela mudança do clima. Aponta-se também que países em desenvolvimento poderão ser mais vulneráveis às alterações climáticas, devido à deficiência de mercados, à predominância de atividades agrícolas, entre outros fatores. Países desenvolvidos apresentariam mais opções efetivas para a adaptação.

Em termos nacionais, os impactos na agricultura vêm sendo estimados com base em modelos que utilizam cenários futuros de clima, mas com manejos e cultivares atuais. Estima-se que a produção de grãos deverá ser reduzida, principalmente em relação às culturas de café, arroz, feijão, trigo e milho. A Região Nordeste seria mais vulnerável aos efeitos da mudança do clima, especialmente pelas reduções na produção de milho, e as regiões Centro e Centro-Sul seriam mais vulneráveis às reduções na produção de trigo. Para a pecuária são raras as informações, porém é muito provável que os efeitos diretos das altas temperaturas sobre os animais e disponibilidade de água para os mesmos e para a produção da pastagem causem importantes perdas para o país. No entanto, o melhoramento genético de animais e plantas para maior resistência aos estresses climáticos, associados a um manejo diferenciado, poderão aliviar os efeitos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola no país.

Incertezas permanecem como desafios para a elaboração de futuros cenários, como a magnitude e a persistência de efeitos de crescentes concentrações de CO₂ sobre a produção agrícola sob condições realísticas de produção, as mudanças potenciais nas perdas por doenças de plantas e animais, a variabilidade espacial nas respostas à mudança do clima, e os efeitos de mudanças na variabilidade climática e os eventos extremos sobre a atividade agropecuária.

As condições de adaptação de estabelecimentos agrícolas à mudança do clima podem ser bem variáveis, colocando-os em posições mais ou menos vulneráveis, em função de diferentes cenários climáticos. A ameaça da mudança climática global sobre a agricultura traduz-se, principalmente, na redução da produtividade das culturas e na disponibilidade de áreas apropriadas para cultivos.

Sem uma avaliação bem fundamentada sobre os possíveis impactos da mudança do clima na agricultura, será difícil avaliar precisamente quais medidas de adaptação poderiam ser adotadas pelo setor agropecuário, muito embora este setor esteja historicamente habituado a enfrentar alterações climáticas e a conviver com riscos de produção.

Finalmente, algumas recomendações foram feitas relativas à elaboração e adoção de políticas e estratégias de adaptação a essas mudanças na área de solos e agropecuária.

Palavras-chave

Mudança do clima. Agricultura. Produção. Agropecuária. Impactos.

Abstract

Agriculture is an activity highly dependent on climatic factors, whose alteration may affect crop yield and management, incurring social, economic and political consequences.

According to the long term predictions by global climatic models of the IPCC, tropical and sub-tropical areas would be the most affected by climate change. It is also pointed out that developing countries can be more vulnerable to the climatic alterations due to market restrictions and to the predominance of agricultural activities, among other factors. Developed countries would have more effective adaptation options.

In national terms, the impacts in the agriculture are based on models that use future sceneries of climate, but with actual crop varieties and management. Grain production is estimated to decrease, principally for the crops of coffee, rice, beans, wheat and maize. The Northeast region will be the most vulnerable to climate change, especially due to the impacts on the maize crop, whilst the South and Central regions of Brazil would suffer from wheat yield decrease.

For livestock there is scarce information, but it is probable that the direct effects of high temperatures on animals and the diminution in water availability for the animals and pasture will cause important losses to the Country. However, in the future, the genetic improvement of animals and plants for increasing resistance to the climatic stresses, associated to a better management, may relieve the effects of climatic changes.

The adaptation capability of agricultural establishments to the climate change can be well variable, putting them more or less vulnerable in function of different climatic sceneries. The threat of a global climate change on agriculture means, principally, the reduction of crop yield and availability of suitable areas for cultivation.

Uncertainties still remain as challenges for the elaboration of futures sceneries. They can be related to the magnitude and persistence of effects due to increasing concentrations of CO₂ on realistic crop development, the potential changes in losses due to diseases of plants and animals, the spatial variability of impacts due to climate change, and the variable effects of climate changes and extreme events on agricultural activity.

Without an evaluation well sustained about the possible impacts of climate change on the agriculture, it will be difficult to evaluate precisely adaptation strategies that could be adopted by the agricultural sector, even though it is a sector historically habituated to face climatic alterations and to experience yield risks year after year.

Finally, some preliminary recommendations were made in terms of policies and strategies of adaptation for the agricultural sector to climate change.

Keywords

Climate change. Agriculture. Production. Life stock. Impacts.

Os autores

MAGDA APARECIDA DE LIMA é ecóloga, doutora em Geociências, e pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente. Coordena a rede de pesquisas Agrogases na Embrapa, onde lidera o Projeto “Dinâmica de Carbono e Gases de Efeito Estufa em Sistemas de Produção Agropecuária, Florestal e Agroflorestal do Brasil”.

BRUNO JOSÉ RODRIGUES ALVES é doutor em Matéria Orgânica do Solo e pesquisador da Embrapa Agrobiologia.

Análise da vulnerabilidade da biodiversidade brasileira frente às mudanças climáticas globais

*Vanderlei Perez Canhos
Marinez Ferreira de Siqueira
Alexandre Marino
Dora Ann Lange Canhos*

1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS E O IMPACTO NOS ECOSISTEMAS NATURAIS DA AMÉRICA DO SUL

O quarto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (R4 IPCC, 2007) descreve os avanços na avaliação do impacto dos fatores humanos e naturais nas mudanças climáticas. O termo mudança do clima usado no quarto relatório do IPCC é referente às mudanças climáticas ao longo do tempo, devidas à variabilidade natural e decorrentes da atividade humana. Essas análises são baseadas nos processos climáticos e em estimativas da mudança climática projetada para o futuro. O relatório, além de incorporar os dados das últimas avaliações do IPCC, inclui desenvolvimentos associados aos últimos seis anos de pesquisa do Painel, e portanto está baseado em dados recentes e abrangentes, e em análises mais sofisticadas, permitindo uma melhor compreensão dos processos e simulações de modelos, e uma análise mais robusta das faixas de incertezas (ALLEY et al. 2007).

Os indicadores de aquecimento global são agora inequívocos, e estão evidenciados nas observações de aumento das temperaturas médias globais do ar e dos oceanos, do derretimento generalizado das calotas polares acarretando a elevação do nível médio do mar em escala global. Observações de mudanças do clima, em escalas continental, regional e da bacia oceânica, incluem mudanças na temperatura, mudanças generalizadas na quantidade de precipitação, na quantidade de gelo do Ártico, na salinidade do oceano, nos padrões de vento e na ocorrência mais acentuada de eventos climáticos extremos que incluem secas, precipitação forte, ondas de calor e na maior ocorrência de ciclones tropicais de maior intensidade.

O aquecimento global é consequência direta do efeito estufa. De todos os gases responsáveis pelo efeito estufa (dióxido de carbono, gás metano e óxido nitroso), o dióxido de carbono é o mais importante para o aquecimento global. Dada a importância destacada do dióxido de carbono, os cenários climáticos são construídos com base principalmente em estimativas de níveis futuros de emissão deste gás.

A América do Sul é uma região altamente heterogênea em termos climáticos devido a sua grande amplitude latitudinal, que se estende da região tropical do Hemisfério Norte até altas latitudes no Hemisfério Sul. Além disso, a região é afetada fortemente por características topográficas extremas, como a presença dos Andes (GRIMM e NATORI 2006). O relatório do IPCC sobre a região da América do Sul e Caribe mostra uma série de evidências do aumento de eventos climáticos extremos e de mudanças no clima. As previsões do relatório sinalizam para a diminuição da diversidade de espécies de plantas e animais, com mudanças nas composições dos ecossistemas e na distribuição dos biomas. Prevê também o degelo de áreas glaciais tropicais em um futuro próximo (2020-2030) e o aumento da desertificação e aridez em outras regiões. Essas mudanças resultarão em efeitos drásticos sobre pessoas, populações, recursos naturais e atividades econômicas, com o aumento de pragas agrícolas e emergência de doenças infecciosas.

O relatório do IPCC de 2007 indica um impacto particularmente severo na região amazônica. A susceptibilidade a incêndios será maior em função das secas relacionadas ao El Niño e as mudanças no uso da terra (desmatamento, corte seletivo de madeira e fragmentação florestal).

As áreas costeiras de mangue, localizadas em áreas litorâneas baixas, serão muito vulneráveis ao aumento do nível do mar, aumento de temperatura e a furacões mais frequentes e mais intensos.

Para a região Sudeste do Brasil, Paraguai, Uruguai, Pampas Argentinos e algumas partes da Bolívia prevê-se um aumento na precipitação, com o impacto direto no uso da terra, culturas agrícolas e na frequência e intensidade das inundações.

Para a região sul do Chile, sudoeste da Argentina, sul do Peru e oeste da América Central esperam-se um declínio da precipitação.

Estudos utilizando cenários A2¹ para o período de 2071-2100, mostram o aumento da precipitação na região sudeste da América do Sul em todas as estações do ano e uma redução de precipitação ao sul dos Andes do outono até a primavera (GRIMM e NATORI, 2006).

2. VULNERABILIDADE DE ECOSISTEMAS BRASILEIROS FACE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

Várias publicações recentes fazem previsões do impacto das mudanças climáticas com base em modelos climáticos para a América do Sul (SALAZAR et al. 2007) e mais especificamente para a Amazônia (NOBRE et al. 2007). Análises baseadas em processos de desmatamento para florestas tropicais (GULLISON et al. 2007) e análises geradas a partir da utilização do SimAmazônia, com modelos baseados em dados ambientais e econômicos para a Amazônia², são complementares na avaliação do impacto das mudanças climáticas na biodiversidade, .

2.1. ANÁLISES BASEADAS EM MODELOS CLIMÁTICOS

Os modelos climáticos com base na projeção das mudanças climáticas para as várias regiões auxiliam na construção de cenários de impacto sobre a vegetação (bioma) como um todo. Esses cenários partem do pressuposto que os novos valores climáticos seriam incompatíveis com a vegetação local (atual). Embora os autores salientem que ainda é difícil projetar o impacto do aquecimento global, pois os modelos ainda apresentam grandes divergências de resultados, há um consenso entre os resultados para algumas das regiões analisadas. Dos 15 cenários projetados para 2100, dez apontam para a desertificação ou a semi-desertificação da caatinga, indicando a probabilidade do estabelecimento de um deserto ocupando uma área equivalente à metade do semi-árido brasileiro. Nas análises sobre a Amazônia, mais de 75% dos modelos convergem e indicam que é provável que o sudeste da Amazônia, principalmente as matas do Estado do Pará, sofram um processo de savanização. As projeções indicam uma redução de 18% das áreas cobertas por florestas tropicais até o final deste século, com o aumento de 30,4% das áreas cobertas por savanas, segundo o cenário A2 do IPCC.

¹ Para uma explicação básica sobre os diferentes cenários preparados pelo IPCC veja <http://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/sres/index.html>

² <http://www.csr.ufmg.br/simamazonia/>

De acordo com Marengo (2006), com base nos mapas dos cenários futuros de clima (A2 e B2), as projeções climáticas futuras ainda apresentam dificuldades com relação aos padrões de chuva. Já para a temperatura todos os modelos mostram um aquecimento sistemático. O relatório ainda indica a Amazônia, o Nordeste e o Sul do Brasil como as regiões onde os modelos apresentaram maiores variações.

As incertezas sobre as mudanças climáticas devem-se principalmente à incerteza sobre os cenários futuros de emissões dos gases de efeito estufa. Dependendo da quantidade de gases emitidos até 2100, a temperatura global média da superfície pode subir de 1,5°C a 5,5°C. Outra fonte de incerteza é a dificuldade de se construir cenários do padrão de chuvas, tornando o que dificulta a realização de estudos de impacto onde a pluviosidade é parâmetro determinante. Outros fatores podem ter um impacto ainda não dimensionado no padrão de chuvas, como por exemplo, o desmatamento em grande escala. Portanto, o impacto das mudanças climáticas sobre espécies com padrão de distribuição associado a disponibilidade de água e estações climáticas, precisa ser analisado com cautela.

A relevância desses estudos está na regionalização das previsões climáticas, permitindo análises em escala mais finas. Para a Amazônia, cinco modelos apresentaram menos chuvas que o presente, sugerindo que a estação seca no futuro, para os cenários A2 e B2 pode ser maior que no clima atual. Para o Nordeste, a situação é ainda mais dramática. Os diferentes modelos mostram resultados bastante antagônicos em relação à precipitação, sendo que dois modelos apresentam para os cenários (A2 e B2) menos chuva durante a estação chuvosa e uma estação seca mais longa. Para a Bacia do Prata os modelos divergem bastante, sendo que dois deles simulam uma estação seca mais longa com um adiamento do início da estação chuvosa em até dois meses (MARENGO 2006).

2.2. ANÁLISES BASEADAS EM MODELOS SOCIOECONÔMICOS

De acordo com Gullison e colaboradores (2007), caso seja mantido o ritmo de desmatamento, a destruição das florestas tropicais deverá lançar uma quantidade adicional de 87 a 130 bilhões de toneladas de carbono até 2100. Esse volume equivale a mais de uma década de emissões causadas por combustíveis fósseis. O desmatamento de florestas tropicais lançou na atmosfera cerca de 1,5 bilhão de toneladas de carbono por ano durante a

década de 1990 (o equivalente a 20% das emissões antrópicas de gases causadores do efeito estufa). Segundo o IPCC, será necessário reduzir o desmatamento em pelo menos 50% até 2050, e manter essa taxa até 2100 para manter o volume de CO₂ na atmosfera em 450 partes por milhão. Acima desse limite o aquecimento ultrapassará o patamar de 2°C agravando os problemas em escala global.

A partir de dados ambientais e econômicos, o SimAmazônia permite criar modelos digitais detalhados e complexos de evolução ambiental de uma região específica. A base de dados do SimAmazônia utiliza informações do censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (Prodes), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), e mapas de aspectos físicos e viários, com as estradas vicinais da região. Análises feitas com o SimAmazônia estão subsidiando a formulação de políticas públicas para a Região Amazônica, com vistas à valoração dos serviços ambientais, combate ao desmatamento e redução das emissões de carbono na atmosfera. Em condições ideais, de acordo com dados do SimAmazônia, a região poderá vender cerca 17 bilhões de toneladas de carbono que potencialmente iriam para a atmosfera, até 2050. Seria como poupar quatro anos das emissões globais de poluição e ofereceria uma alternativa para a Amazônia chegar em 2050 com 4,5 milhões de km² de floresta intacta. Esse cenário mostra as vantagens de se preservar a floresta ao invés de transformá-la em pastagens de baixa rentabilidade. O cenário de *business-as-usual* (negócios de sempre) sinaliza que a maior floresta tropical do planeta até 2050 poderá ser reduzida a pouco mais da metade de sua área original em decorrência da expansão agropecuária, da extração de madeira e da construção e pavimentação de estradas. Sobrariam 3,2 milhões dos 5,4 milhões de km² de floresta encontrados atualmente nos nove países amazônicos. A destruição e a fragmentação das matas colocariam em risco a existência de centenas de espécies de animais incluídos na simulação. Mais de 40% das áreas em que elas vivem desapareceriam, especialmente na Amazônia Oriental, a mais sujeita à abertura de estradas e ao desmatamento. Entre os primatas, pelo menos 35 espécies perderiam de 60% a 100% de seus habitats. O cenário mostra ainda que oito das 12 maiores bacias hidrográficas poderão perder mais da metade da cobertura florestal até 2050.

O cenário de “Governança” (no qual a simulação prevê a desaceleração do desmatamento devido à progressiva implantação de políticas públicas³) aponta caminhos que poderão reduzir à metade a destruição promovida pela expansão da fronteira agrícola. A simulação projeta uma desaceleração do desmatamento ao longo do tempo devido à progressiva implantação de áreas protegidas. No máximo 50% das matas privadas seriam derrubadas se toda a floresta recebesse proteção governamental contra invasões e depredações.

O estudo aponta que incentivos fiscais e financeiros que estimulam proprietários a manter reservas florestais em áreas privadas são essenciais para chegar ao cenário “Governança”, além de investimentos para manter intactas as áreas protegidas por lei.

Outro importante estudo sobre desenvolvimento e conservação na Região Amazônica é da série “Advances in Applied Biodiversity Science” (KILLEEN 2007) no qual são discutidos cenários envolvendo avanços da fronteira agrícola, desmatamento, mudanças climáticas, queimadas, biocombustíveis, mineração, energia hidrelétrica, entre outros, sob um ponto de vista social, econômico e ambiental.

3. VULNERABILIDADE DAS ÁREAS PRIORITÁRIAS DE CONSERVAÇÃO NO BRASIL

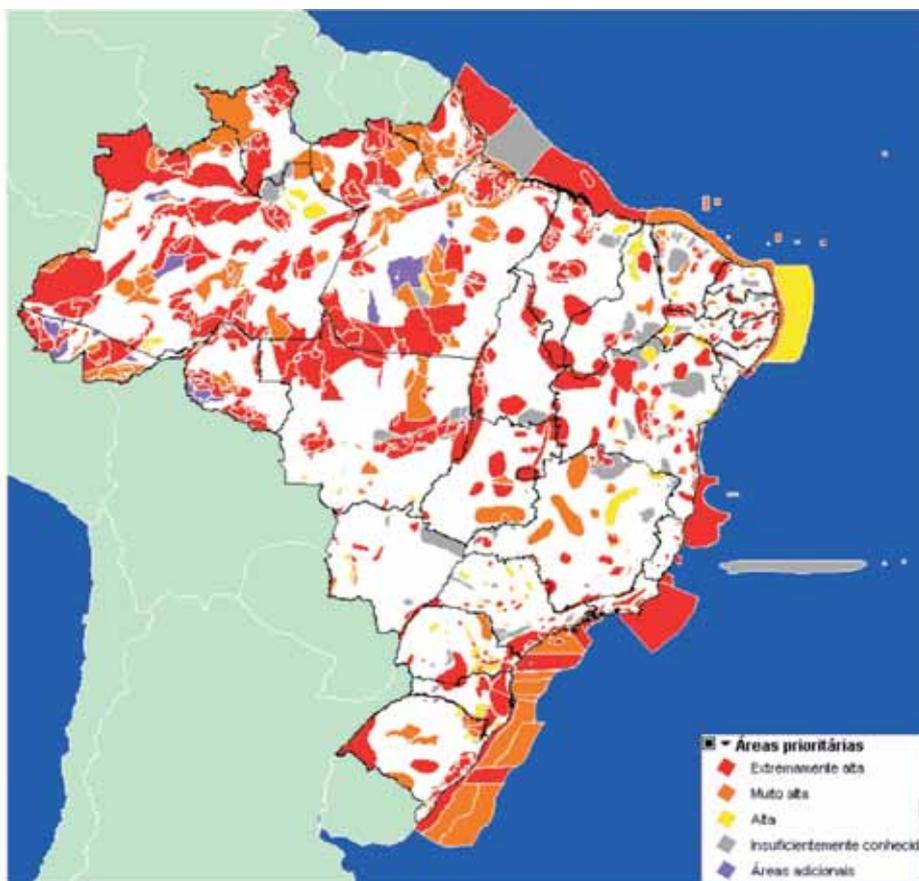
No Brasil, o principal esforço para a definição de áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade é resultante do projeto de “Ações Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade dos Biomas Brasileiros”⁴. Esse projeto, implementado ao longo da década de 1990, foi coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente e desenvolvido em colaboração com a Conservation International, Funatura, Fundação Biodiversitas e contou com a participação de especialistas das principais instituições do país. Nesse esforço foram realizados workshops para discutir e definir prioridades de conservação para Cerrado e Pantanal, Zona Costeira e Marinha, Floresta Amazônica, Floresta Atlântica e Campos Sulinos, e Caatinga. A iniciativa envolveu cerca de mil especialistas em ecologia, botânica, zoologia e disciplinas afins, para discutir e definir as prioridades de conservação dos principais biomas brasileiros. Foram preparados mapas-base das regiões a

³ <http://lba.cptec.inpe.br/lba/site/?p=oportunidade&t=0&s=5&lg=&op=1247>

⁴ <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/probio/sub.html>

serem analisadas, como plataforma para a inclusão de dados de distribuição de áreas naturais, áreas de conservação existentes, subdivisões físicas e políticas, estatísticas demográficas e econômicas, e dados de fauna e flora compilados por consultores. O mapa resultante dos workshops temáticos com foco nos diferentes biomas brasileiros está apresentado na Figura 1.

Figura 1. Mapa síntese das prioridades de conservação para os principais biomas brasileiros



O método utilizado foi adequado para identificar áreas prioritárias de conservação tendo por base uma avaliação conjunta de informações biológicas e de condicionantes da atividade humana, levando-se em conta os dados e metodologias de análise disponíveis na época em que o projeto foi realizado (1995 a 2000). Os esforços para a definição de prioridades

foram baseados mais no conhecimento e na avaliação de especialistas do que no uso de ferramentas de análise de dados primários sobre a biodiversidade do país. Como a iniciativa não considerou cenários futuros como o impacto e vulnerabilidade a mudanças climáticas, é importante que as áreas prioritárias sejam reavaliadas através de metodologias mais avançadas e adequadas, se possível utilizando dados sobre biodiversidade que incorporem os fatores de mudanças climáticas e não somente o conhecimento de especialistas. O procedimento a ser adotado e a análise dos cenários produzidos é que irão depender do conhecimento de especialistas.

Em uma escala mais local, um importante e recente esforço em indicar áreas prioritárias para conservação, avaliar áreas para restauração ambiental e indicar lacunas de conhecimento foi o workshop: “Diretrizes para Conservação e Restauração da Biodiversidade no Estado de São Paulo” realizado em 2007. O esforço envolveu a contribuição de pesquisadores, institutos de pesquisa, universidades, ONGs e entidades governamentais estaduais, e foram utilizados dados da rede speciesLink⁵ e Sinbiota⁶ e métricas de paisagem.

4. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA BIODIVERSIDADE FACE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

Estudos de modelagem de nicho ecológico associados a projeções de mudanças climáticas, indicam um risco significativo de extinções e de alterações na distribuição de muitas espécies (HUNTLEY et al. 1995, MAGANA et al. 1997, SALA et al. 2000, PETERSON et al. 2001, BERRY 2002, PETERSON et al. 2002, OBERHAUSER e PETERSON 2003, SIQUEIRA e PETERSON 2003, MARTÍNEZ-MEYER et al. 2004, THOMAS et al. 2004, THUILLER et al. 2005, ARAÚJO et al. 2006, HARRISON et al. 2006, PEARSON et al. 2006, THUILLER et al. 2006), sendo que alguns estudos indicam que a biodiversidade já está apresentando alterações em resposta às mudanças climáticas (PARMESAN e YOHE 2003, ROOT et al. 2005, WALTHER et al. 2005, LAVERGNE et al. 2006).

Thomas et al. (2004) fizeram previsões de taxas de extinção, em média, superiores a 20% para 1103 espécies analisadas (incluindo mamíferos, aves,

⁵ <http://splink.cria.org.br/>

⁶ <http://sinbiota.cria.org.br/>

anfíbios, répteis, plantas, borboletas e outros invertebrados). Esse estudo, baseado em três cenários climáticos, mostra taxas de extinção variando de 15% para o cenário mais otimista (mínimas alterações), 24% para o cenário intermediário e 35% para o cenário mais pessimista (máximas alterações).

O estudo (HARRISON et al. 2006) traz uma análise do impacto de mudanças climáticas sobre 47 espécies europeias (incluindo plantas, insetos, aves e mamíferos) mostra que diferentes espécies apresentam diferentes respostas às mudanças climáticas. Algumas espécies apresentaram ganho de área enquanto outras perderam espaço. Outros estudos sobre biodiversidade europeia confirmaram a possibilidade de ganho de área (ARAÚJO et al. 2006). Nesse estudo foram analisadas 42 espécies de anfíbios e 66 espécies de répteis. As projeções utilizaram quatro cenários diferentes para 2050 (A1, A2, B1 e B2). Os resultados obtidos para a média dos valores de projeções dos cenários utilizados mostraram que 69% dos anfíbios e 65% dos répteis apresentaram uma expansão de área. O incremento da área potencial de vida de alguns animais está diretamente ligado ao fato desses animais utilizarem a temperatura do ambiente como regulador da temperatura corporal. Essas espécies seriam mais afetadas por um esfriamento do clima e não pela elevação de temperatura, isso considerando que esses animais não tenham problemas com dispersão. Contudo, esses resultados não são corroborados por evidências atuais do declínio desses grupos na Europa (ARAÚJO et al. 2006). De fato, os autores mostraram que se as espécies forem consideradas incapazes de dispersão, então é previsto uma redução de área para praticamente todas as espécies analisadas. Portanto, o desenvolvimento de modelos que acrescentem aspectos ecológicos, aos modelos ambientais existentes, trará grande benefício para a análise das consequências das mudanças climáticas na biodiversidade.

Há poucos estudos focados no impacto das mudanças climáticas sobre a biodiversidade do Brasil. Entre esses, merecem destaque os estudos de impacto sobre espécies arbóreas de Cerrado (SIQUEIRA e PETERSON 2003) descrito no item 4.4 (Estudo de caso sobre o Cerrado) e sobre espécies arbóreas da Mata Atlântica (COLOMBO, 2007), cujos resultados mostram uma redução de área para todas as 38 espécies analisadas em média de 25% (cenário mais otimista) e de 50% (cenário mais pessimista) com o deslocamento para o sul, em relação a distribuição atual dessas espécies. O estudo do impacto das mudanças climáticas sobre a distribuição de vetores de leishmaniose no Brasil, mostra o dramático aumento no potencial de

distribuição de *Lutzomyia whitmani* no Sudeste do Brasil (PETERSON e SHAW, 2003). Outro estudo envolvendo 49 espécies de aves (considerando ausência de dispersão) indicou potencial de extinção de 20% das espécies analisadas (ANCIÃES e PETERSON 2006). Esses estudos mostram o impacto dramático e a vulnerabilidade das espécies analisadas frente às mudanças climáticas globais, enfatizando a necessidade de ampliar os estudos de impacto para espécies de diferentes grupos taxonômicos visando embasar melhor os impactos das mudanças climáticas na biodiversidade no Brasil.

4.1. INFRA-ESTRUTURA DE DADOS PARA A MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE ESPÉCIES

Recentes avanços associados à implementação de iniciativas globais, regionais e locais estão catalisando esforços coordenados de digitalização e disponibilização de dados sobre meio ambiente, clima e biodiversidade na Internet. A infra-estrutura compartilhada de dados *on-line* resultante desses esforços está ampliando acesso dinâmico a dados e informações, mas ainda sem atender o grau de precisão adequado para estudos de impacto de mudanças climáticas e modelagem de espécies biológicas numa escala mais fina.

Dados abióticos

Atualmente, o Centro de Distribuição de dados do IPCC⁷ fornece um grande conjunto de modelos e cenários futuros de clima. São mais de 20 modelos para oito cenários, referentes a dados de umidade, precipitação, pressão do ar, temperatura do ar (máximas e mínimas), vento, entre outras.

Os dados do IPCC tem uma resolução de 2° e 3° (pixels de 200 a 300km). Essa resolução utilizada para análises globais, não é adequada para a avaliação do impacto das mudanças climáticas na biodiversidade em escala regional e local. Nesse contexto, uma iniciativa importante é a do *Worldclim*⁸, que disponibiliza um modelo de simulação climática CCM3 (*Climate Change Model 3*) no qual é previsto uma duplicação dos níveis de CO₂ na atmosfera em 2100 (GOVINDASAMY et al. 2003). Esses dados têm resolução original de aproximadamente 50x50 km no qual foram aplicadas técnicas de

⁷ <http://www.ipcc-data.org/>

⁸ <http://www.worldclim.org/future.htm>

interpolação espacial para reduzir a escala a uma resolução de aproximadamente 1x1 km. Com essa resolução é possível fazer previsões em escala regional e até mesmo local. Contudo, o cenário utilizado pelo *Worldclim* é bastante “otimista” quando comparado aos cenários do IPCC. Portanto, as análises derivadas de dados do *Worldclim* são “conservadoras” quando comparadas com outros cenários futuros, bem mais pessimistas, quanto à quantidade de dióxido de carbono lançado na atmosfera em 2100. Sendo assim, ainda é necessário que sejam disponibilizados mais dados climáticos, referentes a outros modelos e cenários, em resolução mais fina, para que se possa realizar e comparar estudos mais amplos e mais realistas sobre os possíveis impactos na biodiversidade em escala regional e local.

Na análise da distribuição potencial de espécies (plantas e animais), principalmente em escala regional ou local, outros dados tornam-se importantes para avaliar os padrões de distribuição atual das espécies, tais como dados de solos (incluindo granulometria, riqueza, pH, quantidade de água disponível). Esses dados são fundamentais na modelagem de espécies vegetais, cuja distribuição está diretamente ligada ao tipo de solo em que está inserida. Quando existentes, esses dados estão disponíveis em escalas não adequadas para análises mais finas. Além disso, para as atuais ferramentas de modelagem disponíveis, o ideal é que esta informação seja disponibilizada em formato contínuo, ou seja, dados não categorizados em classes (tipos de solos), sendo este último o formato mais comumente encontrado.

Portanto, em relação a acesso a dados abióticos com o objetivo de realizar estudos sobre impactos das mudanças climáticas na biodiversidade, muito ainda tem que ser feito para que essas análises possam ser realizadas em maior quantidade e com mais qualidade, para que possam fornecer subsídios confiáveis na tomada de decisão em conservação de espécies. É necessário que haja investimento na disponibilização de mais dados, e em escalas mais finas, para que o pesquisador de biodiversidade tenha acesso a material adequado para a realização de pesquisa dos impactos das mudanças climáticas globais, sob o ponto de vista da espécie.

Infra-estrutura de dados biológicos

O desenvolvimento de análises da vulnerabilidade de espécies biológicas às mudanças climáticas e o planejamento de estratégias de mitigação de impacto, requerem o acesso facilitado e dinâmico a uma enorme

gama de dados primários de biodiversidade, que incluem nomes científicos validados, localidades de ocorrência de espécies (latitude/longitude) e uma série de dados complementares. O desenvolvimento de sistemas de informação que facilitam o acesso dinâmico a dados primários de qualidade requer um tratamento estruturante, com o envolvimento de um grande número de instituições nacionais e internacionais interessadas em compartilhar dados primários de espécies (nomes científicos, sinônimos e tratamentos taxonômicos) e espécimes (*vouchers* depositados em herbários e coleções zoológicas).

Nomes científicos válidos são o elo para a integração de informações associadas a tratamentos taxonômicos e informações complementares sobre amostras depositadas em coleções científicas. O Catálogo da Vida (*Catalogue of Life-CoL*)⁹, produto da parceria envolvendo o Species 2000¹⁰ e o Sistema Integrado de Informação Taxonômica (*Integrated Taxonomic Information System-ITIS*)¹¹, é um índice de nomes válidos de espécies conhecidas. Essa iniciativa internacional disponibiliza no momento mais de 1 milhão de nomes válidos de microrganismos, fungos, plantas e animais na Internet. O *checklist* do Catálogo da Vida versão 2007 integra informações de 47 bancos de dados taxonômicos elaborados com a contribuição de mais de três mil especialistas. Entretanto, ainda existem grandes lacunas de conhecimento (geográfico e taxonômico) para a fauna e flora neotropical (região biogeográfica que compreende a América Central, incluindo a parte sul do México e da península da Baixa Califórnia, o sul da Florida, todas as ilhas do Caribe e a América do Sul), especialmente para a Bacia Amazônica, região que engloba uma área de mais de 6 milhões de quilômetros quadrados. Não existe ainda um planejamento estratégico adequado para a elaboração do catálogo da Vida Brasil, e a biodiversidade de muitas das áreas que estão sendo desmatadas sequer foi coletada e estudada. Portanto, no momento estamos num processo acelerado de perda de biodiversidade ainda desconhecida.

As amostras depositadas em coleções biológicas e suas determinações taxonômicas são o produto resultante de expedições científicas e do esforço consolidado de biólogos e naturalistas na descrição e documentação da biodiversidade do planeta nos últimos 250 anos. Trata-se de um complexo

⁹ <http://www.catalogueoflife.org/>

¹⁰ <http://www.sp2000.org/>

¹¹ <http://www.itis.gov/>

de 2 a 3 bilhões de amostras armazenadas em coleções científicas distribuídas pelo mundo, um acervo ímpar e insuperável de registros de distribuição espacial da diversidade biológica do nosso planeta. As coleções científicas brasileiras detêm cerca de 30 milhões de amostras, uma pequena fração (entre 1 a 2 %) do total armazenado nos grandes museus e herbários internacionais. Essas informações são fundamentais para a construção de cenários de distribuição pretérita e futura da diversidade biológica no Brasil.

A Infra-estrutura Global de Informação sobre Biodiversidade (*Global Biodiversity Information Facility – GBIF*)¹² oficialmente estabelecida em 2001, é um programa internacional que tem como meta ampliar e consolidar o livre acesso à informação sobre biodiversidade via Internet. A implementação dessa infra-estrutura que é uma iniciativa aberta à participação de países e organizações internacionais interessadas no compartilhamento de dados sobre biodiversidade, está catalisando o desenvolvimento e adoção de padrões e protocolos que permitem a interoperabilidade de sistemas de informação. O resultado desse empreendimento é um ambiente *web* integrador da infra-estrutura compartilhada de dados e ferramentas de análise, síntese e visualização espacial da informação sobre biodiversidade. Os seis anos de implementação do GBIF permitem posicioná-lo como o portal dos portais de informação sobre biodiversidade. Lançado em fevereiro de 2004, com 9 milhões de registros, o portal do GBIF¹³ integra no momento (janeiro de 2008) informações de 950 bancos de dados, disponibilizando cerca de 140 milhões de registros e uma gama de documentos sobre procedimentos de limpeza e correção de dados e ferramentas computacionais. Iniciativas locais e regionais desenvolvidas com a incorporação de padrões e protocolos GBIF estão influenciando de maneira positiva a cultura de compartilhamento de dados fundamentais para a gestão ambiental, facilitando a construção da base de conhecimento global sobre biodiversidade.

No Brasil, o Instituto Virtual da Biodiversidade associado ao Programa Biota-Fapesp¹⁴ incorpora os avanços decorrentes da implementação do GBIF. Essa iniciativa integra dados de cerca de mais de 60 projetos de pesquisa (fauna, flora e microbiota) com o envolvimento mais de 500 pesquisadores. A integração de dados do programa Biota está baseada em dois sistemas de

¹² <http://www.gbif.org/>

¹³ <http://data.gbif.org>

¹⁴ <http://www.biota.org.br>

informação interoperáveis, o *SinBiota*¹⁵ e a rede *speciesLink*¹⁶, desenvolvidos com a adoção de padrões e protocolos internacionalmente aceitos. O *SinBiota* é o sistema de informação centralizado que integra dados e informações de coletas associadas ao programa Biota. O uso da ficha padrão de registro de dados desenvolvida pela comunidade científica e a geocodificação (latitude e longitude) da amostragem, são compulsórios para os projetos associados ao programa. A base cartográfica digital do Estado de São Paulo, com as camadas ambientais associadas (bacias hidrográficas, cobertura vegetal, rodovias, divisas municipais e áreas de conservação) que compõem o Atlas Biota, é um componente fundamental deste sistema de informação.

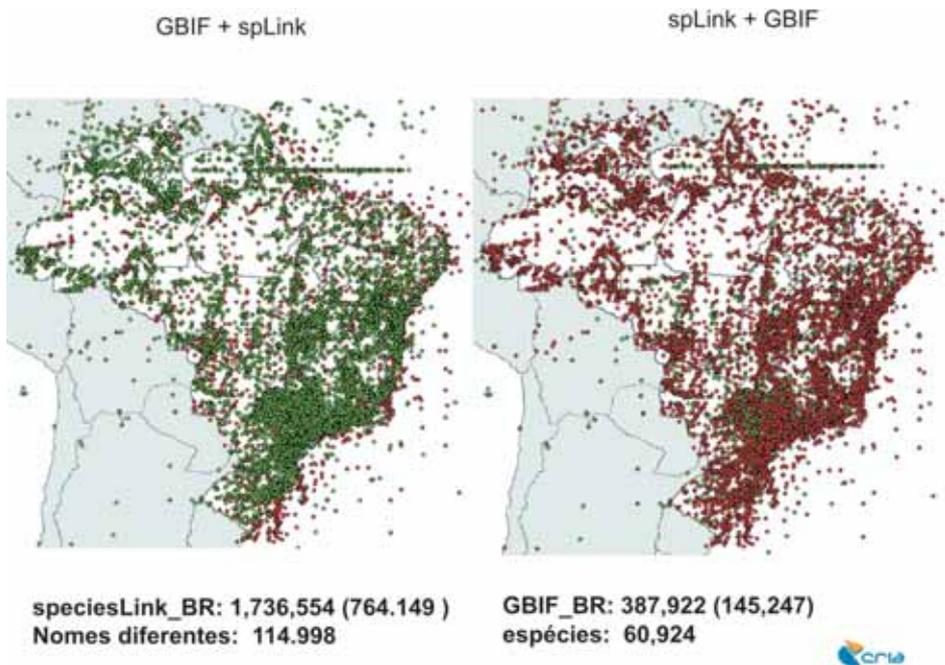
A rede *speciesLink* é um sistema de informação voltado à integração dinâmica de dados primários de espécimes armazenados em coleções biológicas distribuídas. Utiliza avanços correntes em protocolos de comunicação e gerenciamento de bancos de dados, software livre e de código aberto, e técnicas de espelhamento de dados em nós regionais conectados via Internet. O sistema disponibiliza também ferramentas de apoio para a correção e visualização de dados e indicadores das coleções associadas à rede. A rede *speciesLink* implementada com o apoio da Fapesp na fase inicial (2001-2005) foi ampliada com o apoio de várias fontes de financiamento, incluindo a JRS Biodiversity Foundation, MCT e GBIF. No momento a rede integra cerca de 2,3 milhões de registros de mais de 100 de coleções e subcoleções distribuídas e integradas a outras redes, incluindo a rede Taxonline (estado do Paraná) PPBio Amazônia Ocidental (Inpa, Amazonas) e Rede Capixaba (Espírito Santo). Integra também dados de coleções localizadas no Rio Grande do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Bahia, Paraíba, Pernambuco. O sistema tem mecanismos para filtrar dados sensíveis, e o controle sobre que dado ou registro estará ou não disponível é definido pelo provedor da informação.

A figura 2, a seguir, compara os dados do Brasil disponíveis na rede GBIF e na rede *speciesLink*.

¹⁵ <http://sinbiota.cria.org.br/atlas>

¹⁶ <http://splink.cria.org.br>

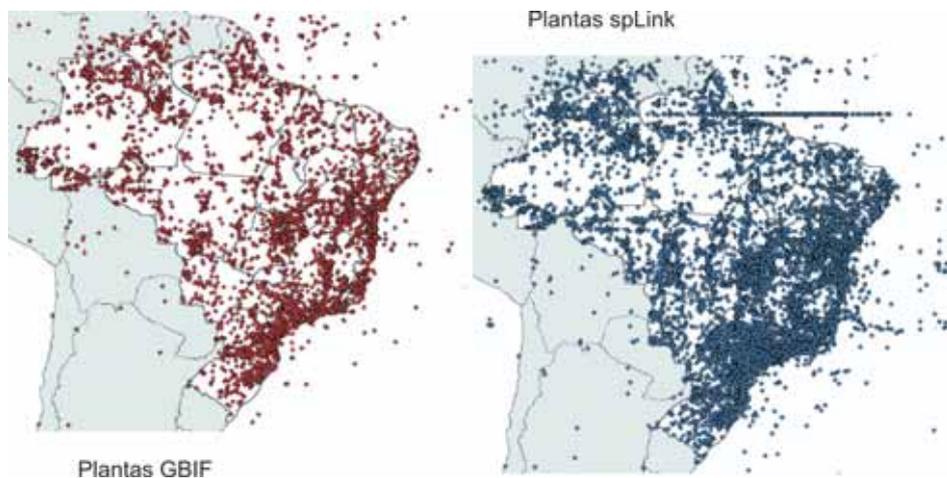
Figura 2. Representação dos dados georeferenciados das redes GBIF e *speciesLink* (Novembro, 2007)



A figura da esquerda mostra a sobreposição dos dados da rede *speciesLink* (pontos verdes) sobre os registros georeferenciados da rede GBIF (vermelhos) indicando lacunas geográficas de registros nas duas redes, e sobreposição de pontos de coletas, provavelmente devido ao depósito de duplicatas do mesmo material em diferentes coleções.

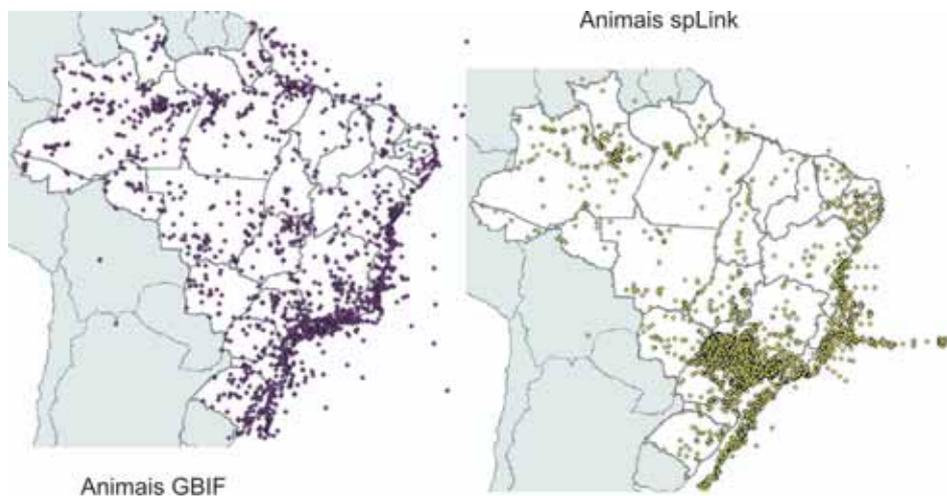
O mapa com os registros de amostras de plantas (Figura 3) mostra uma maior quantidade de dados disponíveis na rede *speciesLink*, e várias lacunas biogeográficas (em branco) em ambas as redes. É importante ressaltar que várias amostras de coletas realizadas no Brasil, possuem erros de registro de coordenadas geográficas, indicando a necessidade de um esforço contínuo de melhoria da qualidade dos dados disponibilizados por coleções científicas brasileiras.

Figura 3. Comparação dos dados georeferenciados de plantas nas redes GBIF e *speciesLink* (novembro, 2007)



A distribuição dos registros georeferenciados da fauna brasileira disponíveis na rede GBIF e rede *speciesLink* está indicada na Figura 4.

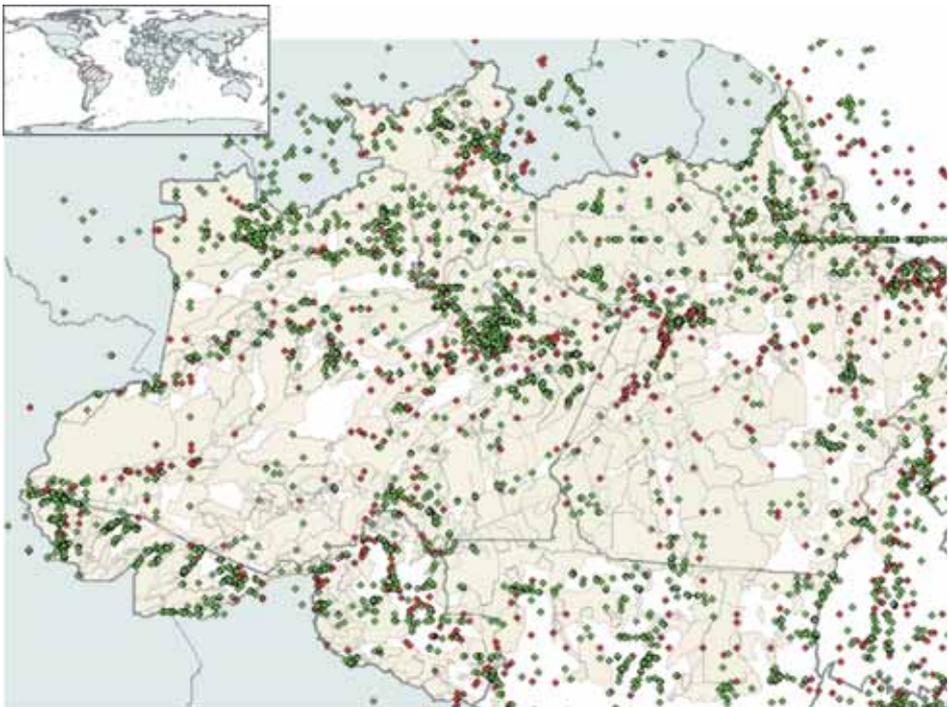
Figura 4. Comparação dos dados georeferenciados de animais nas redes GBIF e *speciesLink* (novembro, 2007)



Como a rede *speciesLink* serve os dados do projeto Revizee/Score Sul à rede OBIS (*Ocean Biodiversity Information System*) e a rede OBIS serve os dados para a rede GBIF, há muita sobreposição de pontos na costa brasileira. Podemos também observar uma grande concentração de pontos no Estado de São Paulo provenientes das coletas e observações realizadas no âmbito do programa Biota/Fapesp. Fora os dados desses dois programas, Revizee e Biota, a rede GBIF serve mais dados georeferenciados de animais que a rede *speciesLink*.

Considerando apenas a Região Amazônica (figura 5) podemos visualizar grandes lacunas de informações biogeográficas. Certamente se analisarmos os dados taxonômicos encontraremos também grandes lacunas de informação taxonômica.

Figura 5. Dados georeferenciados das redes GBIF e *speciesLink* para a Região Amazônica (novembro, 2007)



O “Plano de Ação 2007-2010: Ciência, Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento Nacional”¹⁷ que integra o conjunto de ações do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), cita como meta a implementação de 2/3 das recomendações documento “Diretrizes e Estratégias para Modernização de Coleções Biológicas e a Consolidação de Sistemas Integrados de Informação sobre Biodiversidad”¹⁸ incluindo o apoio para a modernização de coleções biológicas e a consolidação de sistemas integrados de informação de acesso livre e aberto sobre biodiversidade.

Apesar dos avanços decorrentes da implementação do GBIF e do Programa Biota-Fapesp, e do PPBio, o acesso *on-line* a dados primários de ocorrência de espécies relevantes para modelagem de nicho ecológico de Biomas Brasileiros, é ainda muito incipiente e desorganizado.

Apesar dos esforços realizados para inventariar a biodiversidade do país, existem ainda grandes lacunas de conhecimento taxonômico e ecológico. Por ser o Brasil um país megadiverso de dimensões continentais, é necessário encontrar meios para direcionar a pesquisa de campo, cobrindo lacunas de conhecimento geográfico e taxonômico, visando a identificação de áreas de diversidade prioritárias para a conservação de espécies. Dessa forma, o uso de ferramentas computacionais na abordagem de lacunas de conhecimento torna-se imperativo.

O uso de técnicas de modelagem de distribuição geográfica de espécies é particularmente indicado na tomada de decisões baseadas em um número limitado de informação disponível, como é o caso dos principais biomas brasileiros. Porém, é sempre importante frisar que a eficácia dessas técnicas é altamente dependente da qualidade dos dados biológicos e ambientais disponíveis.

4.2. FERRAMENTAS DE ANÁLISE PARA A MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE ESPÉCIES

Uma das possíveis aplicações das projeções dos diferentes cenários climáticos futuros é na modelagem de distribuição geográfica potencial de espécies. Essa modelagem serve para avaliar o impacto dessas mudanças no

¹⁷ <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/66226.html>

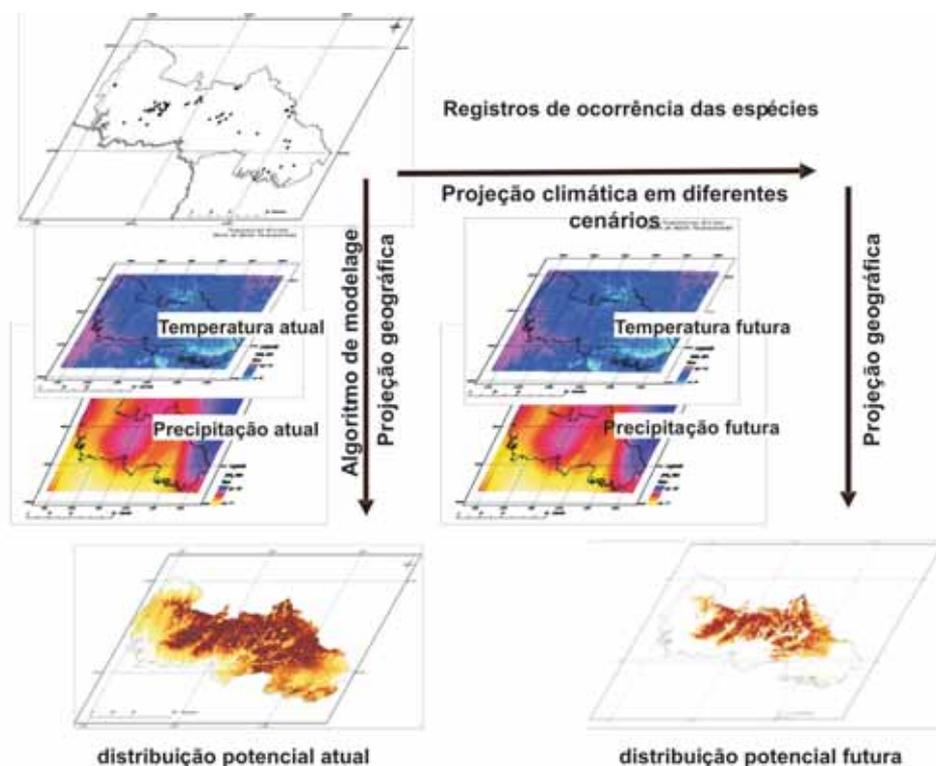
¹⁸ <http://www.cria.org.br/cgee/col/>

padrão de distribuição da biodiversidade (PETERSON 2001, PETERSON e VIEGLAIS 2001, ANDERSON et al. 2002, ANDERSON et al. 2003).

Esses métodos buscam definir as limitações ambientais das espécies nas dimensões para as quais o modelo é desenvolvido, com base em informações de ocorrência de espécies projetadas em espaço geográfico, e o uso de algoritmos que permitem a identificação de locais com características ambientais similares, indicando o potencial das espécies manterem populações viáveis (PETERSON e VIEGLAIS 2001).

Para realizar esse tipo de análise são necessários dados ambientais em escalas adequadas (mapas climáticos atuais e futuros), dados bióticos (registros de ocorrência e distribuição das espécies) e algoritmos que são utilizados na modelagem da distribuição geográfica potencial atual e futura das espécies (Figura 6).

Figura 6. Modelagem de distribuição potencial de espécies baseada em dados climáticos atuais e em cenários futuros



Existem cerca de 12 pacotes de software disponíveis para a modelagem de distribuição potencial de espécies baseados no conceito de nicho ecológico, sendo que os mais utilizados são o Desktop Garp¹⁹, MaxEnt²⁰, Floramap²¹, Biomod²². A maior parte desses softwares disponibilizam apenas um algoritmo de modelagem e via de regra requerem a conversão de dados ambientais (sistemas de projeção, datum, resolução etc) oriundos de diferentes fontes. Muitos desses problemas estão sendo resolvidos com o desenvolvimento do ambiente computacional de modelagem openModeller²³, uma parceria entre o Centro de Referência em Informação Ambiental (Cria), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), com o apoio da Fapesp. Esse ambiente de modelagem disponibiliza diferentes algoritmos, integra dados de diferentes formatos através do uso de uma biblioteca GDAL²⁴ facilitando portanto automatização de várias etapas do processo de modelagem (SUTTON et al. 2007, SANTANA et al. accepted).

As ferramentas de modelagem existentes baseiam-se apenas na influência do meio físico na distribuição das espécies, não assumindo a influência de barreiras geográficas e/ou ecológicas envolvidas no processo. Essa abordagem acarreta muitas incertezas e problemas nos resultados da modelagem dos impactos das mudanças climáticas na biodiversidade (PEARSON e DAWSON 2003, THUILLER et al. 2004, ARAÚJO et al. 2005). Análises mais robustas das conseqüências das mudanças climáticas globais na biodiversidade requerem a inclusão de aspectos envolvendo dinâmica de populações (migrações), uso da terra (processos de modificação e fragmentação de habitats) e interações bióticas, ao processo de modelagem (THUILLER et al. 2008). Esses autores definiram migração como sendo resultante de quatro processos: taxas de fecundidade, de dispersão, de recrutamento e de crescimento populacional. A inclusão desses fatores no processo de modelagem é importante uma vez que mudanças climáticas ameaçam muito mais as espécies com baixa capacidade migratória e com baixa capacidade de locomoção. É importante considerar o impacto da

¹⁹ <http://nhm.ku.edu/desktopgarp>

²⁰ <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>

²¹ http://gisweb.ciat.cgiar.org/SIG/marksim_floramap.htm

²² <http://www.will.chez-alice.fr/pdf/ThuillerGCB2003.pdf>

²³ <http://openmodeller.sourceforge.net/>

²⁴ <http://www.gdal.org/>

modificação e fragmentação de habitats na redução, ou mesmo no impedimento, da dispersão de propágulos de várias espécies. Para os autores, os modelos deveriam incorporar medidas, ainda que de forma simples, de taxas de migração, conceitos de meta-população para tratar questões de recrutamento e métricas de paisagem para tratar questões referentes a uso da terra e fragmentação de habitats.

Portanto, é necessário que as ferramentas de análises evoluam constantemente, implementando e testando novas técnicas no processo de modelagem. Nesse contexto, o ambiente computacional openModeller é especialmente indicado, por ser um software livre, de código aberto, com arquitetura modular e desenvolvimento colaborativo. Essas características tornam o processo de implementação de novos algoritmos e de processos de pré e pós-análise mais simplificado, fazendo deste software um ambiente propício ao processo de experimentação em modelagem de biodiversidade (SANTANA et al. accepted).

4.3. VULNERABILIDADE DA BIODIVERSIDADE BRASILEIRA FRENTE A MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS E USO INADEQUADO DA TERRA

O período de 1998 a 2007 já é considerado como o mais quente da história, desde o início da medição da temperatura do planeta em 1850. Nessa década foram perdidos em média cerca de 20 mil km quadrados por ano de cobertura vegetal na Amazônia Legal Brasileira. A devastação ambiental e a crescente fragmentação de habitats e ecossistemas, não é apenas um fator aditivo ao impacto das mudanças climáticas globais, mas um fator multiplicador quando se consideram os estresses associados. É difícil de estimar a vulnerabilidade de espécies biológicas, em função do desconhecimento existente, tanto ao nível taxonômico, quanto à dados biogeográficos consistentes e abrangentes. Ainda existem poucos estudos de modelagem de nicho ecológico, focados em biomas brasileiros. Outro fator que merece destaque, é que o zoneamento econômico ecológico ainda não saiu do papel no Brasil. De acordo com nota publicada pelo Instituto de Estudos de Comércio e Negociações Internacionais (Icône)²⁵ o mais recente número oficial sobre a área ocupada com pastagem data de 1996. O Brasil, na condição de terceiro maior produtor agrícola e nono maior detentor de

²⁵ <http://www.iconebrasil.org.br/pt/>

florestas plantadas do mundo, não pode deixar de ter um banco de dados prontamente disponível sobre o uso da terra, e sobre as mudanças em curso, fruto das transformações estruturais do mercado de commodities agrícolas, além dos impactos decorrentes das mudanças climáticas. A falta de regras definidas e de monitoramento adequado do uso da terra e de áreas costeiras, associados ao impacto das mudanças climáticas em curso, está acarretando e resultará em perdas ainda maiores da biodiversidade ainda desconhecida no Brasil.

Segundo Hoegh-Guldberg, Mumby et al. (2007), os recifes de coral do planeta poderão entrar em extinção a partir de 2050, caso a concentração de CO₂ na atmosfera ultrapasse a marca de 500 ppm (partes por milhão), conforme prevê o IPCC. A concentração do gás na atmosfera está hoje em 380 ppm, e se chegar de fato a 500 ppm, o pH e a concentração de aragonita (mineral que os corais utilizam para construir seu esqueleto calcário) dos oceanos cairão de tal maneira que será impossível para a maioria das espécies de coral sobreviver. A costa brasileira com 8 mil quilômetros de extensão, está sofrendo grandes alterações em função do boom imobiliário, especialmente no Nordeste brasileiro. A área de Abrolhos está ameaçada pela carcinocultura no sul da Bahia. Apesar dos esforços associados ao projeto Revizee²⁶, a biodiversidade da costa brasileira ainda é pouco conhecida e com informação desagregada e não prontamente disponível.

Em ambientes terrestres a “desconexão de habitats” está sendo considerada como uma das principais causas do declínio de anfíbios. De acordo com Becker, Fonseca et al (2007) o distanciamento das áreas de floresta onde vivem os anfíbios e dos corpos d’água onde eles se reproduzem está impondo um risco imediato à sobrevivência de várias espécies. O estudo avalia o impacto da fragmentação na Mata Atlântica, onde 93% da floresta foi devastada, mas alerta que o problema pode estar ocorrendo em todo o mundo por conta da destruição de matas ciliares. No interior de São Paulo, além de boa parte dos trechos remanescentes da Mata Atlântica estarem separados das fontes de água por canaviais ou pastos, 76% da mata ciliar foi destruída.

A Amazônia brasileira continuará no centro da discussão mundial sobre clima, recursos naturais e biodiversidade, em função dos importantes

²⁶ <http://www.mma.gov.br/port/sqa/projeto/revizee/capa/>

mecanismos de equilíbrio e regulação do clima no continente sul-americano e oceanos. O desmatamento da Amazônia voltou a crescer em 2007, depois de três anos de desaceleração, em função da expansão da área de pecuária e a intensificação do plantio de soja. Mantidas as taxas globais de emissões de gases do efeito estufa, a partir de 2050, florestas do centro da Amazônia poderão dar lugar a uma vegetação típica de Cerrado. De acordo com os dados do PrevFogo (Prevenção de Incêndios Florestais em Unidades de Conservação²⁷), o número de queimadas em áreas de floresta cresceu 30% em 2007, quando comparado a 2006. Pelo menos 65% do desmatamento detectado pelo Instituto do Homem e do Meio Ambiente da Amazônia (Imazon)²⁸ no Pará ocorreu em unidades de conservação e terras indígenas na Terra do Meio e na BR-163. A perda de floresta nas unidades de conservação foi significativa, atingindo mais de 20% do total de terras de preservação ambiental. Esgota-se, portanto, o expediente de decretar reservas sem dotá-las de pessoal e equipamentos.

O ímpeto da fronteira agrícola já não parece deter-se diante da interdição fundiária nas áreas protegidas. Ele só será disciplinado com um zoneamento agroecológico abrangente da Amazônia, desde que implementado de fato no marco da lei.

O Cerrado cobria originalmente mais de 20% do território brasileiro, estendendo-se por cerca de dois milhões de km², ocupando boa parte dos onze estados na área central do país (RATTER et al. 1997). Nos últimos 30 anos, a cobertura vegetal do Cerrado vem sendo rapidamente transformada devido à expansão agropecuária. Segundo alguns índices, mais de 65% da área original do Cerrado já foi muito modificada, sendo que o bioma já tem cerca de 40% de sua área degradada e esse índice poderá aumentar ainda mais com a expansão agropecuária inadequada. Essa situação é extremamente preocupante porque o Cerrado, além de ser muito rico em espécies, é também muito rico em espécies endêmicas. Estima-se que o Cerrado possua cerca de 10.000 espécies de plantas das quais 44% sejam endêmicas deste bioma (MYERS et al. 2000). Apesar desta riqueza biológica, o Cerrado conta com menos de 3% de sua área original protegida por unidades de conservação (Ministério do Meio Ambiente, 1998) e não possui legislação específica para

²⁷ http://www2.tcu.gov.br/pls/portal/docs/page/tcu/controle_externo/fiscalizacao/avaliacao_programas_governo/relatorios/prevfogo_impacto.pdf

²⁸ <http://www.imazon.org.br/home/index.asp>

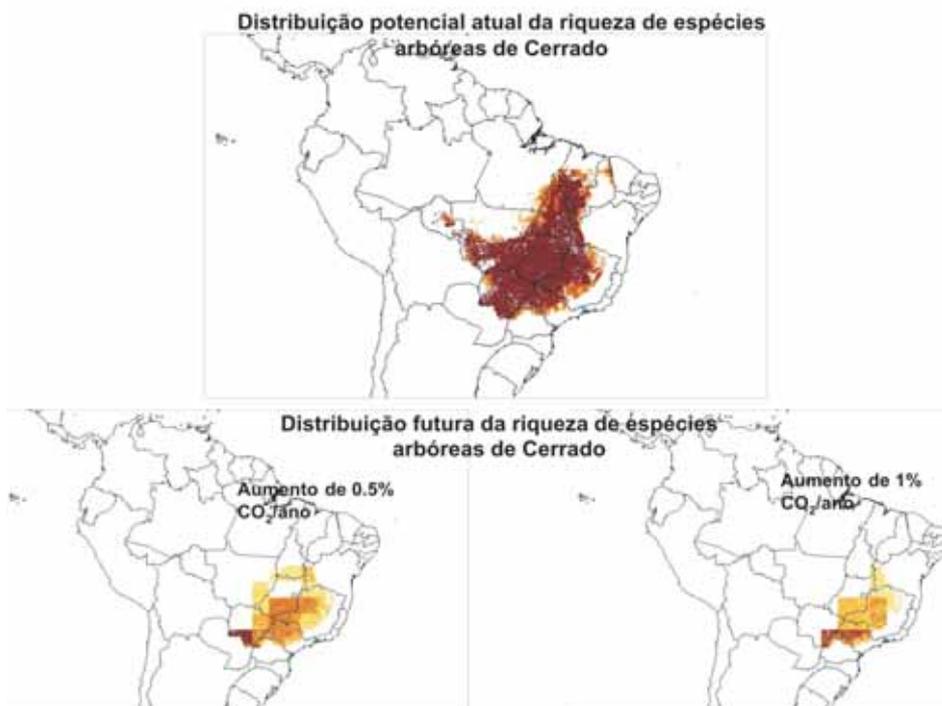
proteger efetivamente o que resta de seus remanescentes. O Cerrado continua cada vez mais ocupado por monoculturas como a soja e a cana, além da pecuária, e o CO₂ emitido via Cerrado é subestimado. Cálculos feitos por pesquisadores da UnB mostram que as emissões de carbono desse bioma é bastante significativa. Estudo divulgado pelo Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPN)²⁹ aponta a tendência do avanço das lavouras de cana-de-açúcar, para produção de etanol, no segundo bioma mais ameaçado do país. Nos próximos anos, deverão ser construídas 47 novas usinas de álcool em Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais, em áreas de Cerrado. A cana hoje já ocupa áreas que foram consideradas pelo MMA prioritárias para preservação e uso sustentável. As plantações de cana no Cerrado revelam uma dificuldade do governo de implantar um sistema de proteção em áreas que ele mesmo definiu como prioridade.

4.4. ESTUDO DE CASO DA VULNERABILIDADE DE PLANTAS DO CERRADO BRASILEIRO

A vulnerabilidade de espécies arbóreas do Cerrado brasileiro ao impacto de mudanças climáticas foi avaliada por (SIQUEIRA e PETERSON 2003) utilizando metodologias de modelagem preditiva para gerar mapas de distribuição geográfica com base no conceito de nicho ecológico das espécies (PETERSON 2001, PETERSON e VIEGLAIS 2001, ANDERSON et al. 2002, ANDERSON et al. 2003). A partir de registros de ocorrência de 162 espécies arbóreas selecionadas, com a utilização de dados do “Projeto de Cooperação Técnica, Conservação e Manejo da Biodiversidade do Bioma Cerrado” (Embrapa Cerrados, UnB, Ibama/DFID e RBGE/Reino Unido), foram feitas projeções de áreas potenciais futuras de ocorrência dessas espécies, baseadas em dois cenários climáticos do IPCC (2001). O estudo mostra uma perda de área maior que 50% para todas as espécies analisadas nos dois cenários. Indica que entre 18 a 56 espécies não terão áreas habitáveis na região do Cerrado em 2050, e entre 91 e 123 espécies terão sua área habitável diminuída em 90%, com o deslocamento da área “core” no Centro-Oeste para a Região Sudeste/Sul (Figura 7).

²⁹ <<http://www.socioambiental.org/nsa/detalhe?id=2577>>

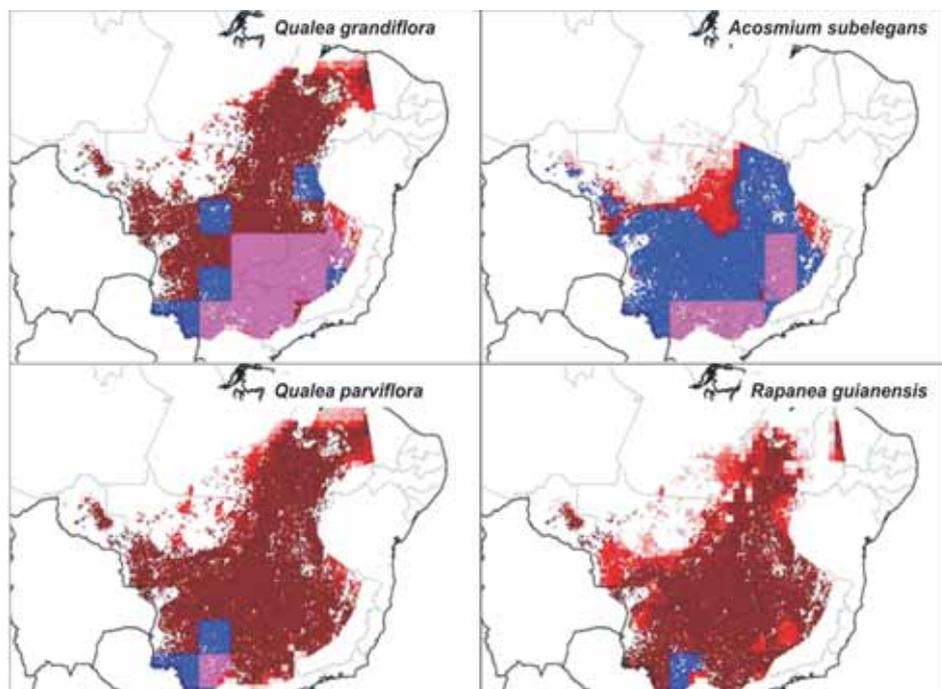
Figura 7. Distribuição potencial atual e futura, para dois cenários climáticos



Fonte: Siqueira & Peterson (2003).

A Figura 8 mostra a diferença das respostas a mudanças climáticas para quatro espécies arbóreas de Cerrado, indicando uma grande redução de área e possibilidade de extinção da *Rapanea guianensis* e uma resposta menos grave na distribuição da *Qualea grandiflora*. Isso mostra a necessidade de se fazer este tipo de análise para cada espécie, pois diferentes espécies possuem diferentes necessidades ecológicas e diferentes formas de adaptação às alterações ambientais.

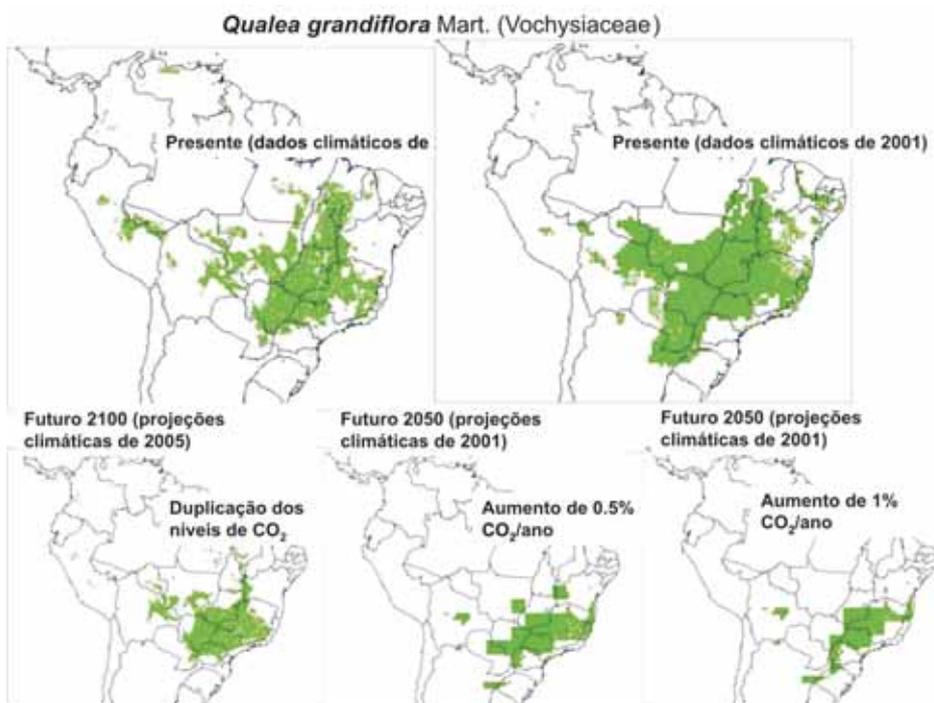
Figura 8. Distribuição futura baseada em dois cenários climáticos para quatro espécies arbóreas de Cerrado. Azul representa a área potencial futura baseado em um cenário mais otimista (aumento de 0.5% de CO₂/ano) e rosa representa a área potencial futura para o cenário mais pessimista (aumento de 1% de CO₂/ano).



Fonte: Siqueira e Peterson (2003).

A Figura 9 mostra os resultados da distribuição potencial de *Qualea grandiflora* no estudo de Siqueira e Peterson (2003) e os resultados obtidos utilizando novos dados climáticos gerados em 2005. A resolução dos modelos gerados com os dados de 2005 viabiliza análises mais acuradas sobre os impactos das mudanças climáticas na distribuição das espécies a nível local.

Figura 9. Modelagem de distribuição potencial atual e futura de *Qualea grandiflora* segundo três diferentes cenários climáticos.



5. CONCLUSÕES

Sistemas naturais podem ser especialmente vulneráveis às mudanças climáticas em função da capacidade limitada de adaptação, sendo que alguns desses sistemas podem sofrer danos significativos e irreversíveis. A vulnerabilidade dos sistemas naturais varia com a localização geográfica, tempo e condições sociais, econômicas e ambientais. Ecossistemas estão sujeitos à muitas pressões, tais como mudanças no uso da terra, deposição de nutrientes e poluentes, uso agrícola, introdução de espécies exóticas e variabilidade climática natural.

Populações de espécies ameaçadas, terão um risco maior de extinção em função do sinergismo de pressões adversas, incluindo mudanças de uso da terra e fragmentação de habitats. Sem adaptação, algumas das espécies definidas como “criticamente ameaçadas” serão extintas nas próximas décadas, e as espécies classificadas como “ameaçadas ou vulneráveis” se

tornarão muito mais raras ao longo deste século. A perda irreversível de espécies, acarretará impactos adversos em atividades socioeconômicas em função da alteração de serviços ambientais, como polinização e controle natural de pragas e pestes, e atividades recreativas, incluindo o ecoturismo. Possíveis métodos de adaptação de perda de espécies incluem o estabelecimento de refúgios, parques e reservas com corredores ecológicos para permitir a migração de espécies, associados à medidas de estímulo à criação em cativeiro, estabelecimento de bancos de embriões e germoplasma, e medidas de translocação de espécies. Contudo, essas opções são limitadas pelo fator custo. Algumas conclusões específicas sobre o impacto e vulnerabilidade potencial de ecossistemas brasileiros à cenários de mudanças climáticas, são apresentados à seguir:

1. A infra-estrutura compartilhada de dados biológicos ainda é incipiente e desorganizada, e via de regra não disponível na forma digital. A impossibilidade do acesso dinâmico a dados com qualidade e precisão requerida para a modelagem preditiva de espécies dificulta o desenvolvimento de cenários de impacto e vulnerabilidade consistentes para os principais sistemas naturais brasileiros.

2. A informática para biodiversidade é uma área emergente de desenvolvimento científico e tecnológico a nível global. Apenas nos últimos cinco anos é que um desenvolvimento acelerado do setor começou a ser delineado, com a implementação da Infra-estrutura Global de Informação sobre Biodiversidade (*Global Biodiversity Information Facility-GBIF*) e a adoção de padrões e protocolos que permitem a interoperabilidade entre sistemas de informação.

3. As projeções existentes do impacto de mudanças climáticas na biodiversidade se baseiam em poucos estudos de caso que utilizam um número pequeno de dados associados a biomas selecionados.

4. Organismos expressam as características climático-ambientais do nicho ecológico. Portanto, a distribuição de espécies é diretamente afetada pelo impacto das mudanças climáticas nesses nichos ecológicos. É importante a definição de abordagens sistêmicas que permitam a avaliação temporal do impacto das mudanças climáticas nas espécies, populações, comunidades, nichos ecológicos e biomas.

5. O estudo de caso do impacto de mudanças climáticas sobre espécies arbóreas do Cerrado brasileiro, indica uma perda significativa de biodiversidade em função do aumento médio de temperatura de 2 graus Celsius num período de 50 anos.

6. RECOMENDAÇÕES PRELIMINARES

1. Apoio à consolidação de uma infra-estrutura organizada e compartilhada de dados (biológicos e abióticos) que facilite o desenvolvimento de análises consistentes de modelagem preditiva. Esse esforço deve ser implementado em estreita colaboração com outras iniciativas regionais e globais.

2. Apoio ao desenvolvimento de ferramentas de análise integradas por meio de um ambiente computacional associado à infra-estrutura de dados, e que permita o desenvolvimento de cenários de impacto e vulnerabilidade através do emprego de diferentes algoritmos.

3. Definição de indicadores que permitam o monitoramento do impacto das mudanças climáticas nas espécies, populações, comunidades e biomas (por exemplo, declínio de populações de anfíbios e de polinizadores; alterações das características fenológicas de plantas).

4. Definição de metodologias para a elaboração de mapas de impacto, vulnerabilidade e adaptação para os principais biomas brasileiros.

5. Revisão das prioridades de conservação e estabelecimento de corredores ecológicos, levando-se em conta o impacto das mudanças climáticas na biodiversidade.

6. Desenvolvimento de sistemas de análise, síntese e visualização de dados, que permitam o monitoramento da perda de biodiversidade e a adoção de medidas preventivas.

7. Estabelecimento de políticas e estratégias que resultem no desenvolvimento de um sistema integrado de coleta e preservação de dados de interesse público.

8. Estruturação de um mecanismo financeiro para a remuneração dos serviços ambientais prestados pelas florestas das unidades de conservação

como estratégia de contenção do desmatamento e mitigação das mudanças climáticas.

9. Valoração dos serviços ambientais prestados pelas unidades de conservação”, com a estruturação de “mercados verdes”.

10. Definição de espécies indicadoras susceptíveis ao impacto de mudanças climáticas para os diferentes ecossistemas brasileiros.

REFERÊNCIAS

- ALLEY, R. et al. *Climate change 2007: the physical science basis*. [S.l.: s.n.], 2007.
- ANCIÃNES, M.; PETERSON, A. T. Climate change effects on neotropical manakin diversity based on ecological niche modeling. *The Condor*, n. 108, p. 778-791, 2006.
- ANDERSON, R. P.; LAVERDE, M.; PETERSON, A. T. Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. *Oikos*, n. 93, p. 3-16, 2002.
- _____; LEW, D.; PETERSON, A. T. Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, n. 162, p. 211-232, 2003.
- ARAÚJO, M. B., THUILLER, W.; PEARSON, R. G. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography*, n. 33, p. 1712-1728, 2006.
- _____; WHITTAKER, M.; LADLE, R. J. Reducing uncertainty in projections of extinction risk from climate change. *Global Ecology & Biogeography*, n. 14, p. 529-538, 2005.
- BERRY, P. M. Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland. *Global Ecology & Biogeography*, n. 11, p. 453-462, 2002.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. *Ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento nacional: plano de ação, 2007-2019*. Brasília, 2007.
- COLOMBO, A. C. *Consequências potenciais das mudanças climáticas globais para espécies arbóreas da Mata Atlântica*. 2007. Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual de Campinas, 2007.

GOVINDASAMY, B.; DUFFY, P. B.; COQUARD, J. High-resolution simulations of global climate, part 2: effects of increased greenhouse cases. *Climate Dynamics*, n. 21, p. 391–404, 2003.

GRIMM, A. M.; NATORI, A. A. Impacts of climate change in South America: mean fields and variability. In: ICSHMO, 8., 2006, Foz do Iguaçu. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2006. p. 269-274

GULLISON, R. E. et al. Tropical forests and climate policy. *Science*, n. 316, p. 985-986, 2007.

HARRISON, P. A. et al. Modelling climate change impacts on species distribution at the European scale: implications for conservation policy. *Environmental Science & Policy*, n. 9, p. 116128, 2006.

HUNTLEY, B. et al. Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response surfaces. *Journal of Biogeography*, n. 22, p. 967-1001, 1995.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Summary for policymakers. [S.l.], 200-.

KILLEEN, T. J. (Ed.). Uma tempestade perfeita na Amazônia: desenvolvimento e conservação no contexto da iniciativa pela Integração da Infra-Estrutura Regional Sul Americana (IIRSA). *Conservation International*, 2007.

LAVERGNE, S.; MOLINA, J.; DEBUSSCHE, M. Fingerprints of environmental change on the rare Mediterranean flora: a 115-year study. *Global Change Biology*, n. 12, p. 1466-1478, 2006.

MAGANA, V. et al. Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate research*, n. 9, p. 107-114, 1997.

MARENGO, J. 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*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. (Biodiversidade, 26).

MARTÍNEZ-MEYER, E.; PETERSON, A. T.; HARGROVE, W. W. Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*, n. 1, p. 305-314, 2004.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; VELASQUEZ, L. F. S. Mudanças climáticas e Amazônia. *Ciência e Cultura*, n. 59, p. 22-27, 2007.

OBERHAUSER, K.; PETERSON, A. T. Modelling current and future potential wintering distributions of eastern north american monarch butterflies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, n. 100, p. 14063-14068, 2003.

PARMESAN, C.; YOHE, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, n. 421, p. 37-42, 2003.

PEARSON, R. G.; DAWSON, T. P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global Ecology & Biogeography*, n. 12, p. 361-371, 2003.

_____ et al. Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*, n. 33, p. 1704-1711, 2006.

PETERSON, A. T. Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *CONDOR*, n. 103, p. 599-605, 2001.

_____; SHAW, J. J. *Lutzomyia* vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distributions, and climate change effects. *International Journal of Parasitology*, n. 33, p. 919-931, 2003.

_____; VIEGLAIS, D. A. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from Bioinformatics attack a pressing problem. *BioScience*, n. 51, p. 363-371, 2001.

_____ et al. Future projections for mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, n. 416, p. 626-629, 2002.

_____ et al. Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modelling*, n. 144, p. 21-30, 2001.

ROOT, T. L. et al. Human-modified temperatures induce species change: joint attribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, p.7465-7469, 2005.

SALA, O. E. et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, n. 287, p.1770-1774, 2000.

SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, n. 34, p. 1-6, 2007.

SANTANA, F. S. et al. A reference business process for ecological niche modelling. *Ecological Informatics*, [s.d.].

SIQUEIRA, M. F. D.; PETERSON, A. T. Consequences of global climate change for geographic distributions of cerrado tree species. *Biota Neotropica*, n. 3, 2003.

SUTTON, T.; GIOVANNI, R.; SIQUEIRA, M. F. Introducing openModeller. *OSGeo Journal*, n. 1, p. 1-6, 2007.

THOMAS, C. D. et al. Extinction risk from climate change. *Nature*, n. 427, p. 145-148, 2004.

THUILLER, W., LAVOREL, S.; ARAÚJO, M. B. Niche properties and geographic extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology Biogeography*, n. 14, p. 347-357, 2005.

_____ et al. Predicting climate change impacts on plant diversity: where to go from here?. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, n. 9, p. 137-152, 2008.

_____. Biodiversity conservation: uncertainty in predictions of extinction risk. *Nature*, n. 430, 2004. Discussion following 33.

_____. Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe. *Diversity and Distributions*, n. 12, p. 49-60, 2006.

WALTHER, G.-R., BERGER, S.; SYKES, M. T. An ecological “footprint” of climate change. *Proceedings of Royal Society of London B*, v. 272, n. 1571, p. 1427-1432, 2005.

Resumo

Existe hoje um amplo consenso científico e político de que estamos entrando num período de mudanças climáticas sem precedentes, e os impactos dessas mudanças na biodiversidade, assim como em outras áreas, já são mensuráveis. As mudanças climáticas em curso têm o potencial de contrapor aos esforços de conservação e uso sustentável da biodiversidade nas próximas décadas.

Cortes substanciais na emissão de gases de efeito estufa são necessários para mitigar a ameaça de longo prazo sobre a biodiversidade, visando limitar o aumento da temperatura média global anual em não mais que 2 graus Celsius acima dos níveis pré-industriais.

Por outro lado, a proteção à biodiversidade pode auxiliar a limitar a concentração de gases atmosféricos porque florestas e outros habitats naturais armazenam carbono. São necessários, o estabelecimento de políticas e o desenvolvimento de estratégias para auxiliar na definição de medidas de adaptação às mudanças de temperatura e regimes hídricos.

Apesar dos esforços realizados para inventariar a biodiversidade do país, ainda existem enormes lacunas de conhecimento taxonômico e biogeográfico. Por ser o Brasil um país megadiverso de dimensões continentais, é necessário encontrar meios para direcionar a pesquisa de campo, cobrindo essas lacunas, e visando a identificação de áreas de diversidade prioritárias para a conservação de espécies. Dessa forma, o uso de ferramentas computacionais na abordagem de lacunas de conhecimento torna-se imperativo.

Palavras-chave

Mudanças climáticas. Impactos. Biodiversidade. Gases de efeito estufa. Brasil.

Abstract

There is now a broad political and scientific consensus that we have entered an era of unprecedented climate change and that the impact of these changes on biodiversity already are measurable. Current climate changes have potential to undermine our efforts for the conservation and sustainable use of biodiversity in the next decades.

Substantial reductions of global greenhouse gas emissions are necessary to mitigate longer-term threats to biodiversity, are needed in order to limit the increase of the global annual mean temperatures to no more than 2 degrees Celsius above pre-industrial levels.

Protection of biodiversity can help limit atmospheric greenhouse gas concentration because forests and other natural habitats store carbon. The establishment of policies and the development of strategies are necessary to help define ways to adapt to changes in temperature and water regimes.

In spite of efforts carried out to document the country's biodiversity, there are still large taxonomic and bio-geographic knowledge gaps. As Brazil is a mega diverse country with continental dimensions, it is necessary to find the means to direct field surveys to cover such gaps and to identify priority areas for species conservation. The use of biodiversity informatics to address knowledge gaps is imperative.

Keywords

Climate changes. Impacts. Biodiversity. Greenhouse gas emissions. Brazil.

Os autores

VANDERLEI PEREZ CANHOS é engenheiro de Alimentos, mestre em Ciência de Alimentos (Unicamp), e doutor em Ciência de Alimentos (Universidade de Oregon/USA). Professor aposentado da Unicamp, é diretor-presidente do Centro de Referência em Informação Ambiental (Cria).

MARINEZ FERREIRA DE SIQUEIRA é graduada em Ciências Biológicas e mestre em Ecologia pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e doutora em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP).

ALEXANDRE MARINO é analista de sistema. Atualmente está no Centro de Referência em Informação Ambiental (Cria).

DORA ANN LANGE CANHOS é formada em Engenheira de Alimentos (Unicamp). Atualmente é aluna de doutorado do Programa de pós-graduação em Política Científica e Tecnológica do Instituto de Geociências (Unicamp). É diretora associada do Centro de Referência em Informação Ambiental (Cria).

Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil

Jose A. Marengo

1. INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro ocupa 1.600.000 km² do território nacional e tem incrustado em 62% da sua área, o Polígono das Secas, uma região semi-árida de 940 mil km², que abrange nove Estados do Nordeste e enfrenta um problema crônico de falta de água e chuva abaixo de 800 mm por ano. No Semi-Árido, espalhado por 86% do território nordestino, vivem aproximadamente 30 milhões de pessoas, ou cerca de 15% da população nacional. São números que fazem do conjunto dessas áreas, a região seca mais populosa do mundo. A irregularidade das chuvas é um obstáculo constante ao desenvolvimento das atividades agropecuárias, e a lacuna de sistemas eficientes para o armazenamento da água – que estão quase sempre concentrados nas mãos de poucos – intensifica ainda mais os efeitos sociais. Para piorar, ciclos de fortes estiagens e secas costumam atingir a região em intervalos que vão de poucos anos a até mesmo décadas. Eles colaboram para desarticular de vez as já frágeis condições de vida de pequenos produtores e outros grupos mais pobres, tornando-se, muitas vezes, o gatilho que faltava para o abandono da região.

Sabe-se que as chuvas do semi-árido da região Nordeste apresentam enorme variabilidade espacial e temporal. Anos de secas e chuvas abundantes se alternam de formas erráticas, e grandes são as secas de 1710-11, 1723-27, 1736-57, 1744-45, 1777-78, 1808-09, 1824-25, 1835-37, 1844-45, 1877-79, 1982-83, 1997-98, assim como secas menores em 2003 e 2005. A ocorrência de chuvas, por si só, não garante que as culturas de subsistência de sequeiro serão bem-sucedidas, e um veranico ou período seco dentro da quadra chuvosa pode ter impactos bastante adversos à agricultura da região. No semi-árido é freqüente a ocorrência de períodos secos durante a estação

chuvosa que, dependendo da intensidade e duração, provocam fortes danos nas culturas de subsistência (NAE 2005).

A Região Nordeste caracteriza-se naturalmente como de alto potencial para evaporação da água, em função da enorme disponibilidade de energia solar e altas temperaturas. Aumentos de temperatura associados à mudança de clima decorrente do aquecimento global, independente do que possa vir a ocorrer com as chuvas, já seriam suficientes para causar maior evaporação dos lagos, açudes e reservatórios e maior demanda evaporativa das plantas. Isto é, a não ser que haja aumento no volume de chuvas, a água se tornará um bem mais escasso, com sérias conseqüências para a sustentabilidade do desenvolvimento regional.

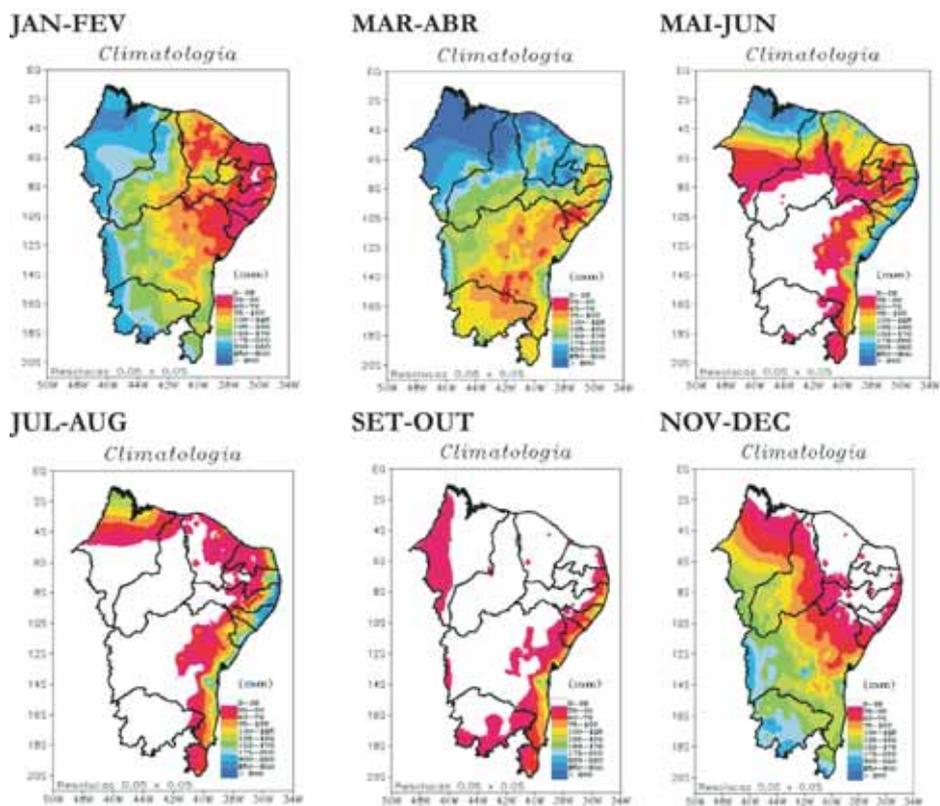
2. CLIMA DO NORDESTE

O Nordeste brasileiro apresenta alta variedade climática, podendo-se observar desde o clima semi-árido no interior desta Região, com precipitação acumulada inferior a 500 mm/ano, até o clima chuvoso, observado principalmente na costa leste, com precipitação acumulada anual superior a 1.500 mm. O litoral norte da Região recebe entre 1.000 e 1.200 mm/ano. A Figura 1 mostra os totais bimensais de chuva no Nordeste. A área mais afetada pela falta de chuvas é o Polígono das Secas, uma área de mais de 1 milhão de km² onde vivem 27 milhões de pessoas, espalhados em oito estados nordestinos (só o Maranhão fica fora) e norte de Minas Gerais (NAE 2005, MARENGO e SILVA DIAS, 2007).

Esta região possui basicamente três regimes chuvosos, sendo:

1. No sul-sudoeste da Região Nordeste, o principal período chuvoso é de outubro a fevereiro. As chuvas são ocasionadas principalmente pela passagem de frentes frias que vêm do sul do país. Além disso, podem ser observadas chuvas em forma de pancadas isoladas, que normalmente ocorrem no final da tarde e início da noite, devido ao aquecimento durante o dia.
2. No norte da Região Nordeste, abrangendo a maior parte do Semi-Árido, o principal período chuvoso ocorre entre os meses de fevereiro e maio. Essa região é bastante conhecida, pois é onde ocorrem as maiores secas. O mais importante sistema causador de chuvas nesta sub-região é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Figura 1. Climatologia bimestral de chuva do Brasil (1970-90). Os tons vermelho representam menor volume de chuva e os tons azuis mostram maior volume de chuva, segundo a escala de cor à esquerda do mapa (em mm durante três meses). (Fontes: NMRH-AL, SRH-BA, Funceme-CE, SEAG-ES, SEMARH/LMRS-PB, SECTMA/DMRH-PE, SIMGE-MG, SEAAB-PI, EMPARN-RN, Cepes-SE, CMCD/Inpe, INMET).

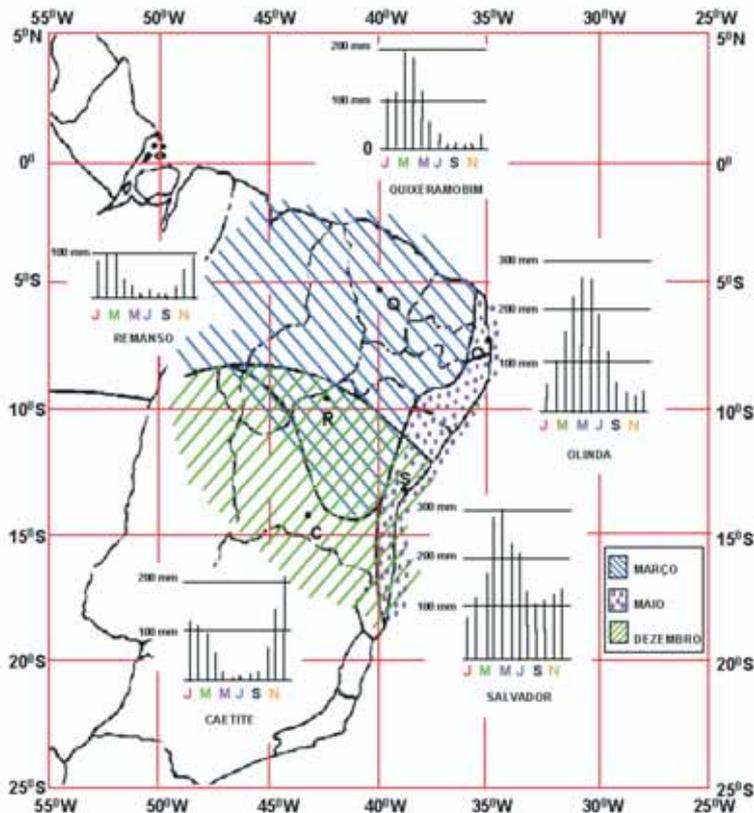


Fonte: Proclima: www.cptec.inpe.br/proclima

3. No Leste do Nordeste ou Zona da Mata, o principal período chuvoso ocorre de abril a agosto e as chuvas são ocasionadas principalmente pelos contrastes entre a temperatura do mar junto à costa e a temperatura do continente. Os ventos, ao soprarem continente adentro, carregam a umidade do oceano que condensa e precipita na faixa litorânea e na região da Zona da Mata.

A Figura 2 mostra a distribuição espacial do mês, no qual a precipitação média mensal atinge o máximo e também mostra o histograma da distribuição anual da precipitação para cinco estações representativas. A estação seca, na maior parte da Região, é observada de setembro a dezembro. O trimestre mais seco ocorre entre agosto e outubro, numa faixa orientada no sentido noroeste/sudeste, desde o extremo oeste do Nordeste. A estação mais seca no leste do Nordeste ocorre entre outubro e dezembro. No sul do Nordeste, o trimestre mais seco passa para julho/agosto/setembro e finalmente junho/

Figura 2. Distribuição espacial do mês no qual a precipitação média mensal atinge o máximo e histogramas da distribuição anual de precipitação (eixo vertical em mm) para cinco estações, representando diferentes regimes pluviométricos do Nordeste. Os dados utilizados são para o período de 1931 a 1960. A localização das estações está indicada pelas letras Q (Quixeramobim), O (Olinda), S (Salvador), C (Caetité) e R (Remanso)

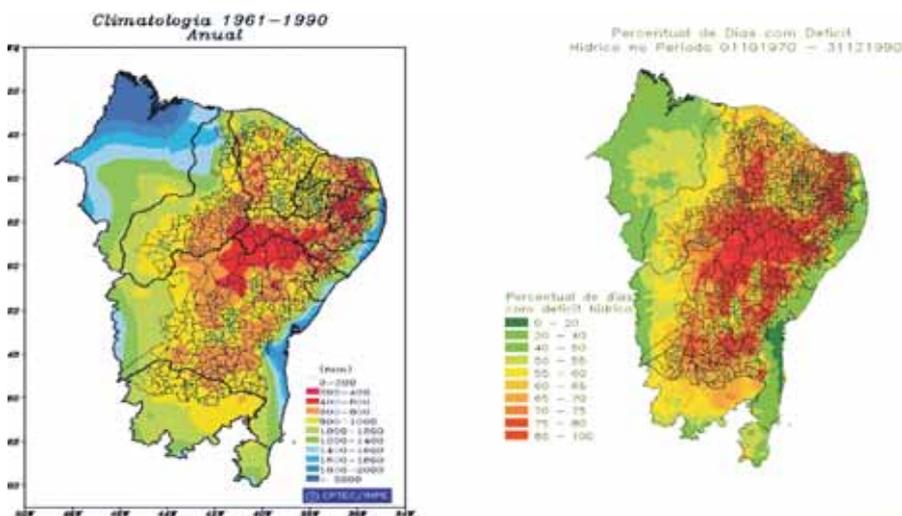


Fonte: CPTEC/Inpe.

julho/agosto, em todo o interior da Bahia. O litoral da Bahia apresenta grande variedade no regime de chuvas: o trimestre mais seco ocorre em janeiro/fevereiro/março no extremo sul, justamente no período de maior acumulação de chuvas imediatamente logo ao sul daquela região. De Salvador para o norte, o trimestre mais seco ocorre entre agosto e outubro.

O percentual de dias com déficit hídrico (relação entre o número de dias com déficit hídrico e o número total de dias) para o período 1970-90 (Figura 3) pode ser usado como critério para avaliar vulnerabilidade climática do semi-árido. A Figura 3 mostra que a análise baseada no balanço hídrico indica que as áreas definido hoje como semi-árido (região delimitada pela isoietia de 800 mm) são consistentes com a região no período 1970-90, com um déficit hídrico em pelo menos 60% do tempo, de acordo como o modelo de balanço hídrico. Algumas áreas do Médio Jequitinhonha apresentaram essa condição, entretanto não estão incluídas pela lei em vigor hoje no semi-árido. Assim, a análise baseada no balanço hídrico, o qual incorpora fatores não considerados na delimitação atual do semi-árido, confirmou que esta região é mais freqüentemente afetada pelas secas.

Figura 3. Mapa de chuva anual 1961-90 e escala de cores em mm. Percentual de dias com déficit hídrico no período 1970-90 e escala de cores em % (inferior-direita)



Fonte: Proclima-www.cptec.impe.br/proclima.

3. VARIABILIDADE CLIMÁTICA

O gerenciamento dos recursos hídricos na região semi-árida depende muito da variabilidade do clima, especialmente a distribuição de chuvas. A variabilidade climática em longo prazo tem sido estudada com algum grau e detalhamento pelos centros climáticos do Brasil e do Nordeste (MARENGO e SILVA DIAS 2007, MARENGO 2002, 200 a, b, SOUZA FILHO 2003). Porém, ainda resta conhecer esta variabilidade com as incertezas associadas à futura mudança climática, seja devido à variabilidade natural do clima ou à ação antropogênica, que determina incrementos na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

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 a competição por recursos hídricos, podem 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. Com um semi-árido mais árido e com maior frequência de secas, a base de sustentação para as atividades humanas diminuirá, sendo provável que aumente o deslocamento da população para as cidades ou para as áreas onde seja possível desenvolver a agricultura irrigada. Segundo o IPCC (2007a), mesmo que se consiga hoje reduzir as emissões de gases para os níveis de 1990 – um esforço gigantesco e pouco provável – a temperatura do planeta aumentará cerca de 1°C até 2100, com projeções de até 4,5°C no pior cenário de emissões altas. Na verdade, a temperatura já aumentou 0,7°C nos últimos 50 anos em todo o Brasil, e, no Nordeste, o aumento foi de 1,5 a 2°C na temperatura máxima em 41 anos (F. Lacerda-Laboratório de Meteorologia-ITEP, Recife).

No que concerne à população, aqueles com menos recursos e com menor capacidade de se adaptar são os mais vulneráveis. O estudo desenvolvido pelo Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República em 2005 (NAE 2005) sugere que o Nordeste é a região mais vulnerável às mudanças climáticas. O semi-árido nordestino que apresenta uma curta, porém crucial estação chuvosa poderia, num clima mais quente e seco no futuro, transformar-se em região árida. Isto pode afetar a agricultura de subsistência regional, a disponibilidade de água e a saúde da população, obrigando as populações a migrarem, gerando ondas de “refugiados

ambientais do clima”, para as grandes cidades da região ou para outras regiões, aumentando os problemas sociais já presentes nas grandes cidades. Esse problema já tem sido observado nas grandes secas de 1777-78, 1876, 1983 e 1998 entre outras.

Esse artigo representa uma atualização do que aparece em NAE (2005), enfatizando os aspectos associados a mudanças de clima na Região Nordeste, com o intuito de analisar futuros cenários de clima na região até finais do século 21. São apresentadas análises sobre vulnerabilidade da região Nordeste, relacionadas aos impactos decorrentes da mudança climática, sugerindo áreas potencialmente vulneráveis à mudança de clima, assim como possíveis ações de adaptação e mitigação. Sugere-se ao leitor, acessar as seguintes referências bibliográficas, para expandir ainda mais esta revisão de literatura sobre clima e variabilidade climática no Nordeste: Magalhães et al., 1988; Xavier, 2001; Marengo, 2003 2007a; Marengo e Nobre, 2001; Silva Dias e Marengo, 2002; Nobre et al., 2006; IPCC, 2007 a, b; Marengo e Silva Dias, 2007.

4. VULNERABILIDADE A EXTREMOS DA VARIABILIDADE DE CLIMA NO SEMI-ÁRIDO DO NORDESTE NO PRESENTE

Uma mudança de variabilidade climática aumenta a vulnerabilidade de um sistema ecológico e aumenta as incertezas no processo de administração da água. O termo vulnerabilidade denota um limite onde uma pessoa ou sistema pode ser afetado. Por outro lado, sustentabilidade significa a capacidade de um sistema manter-se em uma determinada condição. Então, a vulnerabilidade denota o ponto onde a sustentabilidade pode ser comprometida. Concluindo, no presente contexto, vulnerabilidade e sustentabilidade são conceitos correlatos, onde uma frágil sustentabilidade de um sistema é entendida como mais vulnerável.

De modo geral, a economia da zona do semi-árido apresenta-se como um complexo de pecuárias extensivas e agricultura de baixo custo que renderam muito, apoiadas nos consórcios de proprietários formados por algodão, milho, feijão e mandioca. Esse tipo de agricultura de subsistência é altamente vulnerável ao fenômeno das secas.

Como exemplo de extremos climáticos de grande impacto na região, a grande seca de 1998 e 1999 resultou em uma queda de 72% na produção de

feijão, milho, arroz, algodão e mandioca durante a seca, segundo o estudo da Fundação Joaquim Nabuco (Fundaj) numa pesquisa envolvendo 15 municípios de cinco estados afetados. As chuvas durante o verão de 2004 foram consideradas acima do normal, pois teve episódios de chuva intensa no estado do Ceará em janeiro 2004, sendo a chuva neste mês de aproximadamente 500% acima do normal, que geraram grandes perdas econômicas no Ceará (NAE, 2005). Maiores discussões aparecem na Seção 5.

5. IMPACTOS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS NA HISTÓRIA ECONÔMICA DO SEMI-ÁRIDO

Seca

A principal manifestação da variabilidade climática no Nordeste brasileiro é a seca. O semi-árido tem no passado uma história de secas que afetam, de forma drástica, sua população rural. A região é um enclave de escassa precipitação que abrange desde os litorais do Estado do Ceará e do Rio Grande do Norte até o médio do Rio São Francisco, com uma vegetação de tipo caatinga. Historicamente, a região sempre foi afetada por grandes secas ou grandes cheias. Relatos de secas na região podem ser encontrados desde o século 17, quando os portugueses chegaram à região. Kane (1989) indicou para o Nordeste, que em 29 anos de El Niño, durante 137 anos, no período 1849-1985, apenas 12 foram associados à secas na região.

No semi-árido nordestino, essa variabilidade climática, em particular as situações de seca, sempre é sinônima de agruras nas populações rurais do interior da região, e tem sido objeto de preocupação da sociedade e organismos do governo ao longo dos anos. A prova cabal dessa preocupação a construção dos primeiros reservatórios hídricos no semi-árido nordestino que datam do final do século 19, durante o período imperial, a exemplo da construção do açude do Cedro em Quixadá/CE. Os diversos autores que enumeram as secas do século 17 a 19 têm como base de análise o registro histórico feito pelos escritores da época, ou ainda, por depoimento pessoal. Torna-se difícil de alcançar uma classificação objetiva dos anos secos, a exceção dos eventos das grandes secas tais como 1777 e 1877.

Segundo um estudo de Souza Filho (2003), o Semi-Árido Nordestino do século 18 apresentava uma baixíssima densidade demográfica. A baixa densidade demográfica não reduziu o impacto das secas na economia regional

neste século. Brígido (2001) observa que “a de 1777, que durou até 1778, fez perder-se sete oitavos do gado existente na capitania do Ceará”; e “a seca de 1725 foi tão grande que fez secar as fontes do Cariri”, provavelmente impactando o plantio de cana e a policultura que se instalava naquela área.

Essas secas estão associadas às características climáticas da região e às variabilidades dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical (MARENGO e SILVA DIAS, 2007, NOBRE et al., 2006). Estatisticamente, acontecem de 18 a 20 anos de seca a cada cem anos. As secas mais graves, que acontecem quando a chuva se reduz a menos da metade desse índice, aparecem em registros históricos desde o início da colonização, no século 16, e são comuns. Até agora, o século 20 foi um dos mais áridos, registrando nada menos que 27 anos de estiagem. A seca mais longa começou em 1979 e 50% do gado morreu por falta d’água, a desnutrição explodiu e milhares de pessoas morreram de sede e desnutrição.

O primeiro processo econômico do semi-árido foi a criação de gado, que ocupou os sertões até a grande seca de 1877, quando sete oitavos do rebanho que existia no semi-árido foi dizimado pela seca. Naquela época, a manufatura de couro era uma atividade econômica de importância. O segundo processo econômico foi à associação de gado com algodão. No período de 1844 a 1877, as chuvas foram regulares e o gado se reproduziu, aumentando significativamente as densidades populacionais. A Guerra Civil Americana possibilitou acesso do algodão do semi-árido para o mercado europeu. E o solo, ainda não degradado, elevava a produtividade do algodão. Esse quadro evoluiu até a seca de 1877, em que a indústria de algodão e gado foi dizimada. Assim, observa-se que uma visão de desenvolvimento para o Nordeste semi-árido não pode prescindir de uma abordagem da questão da convivência como a variabilidade climática.

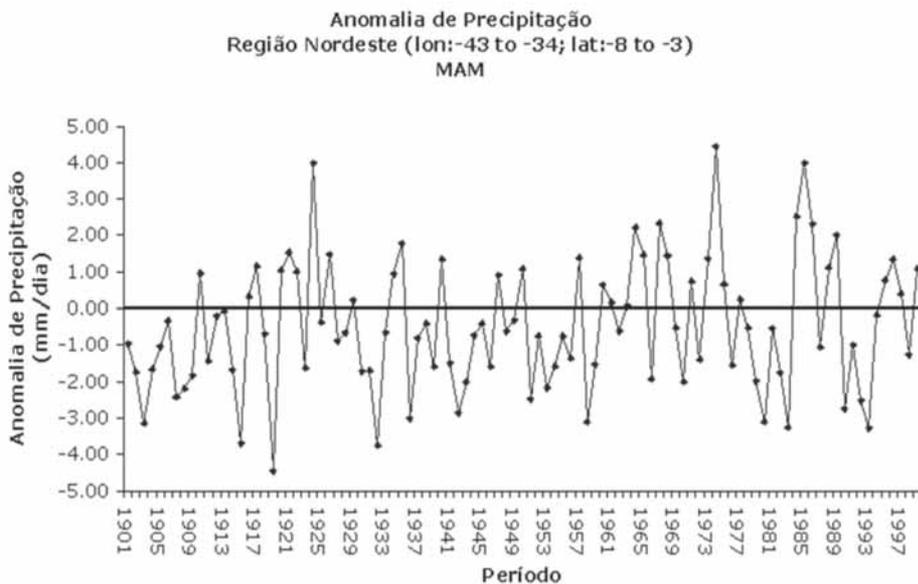
A partir de 1942, não tem havido vítimas da seca, salvo casos isolados. Guerra (1981) diz que “havia água saudável em grandes reservatórios, onde ocorriam as maiores irrigações. A política de açudagem tem como marco inicial a construção do reservatório Cedro, iniciado em 1884 pelo engenheiro Revy, e concluída em 1924 pelo engenheiro Piquet Carneiro. Outras obras do tipo do Cedro, que possibilitassem irrigação, só seriam construídas a partir da Seca de 1930/32.” Reservatórios como Estreito Ema, Feiticeiro, Choro, General Sampaio, Jaibara, no Ceará; Riacho dos Cavalos, Pilões, santa Luzia, São Gonçalo, Condado e Soledade, na Paraíba; Lucrecia, Ithans e Inharé no

Rio Grande do Norte; assim como o início do reservatório Curemas (Paraíba), Lima Campos (Ceará).

Analisando os efeitos das secas sobre a produção ocorrida no período 1973-83, o Relatório do Senado Federal (1997) estima que, computando as cifras totais do período, chega-se a números impressionantes de 1,6 milhões de TM de algodão; 4 milhões de TM de mandioca; 3 milhões de TM de milho e 952 mil TM de feijão, sem considerar as demais perdas verificadas em outros produtos. O El Niño de 1983 afetou 1328 municípios, com uma população afetada da ordem de 28.954.000 pessoas. Durante o El Niño de 1998, após o desastre da seca gerada pelo fenômeno climático, o governo federal disponibilizou 465 milhões de Reais de um total de 1,6 bilhões para atender aos flagelados pela seca (NAE 2005).

A Figura 4 apresenta a variabilidade da chuva no semi-árido para a quadra chuvosa março-abril-maio, e podem ser observadas as grandes secas já mencionadas no texto. As maiores secas têm sido atribuídas a El Niño, como em 1983 e 1998, e outros eventos de seca têm sido atribuídos ao

Figura 4. Anomalias de chuva (mm/dia) na região do semi-árido nordestino durante a quadra chuvosa março-abril-maio (MAM) desde 1901 até 2000, em relação a média histórica.



aquecimento do Oceano Atlântico Tropical Norte. Não têm se observadas tendências de aumento ou redução sistemática da chuva, ainda que durante os últimos 5 anos as chuvas têm-se apresentado em menores volumes e de forma irregular. Em novembro de 2007, quando a represa de Sobradinho chegou a apenas 15% de seu volume preenchido, 158 municípios do estado da Paraíba estavam em estado de emergência motivado por uma seca. Nesse ano as chuvas foram de até 2,5 mm/dia menor que o normal. As variações de chuva no Nordeste apresentam variações em escala interdecadal, com períodos reativamente úmidos, na década de 1970, e mais secos, na década de 1940.

Enchentes

As chuvas intensas que ocorreram em toda a Região, em janeiro de 2004, geraram os totais acumulados de chuva em algumas regiões que, nesse período, chegaram a 500% acima da média histórica. Em algumas localidades, os máximos de precipitação excederam em mais que 300 mm a média climatológica do mês. Em Picos (PI) choveu 436 mm, quando a média do mês é igual a 127 mm; na cidade de Barra (BA), choveu 280 mm (a média do mês é 12 mm); em Quixeramobim (CE), choveu 252 mm (a média do mês é 78 mm). As reservas hídricas do Nordeste que no início de janeiro tinham, em média, cerca de 30% da capacidade máxima, atingiram no final do mês um percentual superior a 90%, devido aos altos índices pluviométricos no verão de 2004. Segundo o CPTEC, as causas destas chuvas intensas apontam para um transporte de umidade atmosférica desde o Atlântico tropical e da bacia Amazônica até o Nordeste, que é algo incomum, mas não impossível de acontecer.

Segundo a Secretaria Nacional da Defesa Civil, as enchentes de janeiro 2004 no Nordeste tiveram os seguintes impactos: 219 mortos, 1404 feridos, 370.000 desabrigados e desalojados; 1219 municípios atingidos (42% dos municípios de Nordeste foram atingidos), e 115.984 casas destruídas ou danificadas. Ainda assim, as chuvas durante a quadra chuvosa MAM 2004 foram de 2 mm/dia menor que o normal.

6. AÇÕES DE MONITORAMENTO DE VULNERABILIDADE CLIMÁTICA NO SEMI-ÁRIDO

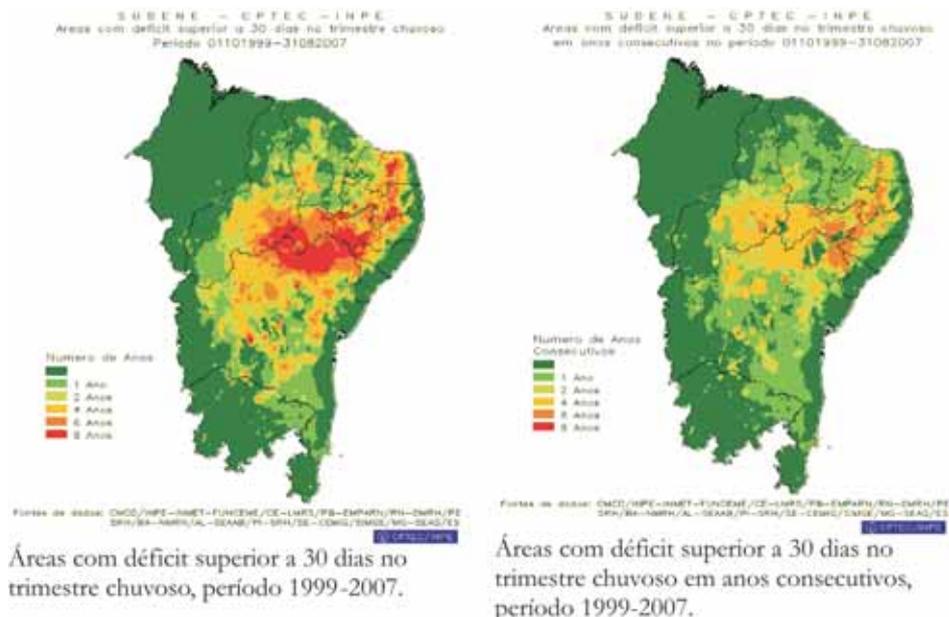
Visto que a precipitação na Região Nordeste apresenta uma grande variabilidade no tempo e espaço, a ocorrência de chuvas, por si só, não garante que as culturas de subsistência serão bem sucedidas. Uma seca intensa durante a quadra chuvosa, ou uma precipitação intensa ou excessiva na mesma época, podem ter impactos bastante negativos na economia regional e nacional, pois o governo federal tem que tomar ações para mitigar os danos e reduzir o prejuízo.

Nesse contexto, o Programa de Monitoramento Climático em Tempo Real da Região Nordeste (Proclima) é uma iniciativa conjunta da Sudene e do Ministério da Integração Nacional para monitorar a estação chuvosa na Região Nordeste. O Proclima é executado pelo CPTEC/Inpe e pelos estados da Região Nordeste, Minas Gerais e Espírito Santo, através dos núcleos e laboratórios estaduais participantes do Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH) do Ministério da Ciência e Tecnologia. Um dos produtos gerados pelo Proclima é o número de dias com déficit hídrico durante o período chuvoso, que é uma boa referência do comportamento da precipitação pluviométrica, em quantidade e regularidade, como também, do possível impacto sobre as atividades agrícolas, podendo assim ser considerado, como um indicador da vulnerabilidade da agricultura, a falta de chuva nessa região.

As Figuras 5a-b mostram o número de dias com déficit hídrico no Trimestre Chuvoso na região de atuação da Sudene para anos extremos: seco 1998-99 e chuvoso 2003-2004. É importante lembrar que os regimes climáticos na Região Nordeste são diferenciados, o que determina que o início do período chuvoso seja diferente em cada micro-região. A análise apresentada concentra-se no trimestre chuvoso de cada um das sub-regiões da área do semi-árido que compreende os meses de fevereiro, março, abril e maio. As cores esverdeadas apresentam áreas potencialmente favoráveis para atividades agrícolas. As áreas com cores amareladas correspondem a situações intermediárias, onde houve queda de produtividade ou perda parcial de safra. De um modo geral, pode-se observar uma incidência de condições climáticas pouco propícias para agricultura na região do semi-árido.

A Figura 6 indica áreas que apresentaram déficit hídrico superior a 30 dias no período 1999-2007 (a) e com déficit superior a 30 dias em anos consecutivos. As áreas com cores avermelhadas apresentaram déficit hídrico severo nos últimos quatro períodos chuvosos, enquanto cores verdes indicam áreas nas quais não houve déficit hídrico severo em pelo menos três últimos períodos chuvosos. A partir dessa análise, pode-se concluir que as áreas em vermelho estão mais vulneráveis diante da possibilidade de ocorrência de uma nova seca na estação chuvosa 2007-08. Portanto, o quadro de umidade do solo está se apresentando desfavorável na região que abrange o norte da Bahia, o leste do Piauí, centro e oeste de Pernambuco e o centro da Paraíba e Rio Grande do Norte. Essas áreas são as mais freqüentemente afetadas por eventos climáticos e servem com um indicativo inicial de regiões potencialmente mais vulneráveis devido a sucessivos eventos climáticos críticos. Deve-se salientar que a presente análise se baseia apenas em fatores climáticos e não levam em conta as ações de mitigação resultantes de políticas públicas atuais.

Figura 6. Dias secos, com déficit hídrico superior a 30 dias no trimestre chuvoso no Nordeste, no período 1999-2007 em: (a) anos não consecutivos, (b) anos consecutivos



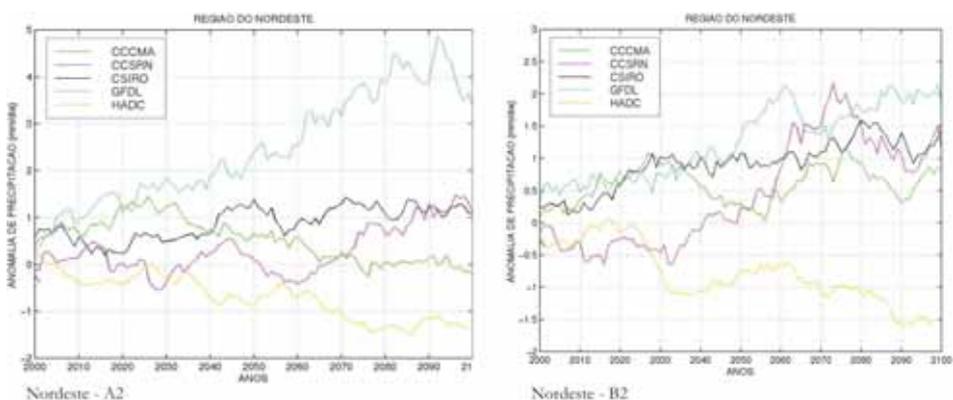
Fonte: Proclima-CPTEC/Inpe

7. VULNERABILIDADE DO SEMI-ÁRIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS: POSSÍVEIS RISCOS E IMPACTOS DECORRENTES DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As projeções de clima futuro, liberadas pelo Quarto Relatório do IPCC AR4 (IPCC, 2007 a, b), e pelo Relatório de Clima do Inpe (MARENGO et al., 2007 a e b; AMBRIZZI et al., 2007) têm mostrado cenários de secas e eventos extremos de chuva em grandes áreas do planeta e do Brasil, respectivamente. No Brasil, a região mais vulnerável, do ponto de vista social à mudança de clima, seria o semi-árido (ou simplesmente o “sertão”).

A Figura 7 apresenta as anomalias de chuva geradas por 5 modelos climáticos globais do IPCC AR4 para o período 2000-2100 (MARENGO, 2007 a), em relação à média de 1961-90, para dos cenários climáticos de emissão extremos: A2 (Altas emissões de gases de efeito estufa-pessimista) e B2 (baixas emissões de gases de efeito estufa-otimista). Para o cenário B2, os modelos climáticos CSIRO (Austrália), GFDL (EUA), CCMA (Canadá) desde 2000 e o modelo CCSR/NIES desde 2060 mostram anomalias positivas de chuva, que chegam a 2 mm/dia no GFDL para 2100. No cenário A2, o modelo CCSR/NIES (Japão) apresenta anomalias positivas que são menos intensas que no cenário B2. No A2, a maior diferença com B2 está

Figura 7. Séries de tempo de anomalias de chuva para Nordeste durante FMAM de 2000-2100, geradas pelos modelos acoplados oceano-atmosfera de IPCC-AR4 CCMA, CCSR/NIES, CSIRO, GFDL e HadCM3. As anomalias foram calculadas em relação á climatologia de 1961-90 de cada modelo. As séries foram suavizadas usando uma média móvel de 11 anos



Fonte: Marengo 2007a.

no modelo GFDL, que apresenta tendências positivas de chuva chegando a 4-5 mm/dia em 2100, comparado com 2 mm/dia⁻¹ no cenário B2. Nos dois cenários, o modelo HadCM3 (Reino Unido) apresenta anomalias de chuva negativas chegando a 1.5 mm/dia em 2100.

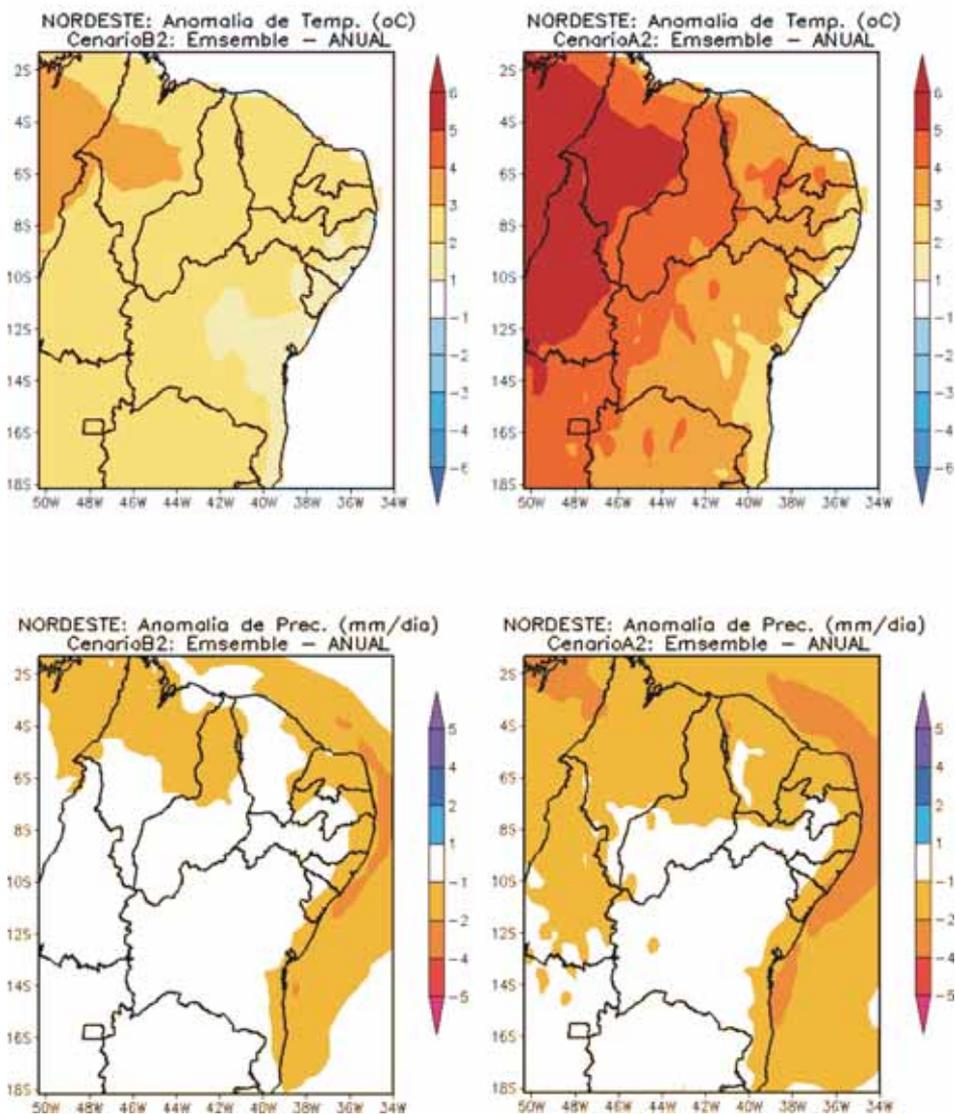
O Relatório do Clima do Inpe tem apresentado cenários de mudanças de clima no Brasil até finais do século 21. O relatório descreve os cenários regionalizados de clima para o futuro (2071-2100) derivados de três modelos regionais de clima (Eta-CPTEC, HadRM3 e RegCM3, com resolução espacial de 50 km latitude-logitude) forçados com o modelo global do Centro Climático do Reino Unido (Hadley Centre) HadAM3, para os cenários extremos de emissão A2-pessimista e B2-otimista. Maiores detalhes podem ser achados em Ambrizzi et al. (2007) e Marengo et al (2007 a, b). As Figuras 8 e 9 mostram as projeções sazonais de mudanças de temperatura e chuva para o Nordeste durante 2071-2100 em relação ao presente (definido como 1961-90) para os dois cenários climáticos A2 e B2, e para a média dos três modelos regionais. Segundo esse relatório do Inpe, no cenário climático pessimista, as temperaturas aumentariam de 2 °C a 4 °C e as chuvas se reduziriam entre 15-20% (2-4 mm/dia) no Nordeste, até o final do século 21. No cenário otimista, o aquecimento seria entre 1-3°C e a chuva ficaria entre 10-15% (1-2 mm/dia) menor que no presente a nível anual.

Em relação a eventos extremos de clima, o impacto mais importante seria um aumento no índice de dias secos consecutivos CDD (indicadores dos chamados “veranicos”), chegando até mais de 30 dias/ano em 2071-2100 no cenário A2 (Figura 8) comparado a 12 dias/ano no clima do presente, assim como uma redução de dias com extremos intensos de chuva, especialmente no interior do Nordeste e no litoral de Piauí e na Bahia.

Esses seriam os possíveis impactos da mudança de clima num cenário de aquecimento global, considerando os cenários otimistas e pessimistas identificados pelo IPCC e dos resultados do Relatório de Clima do Inpe:

- Um aumento de 3°C ou mais na temperatura média deixaria ainda mais seco os locais que hoje têm maior déficit hídrico no semi-árido;
- A curta estação chuvosa presente hoje pode desaparecer. Se o problema se confirmar, será impossível praticar agricultura na região sem o uso de irrigação, e o acesso à água será muito dificultado;

Figura 8. Anomalias anuais de chuva para o Nordeste (em mm/dia) para o futuro 2071-2100, em relação ao clima do presente 1961-90. Anomalias representam à média de três modelos regionais (resolução de 50 km lat-lon) para os cenários de emissão A2-altas emissões e B2-Baixas emissões. Cores avermelhadas/azuis representam anomalias negativas/positivas de chuva, e escala de cores aparece ao lado direito de cada painel.



Fonte: Relatório de Clima do Inpe-www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas

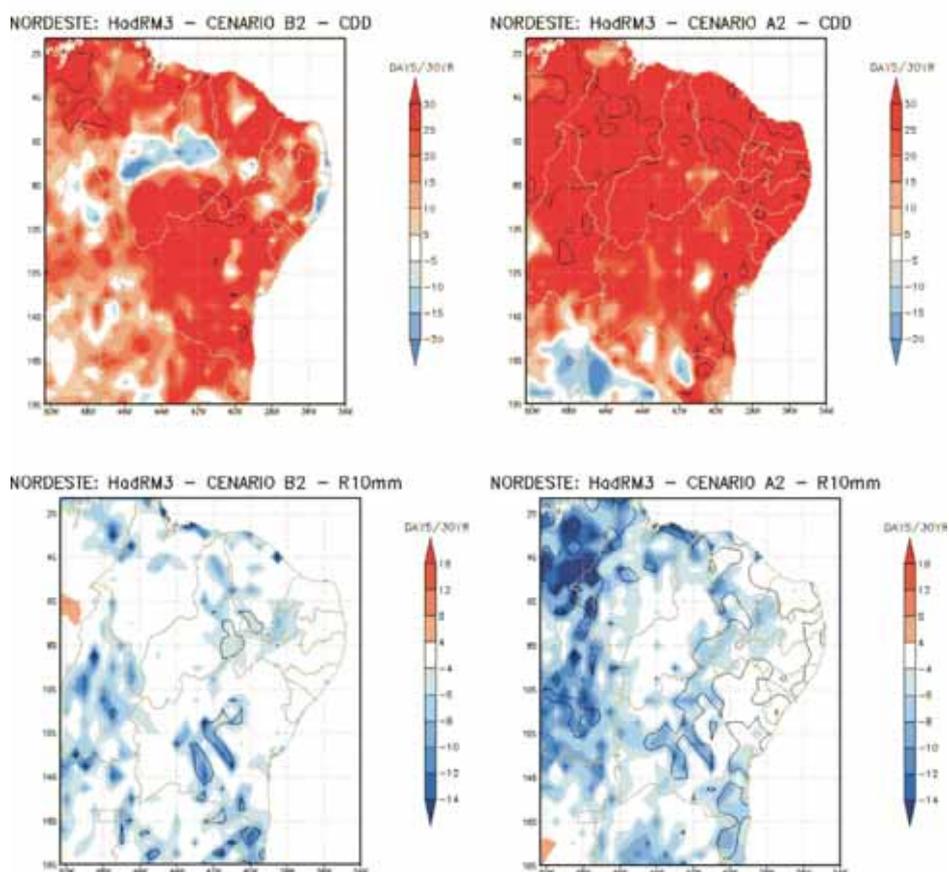
- O alto potencial para evaporação do Nordeste, combinado com o aumento de temperatura, causaria diminuição da água de lagos, açudes e reservatórios;
- O semi-árido nordestino ficará vulnerável a chuvas torrenciais e concentradas em curto espaço de tempo, resultando em enchentes e graves impactos sócio-ambientais;
- Espera-se uma maior frequência de dias secos consecutivos e de ondas de calor decorrente do aumento na frequência de veranicos;
- A produção agrícola de subsistência de grandes áreas pode se tornar inviável, colocando a própria sobrevivência do homem em risco;
- Com a degradação do solo, aumentará a migração para as cidades costeiras, agravando ainda mais os problemas urbanos;
- A caatinga pode dar lugar a uma vegetação mais típica de zonas áridas, com predominância de cactáceas. O desmatamento da Amazônia também afetará a região.

O cenário pessimista sugere uma tendência de extensão da deficiência hídrica (maior frequência de dias secos consecutivos) por praticamente todo o ano para o Nordeste, isto é, tendência a “aridização” da região semi-árida até final do século 21. Define-se “aridização” como sendo uma situação na qual o déficit hídrico que atualmente apresenta-se no semi-árido durante 6-7 meses do ano seja estendido para todo o ano, conseqüência de um aumento na temperatura e redução das chuvas. Em resumo, grande parte do semi-árido nordestino, onde a agricultura não irrigada já é atividade marginal, tornar-se-ia ainda mais marginal para a prática da agricultura de subsistência.

Resultados de estudos mostrados no Relatório do Grupo de Trabalho II do IPCC (2007b) revelam que, no processo de aquecimento global, não só choverá menos e as secas serão mais intensas, mas há outro perigo – alguns indicadores apontam que o processo de aquecimento global também significará uma redução no nível de água dos reservatórios subterrâneos. Falam-se muito em água do subsolo para se resolver, de vez, os problemas hídricos da região semi-árida nordestina. Porém, como conseqüência das mudanças climáticas, espera-se uma redução de água nos aquíferos nordestinos, que pode chegar a 70% até o ano 2050. Um estudo desenvolvido por um grupo de pesquisadores do Serviço Geológico dos Estados Unidos

(MILLY *et al.* 2005) avalia o impacto de mudanças climáticas em vazões de rios em nível mundial. A média foi feita com 12 modelos do IPCC AR4 para o período entre 2041-2060 em relação ao clima atual 1900-70, e eles detectaram reduções nas vazões no Rio São Francisco entre 15 a 20% para o período 2080-2099 em relação presente.

Figura 9. Tendências lineais do índice de dias secos consecutivos CDD para o Nordeste do Brasil (dias/30 anos) e para extremos de dias com chuva maior que 10 mm R10 (dias/30 anos) para o futuro 2071-2100 em relação ao clima do presente 1961-90. Os mapas mostram a média para o modelo regional HadRM3P (resolução de 50 km lat-lon) para os cenários de emissão A2-altas emissões e B2-Baixas emissões. Cores avermelhadas/azuis representam tendências positivas/negativas do CDD e R10, e escala de cores aparece ao lado direito de cada painel



Fonte: Relatório de Clima do Inpe-www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas.

Os ambientalistas estão preocupados também com a caatinga, apontada como um dos ecossistemas onde deverão ser implementadas ações mais urgentes. A caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro, abriga uma fauna e uma flora únicas, com muitas espécies endêmicas, que não são encontradas em nenhum outro lugar do planeta. Trata-se de um dos biomas mais ameaçados do Brasil, com grande parte de sua área tendo já sido bastante modificada pelas condições extremas de clima observadas nos últimos anos, e potencialmente são muito vulneráveis às mudanças climáticas. Resultados de experiências de modelagem de vegetação associadas aos cenários de mudanças de clima de altas emissões (SALAZAR et al., 2007, OYAMA e NOBRE, 2003) sugerem que no semi-árido a caatinga pode dar lugar a uma vegetação mais típica de zonas áridas, com predominância de cactáceas, até finais do século 21.

8. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE AÇÕES E ADOÇÃO DE POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

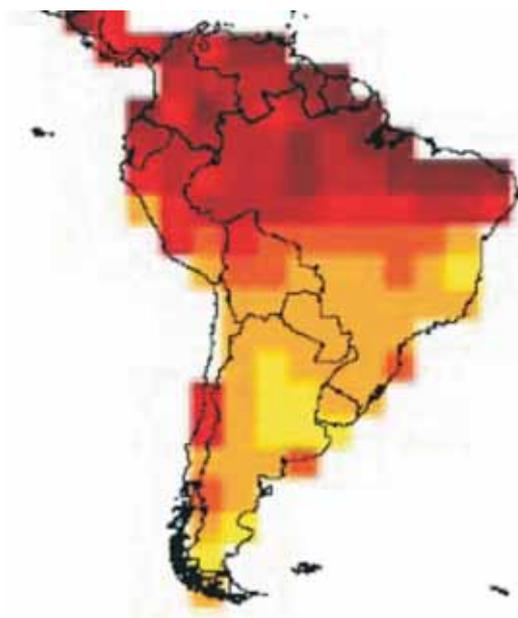
A degradação da terra e a desertificação não são problemas restritos ao Brasil. 33% da superfície terrestre, uma área onde moram cerca de 2,6 bilhões de pessoas, sofrem com as mesmas dificuldades. Particularmente na região Subsahara, na África, de 20 a 50% das terras estão degradadas, área onde residem mais de 200 milhões de pessoas. A destruição do solo também é severa na Ásia e América Latina, assim como em outras regiões do globo.

O impacto da mudança climática sobre os recursos hídricos no Brasil deverá ser mais dramático, porém, no Nordeste, onde há escassez de água, já é um problema. Atualmente, a disponibilidade hídrica *per capita* na região é insuficiente nos Estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, sem contar as variações regionais de déficit hídrico, que tornam a situação ainda mais insustentável para os habitantes do semi-árido afetados pelo stress hídrico. Mudanças climáticas ameaçam intensificar as dificuldades de acesso à água. A combinação das alterações do clima com competição por recursos hídricos pode levar a uma crise “potencialmente catastrófica” e será enfrentada, sobretudo, por agricultores pobres.

Num estudo recente, Baettig et al. (2007) construíram um índice cumulativo de mudanças de clima (CCI) a partir dos cenários extremos de altas e baixas emissões dos cenários do IPCC AR4. Os resultados deste estudo para América do Sul (Figura 10) indicam que as mudanças climáticas

mais intensas para o final do Século 21 acontecerão na região tropical, especificamente Amazônia e Nordeste do Brasil, com valores de CCI variando entre 7.5 a 11 na Amazônia e no sertão nordestino. Essas duas regiões constituem o que poderia ser chamado de *climatic change hot spots* e representam as regiões mais vulneráveis do Brasil às mudanças de clima. Esse é um índice baseado unicamente em extremos do clima, temperatura e precipitação.

Figura 10. Valores do índice cumulativo de mudanças de clima (CCI), a partir dos cenários extremos de altas e baixas emissões dos cenários do IPCC AR4 até o Século XXI. Escala de cores varia de 0 a 11.



Fonte: Baettig et al. 2007.

O Nordeste é a região brasileira mais vulnerável ao aquecimento global. Uma das projeções, levando em conta o cenário mais crítico e o modelo mais rigoroso, aponta para a desertificação do semi-árido nordestino até o fim do século. A curta estação chuvosa presente hoje pode desaparecer. Se o problema se confirmar, será impossível praticar agricultura na região sem o uso de irrigação e o acesso à água será muito dificultado. Os Estados do Nordeste apresentam baixos indicadores sociais e de saúde e, acrescenta-se a isto, a existência de um clima semi-árido, na maior parte da região, aumenta a vulnerabilidade sócio-ambiental da população. Segundo o Atlas de

Desenvolvimento Humano da ONU (IBGE, 2007 <www.ibge.gov.br>), os índices que avaliam as condições de vida da população mostram seus valores mais baixos na região. Segundo o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) da ONU, todos os estados nordestinos apresentam resultados inferiores (IDH=0.517) à média brasileira (IDH=0.757). O semi-árido nordestino apresenta IDH=0.405, se consideradas as sete regiões dos Estados de Piauí, Pernambuco e Bahia. Entre os dez menores índices de IDH do país, oito são de Estados do Nordeste. A região também apresenta as maiores taxas de mortalidade infantil e a menor expectativa de vida no Brasil.

A população mais pobre é a que sofrerá mais e a região mais afetada seria um quadrilátero no Nordeste, compreendendo desde o oeste do Piauí, o sul do Ceará, o norte da Bahia e oeste de Pernambuco, onde se encontram as cidades com menor desenvolvimento humano. As projeções de clima indicam riscos de secas intensas no semi-árido e reduções de chuva em até 40% e aumentos de temperatura em até 4 a 5°C, no pior cenário de emissão de gases de efeito estufa até o final do Século 21.

A Agência Nacional de Águas (ANA) tem liberado recentemente o “Atlas de Água do Nordeste” (ANA 2006). Segundo esse, mais de 70% das cidades com população acima de 5.000 habitantes do semi-árido nordestino enfrentarão crise no abastecimento de água para consumo humano até 2025, independentemente da megaobra de transposição do Rio São Francisco. Problemas de abastecimento deverão atingir cerca de 41 milhões de habitantes da região do semi-árido e entorno, e estimam-se o crescimento da população e a demanda por água em cerca de 1.300 municípios, dos nove Estados do Nordeste e do norte de Minas Gerais. Na região pesquisada haveria água suficiente para uma população estimada em 8,4 milhões de habitantes em 2025. Outros 41 milhões não teriam garantida a oferta para consumo humano, caso não sejam feitos os investimentos recomendados pelo estudo. Esse seria um cenário no qual estão contempladas medidas para conter perdas de água e melhorar o gerenciamento da demanda. Detalhes do estudo estão disponíveis no endereço eletrônico da Agência Nacional de Águas (<www.ana.gov.br>).

Considerando a sensibilidade do Nordeste às variações climáticas, e diante da potencial mudança do clima nessa região, considerada como a mais vulnerável às reduções de chuva e aumento das temperaturas, é necessária uma ação coordenada do governo para enfrentar a mudança de

clima. O governo brasileiro está criando um sistema para prever a ocorrência de grandes períodos de seca no semi-árido e apontar as áreas suscetíveis a um processo de desertificação desencadeado por mudanças climáticas. Batizado de Sistema Brasileiro de Alerta Precoce de Secas e Desertificação, uma iniciativa dos ministérios do Meio Ambiente e da Ciência e Tecnologia, o projeto visa à criação e implantação de um sistema que permita prever mais imediata as grandes secas episódicas que atingem a região, assim como a criação de uma ferramenta de diagnóstico para identificar as áreas mais afetadas pela degradação ambiental, e mais suscetíveis à desertificação. Esse sistema é relevante para o Programa Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (*PAN-Brasil*). O programa é um meio de planejamento que visa definir as diretrizes e as principais ações para o combate e a prevenção do fenômeno da desertificação nas regiões brasileiras com clima semi-árido e sub-úmido seco.

Considerando a variabilidade climática no clima do presente e os possíveis cenários de mudanças de clima até finais do século 21, pode-se concluir que o semi-árido é mais frequentemente afetado por eventos climáticos associados ao déficit hídrico. Isso serve como um indicativo inicial de regiões potencialmente mais vulneráveis devido a sucessivos eventos climáticos críticos. Os cenários de clima futuro mais quente e seco até finais do Século 21 poderiam ainda levar a um agravamento do déficit hídrico no semi-árido, afetando a agricultura de subsistência e a caatinga. Os efeitos não serão sentidos apenas pelos agricultores no semi-árido, mas pelas populações das grandes cidades da região que dependem do abastecimento de alimentos. Essa situação pode levar ao encarecimento dos produtos. Deve-se salientar que a presente análise se baseia apenas em fatores climáticos, e não levam em conta as ações de mitigação resultantes de políticas públicas atuais.

Fazem-se necessários estudos de vulnerabilidade do semi-árido a mudanças dos usos da terra, clima, aumento populacional e conflito de uso de recursos naturais, porém, é este esforço nacional que deverá incluir a elaboração de um Mapa de Riscos e Vulnerabilidade do Semi-árido e às Mudanças Climáticas, integrando as diferentes vulnerabilidades setoriais (saúde, agricultura, economia, transportes, recursos hídricos, elevação do nível do mar, biodiversidade, entre outras) e integrando estas com as demais causas de vulnerabilidade, sejam ambientais ou sociais.

Um plano contra a mudança climática incluiria tanto ações de adaptação (como mudar o zoneamento em cidades litorâneas para evitar o avanço do mar ou propor um sistema de grande escala de cisternas para armazenamento de água) quanto à mitigação. Em relação à adaptação, atualmente, a maior parte das cisternas no Nordeste é fruto da ação Articulação do Semi-Árido (ASA), uma ONG que reúne mais de 700 entidades da sociedade civil para combater os efeitos da seca no país. A ASA tem um programa denominado “Um Milhão de Cisternas” que, em menos de quatro anos, construiu no Nordeste 215.777 cisternas, destas, 20.532 no Piauí. Podemos concluir que ainda que a seca seja uma situação crônica e contínua no semi-árido, a população ainda não tem chegado a um nível de adaptação a este fenômeno. Iniciativas como construção de cisternas e carros pipa podem resolver o problema de uma seca de meses ou poucos anos, mas não resolveriam uma seca mais prolongada. Precisa-se de políticas ambientais de longo prazo, assim como um programa de educação ambiental que podem ajudar a população a entender o problema de mudanças de clima e os seus impactos. Assim, os habitantes do semi-árido poderiam enfrentar o problema, e de adaptar aprendendo a conviver com os impactos das mudanças climáticas, e empreendendo ações de adaptação e mitigação.

A melhor forma de mitigar os efeitos da uma possível desertificação é reduzir o risco de o aquecimento global continuar sem freios, ou seja, diminuir rápida e radicalmente as emissões globais de gases do efeito estufa, tanto pela queima de combustível fóssil como pelo desmatamento. O aquecimento global é um processo que não pode ser revertido, mas poderia ser amenizado com este tipo de medida de mitigação. Todas estas ações deverão ser consideradas no Plano Nacional de Mudanças Climáticas, que atualmente está sendo discutido nos meios científicos, acadêmicos e do governo, sob a liderança do Ministério do Meio Ambiente.

Agradecimentos

Este documento é derivado principalmente dos resultados dos projetos “Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século 21”, apoiado pelo Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira – PROBIO, com o apoio do MMA/BIRD/GEF/CNPq e pelo Global Opportunity Fund-GOF do Reino Unido, por meio do projeto “Using Regional Climate Change Scenarios for Studies on Vulnerability and Adaptation in Brazil and South America”.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Atlas Nordeste: abastecimento urbano de água: alternativa de oferta de água para as sedes municipais da Região Nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais*. Brasília, 2006.
- AMBRIZZI, T. et al. *Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais: relatório 3*. Brasília: MMA, 2007.
- BAETTIG, M.; WILDS, M.; IMBODEN, D. A climate change index: where climate change may be most prominent in the 21st century. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007. Doi: 10.1029/2006GL028159.
- BRASIL. Congresso. Senado Federal. *Relatório final Comissão El Niño*. Brasília, 1997. 192 p.
- BRÍGIDO, J. *Ceará: homes e fatos*. [S.l.]: Editora Demócrito Rocha, 2001.
- DIAS, P. Silva; MARENGO, J. Águas atmosféricas. In: REBOUÇAS, Aldo da Cunha; BRAGA JR., Benedito; TUNDIZI, José Galizia (Ed.). *Águas doces no Brasil: capital ecológico usos múltiplos, exploração racional e conservação*. 2. ed. São Paulo: USP, 2002.
- GUERRA, P. B. *A civilização da seca*. [S.l.]: DNOCS, 1981.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Climate change 2007: the physical science basis summary for policymakers*. [S.l.], 2007a. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- _____. _____.: impacts, adaptation and vulnerability summary for policymakers. [S.l.], 2007b. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change.
- KANE, R. P. Relationship between the southern oscillation/El Niño and rainfall in some tropical and midlatitude regions. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences: Earth Planet Sciences*, n. 3, p. 223-235, 1989.
- MAGALHÃES, A. et al. The effects of climate variations on agriculture in Northeast Brazil. In: PARRY, M.; CARTER, T.; KONIJN, N. (Ed.). *The impact of climate variations on agriculture: assessments in semi-arid regions*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1988. V. 2, p. 277-304.
- MARENGO, J. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, n. 16, p. 1-18, 2002.

_____. Condições climáticas e recursos hídricos no Norte brasileiro. In: TUCCI, C. E; BRAGA, B. *Clima e recursos hídricos no Brasil*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos FBMC/ANA, 2003. V. 9, p. 117-161.

_____. Cenários de mudanças climáticas para o Brasil em 2100. *Ciência & Ambiente*, v. 34, p. 100-125, 2007a.

_____. *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*. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007b. V. 1, p. 214.

_____; NOBRE, C. A. The hydroclimatological framework in Amazonia. In: RICHEY, J.; MCCLAIN, M.; VICTORIA, R. (Ed.). *Biogeochemistry of Amazonia*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 17-42.

_____; DIAS, M. Silva. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: ÁGUAS doces no Brasil: capitais ecológicas usos múltiplos, exploração racional e conservação. 3. ed. São Paulo: USP, 2006. p. 63-109.

_____ et al. *Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o século XXI: projeções de clima futuro usando três modelos regionais: relatório 5*. Brasília: MMA, 2007a.

_____. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 2007b.

MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A.; VECCHIA, A. V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, n. 438, 17 Nov. 2005. Doi: 10.1038/nature04312.

MUDANÇA de clima: negociações internacionais sobre a mudança de clima: vulnerabilidade, impactos e adaptação á mudança de clima. Brasília: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da Republica, 2005. (Cadernos NAE, v. 1).

NOBRE, P. et al. Seasonal-to-decadal predictability and prediction of South American climate. *Journal of Climate*, v. 19, p. 5988-6004, 2006.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. A new climate-vegetation equilibrium state for tropical South America. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 23, p. 2199-2203, 2003.

SALAZAR, L.; NOBRE, C.; OYAMA, M. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007. Doi: 10.1029/2007GL029695.

SOUZA FILHO, F. Variabilidade e mudança climática nos semi-áridos brasileiros. In: TUCCI, C. E.; BRAGA, B. *Clima e recursos hídricos no Brasil*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos FBMC/ANA, 2003. V. 9, p. 117-161.

XAVIER, T. M. B. S. *Tempo de chuva: estudos climáticos e de previsão para o Ceará e Nordeste setentrional*. Ceará: ABC Editora, 2003.

Resumo

Este estudo apresenta uma revisão do estado da arte em estudos de clima, variabilidade e mudanças climáticas no semi-árido do Nordeste, e são direcionadas principalmente aos aspectos de avaliações de vulnerabilidade e impactos, e com o intuito de fornecer subsídios para políticas regionais de adaptação às mudanças climáticas. O trabalho representa uma atualização do que foi publicado no relatório do Núcleo de Assuntos Estratégicos (NAE) em 2005. As evidências observadas e o histórico climático da região sugerem que o semi-árido é vulnerável à variabilidade de clima, como evidenciadas pelas secas associadas aos eventos El Niño. Os cenários futuros de clima sugerem ocorrência de secas nesta região no futuro, sendo consequência do aquecimento global, que poderá afetar a população, a agricultura e os ecossistemas naturais. Este documento apresenta estudos das tendências climáticas para a região, desenvolvidos durante os últimos 50 anos e baseados em observações. Em seguida, é feita uma análise dos cenários de clima do futuro (até 2100) gerados pelos modelos usados no Quarto Relatório de Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC AR4) e a partir do recente Relatório de Clima do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).

Palavras-chave

Mudanças climáticas. Vulnerabilidade. Semi-árido. Estudos do clima.

Abstract

This document represents a review of the state-of-the-art on the knowledge of climate variability and climate change in the semi-arid region of Northeast Brazil, and it is focused on impacts and vulnerability assessments. The main objective is to provide tools for discussions and implementation of regional environmental policies for adaptation and mitigation to climate change. The study updates a previous report published by the Center for Strategic Studies (Núcleo de Assuntos Estratégicos - NAE) in 2005. The evidences provided by the climatic history in the region suggest that the semi-arid region of Northeast Brazil is vulnerable to the extremes of the climate variability, as becoming evident by the droughts during some El Niño events. On longer time scales, future climate change projections suggest the occurrence of drought, which is a consequence of global warming, that may affect the population, agriculture and the natural ecosystems. The contents of this study include analyses of climatic tendencies detected during the last 50 years based on observations. In addition, analyses of climate change projections to the end of the 21 Century (year 2100) are made, using the global climate change projections released by the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), as well as using the results of the climate change projections derived from the regional models runs documented in the Climate Report recently produced by the National Institute for Space Research (Inpe).

Keywords

Climate changes. Vulnerability. Semi-arid regions. Climate studies.

O autor

JOSE A. MARENGO é graduado em Física e Meteorologia e mestre em Engenharia de Recursos de Água e Terra (Universidade Nacional Agrária/Peru); e doutor em Meteorologia (Universidade de Wisconsin/USA). Fez pós-doutorado na NASA-GISS, Universidade de Columbia e na Universidade da Florida (USA). É pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), onde coordena o Grupo de Estudos e Pesquisas em Mudanças Climáticas, do novo Centro de Ciências do Sistema Terrestre (CCST).

1. INTRODUÇÃO

O Brasil dispõe da maior reserva hídrica superficial do planeta, cerca de 19,4%, e um dos maiores potenciais hidráulicos. Porém, não está em situação confortável em relação a disponibilidade hídrica e localização de suas demandas consuntivas e não-consuntivas de água (FREITAS, 2003). De fato, algo em torno de 90% da água se encontra nas bacias hidrográficas de baixa densidade demográfica dos Rios Amazonas e Tocantins, no entanto, cerca de 90% da população convivem com o restante dos recursos hídricos.

Devido à grande participação das usinas hidrelétricas no Sistema Elétrico Brasileiro, a geração de energia elétrica no país é fortemente dependente dos regimes hidrológicos das bacias hidrográficas. Como existe um desequilíbrio regional na disponibilidade da água – que pode ser observado através das secas recorrentes na região Nordeste, da degradação de rios e solos na região Sudeste, dos riscos sócio-ambientais de cada região e da rápida elevação da demanda por água e energia em todo o território nacional – novos e antigos empreendimentos hidrelétricos estão, em maior ou menor grau, vulneráveis às mudanças climáticas.

O risco de mudanças climáticas globais futuras, ou seja, de um aquecimento adicional do planeta, pode alterar o ciclo hidrológico, e com isso o regime e a disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas. De fato, mudanças diferenciadas de temperatura levam a alterações nos padrões de pressão atmosférica e ventos. Portanto, podem-se esperar mudanças nos padrões de precipitação.

As previsões de elevação global do nível do mar para o ano de 2099 indicam, para diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa, valores entre 18 cm e 59 cm. As ocorrências dos fenômenos *El Niño Southern Oscillation* (Enso) têm sido mais freqüentes, mais longas e mais intensas no curso dos 20 a 30 últimos anos, em relação aos cem anos anteriores (OMM, 2004).

Sendo assim, torna-se importante a realização de estudos de previsão e avaliação da vulnerabilidade climática da geração de energia elétrica no Brasil, com destaque para a avaliação das vazões afluentes aos reservatórios hidrelétricos por meio da previsão climática e hidrológica, fundamentais na definição de cenários nos quais os riscos hidrológicos e, portanto, energéticos poderiam ser conhecidos antecipadamente¹.

2. IMPACTOS, VULNERABILIDADE E ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS DO CLIMA

As avaliações do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que os países em desenvolvimento estão entre os mais vulneráveis às mudanças do clima. O IPCC complementa afirmando que quanto maior a dificuldade de um país em lidar com a variabilidade natural do clima e com seus eventos extremos, maior será o seu esforço para se adaptar às mudanças climáticas (POPPE e ROVERE, 2005).

Os impactos das mudanças climáticas não são distribuídos uniformemente entre regiões e populações. Na realidade, os indivíduos, setores e sistemas podem ser mais ou menos afetados ou beneficiados. Assim, esse relativo padrão de distribuição da vulnerabilidade climática pode variar em magnitude e intensidade de acordo com a localização geográfica, o tempo, as condições sociais, econômicas e ambientais, e a infra-estrutura de cada lugar.

Segundo o IPCC (2003), a vulnerabilidade climática pode ser definida como “o grau de suscetibilidade de indivíduos ou sistemas ou de incapacidade

¹ É conveniente, em escalas de tempo maiores, fazer a distinção entre mudança climática e variabilidade climática natural: Mudança Climática - tendência ou variação sistemática num dado sentido, de parâmetros climáticos. Pode ocorrer devido à mudança sistemática da forçante radiativa do sistema climático ou por ação antropogênica. Variabilidade Climática - inerente ao sistema climático e pressupõe alternância, ou seja, superposição de variações cíclicas ou quase-cíclicas. A detecção de uma tendência no clima, requer portanto, que a amplitude da variabilidade natural seja quantificada. Para isso, uma grande variedade de dados e resultados de modelos atmosféricos têm sido utilizados. (OMM, 2004 e ANEEL, 2003).

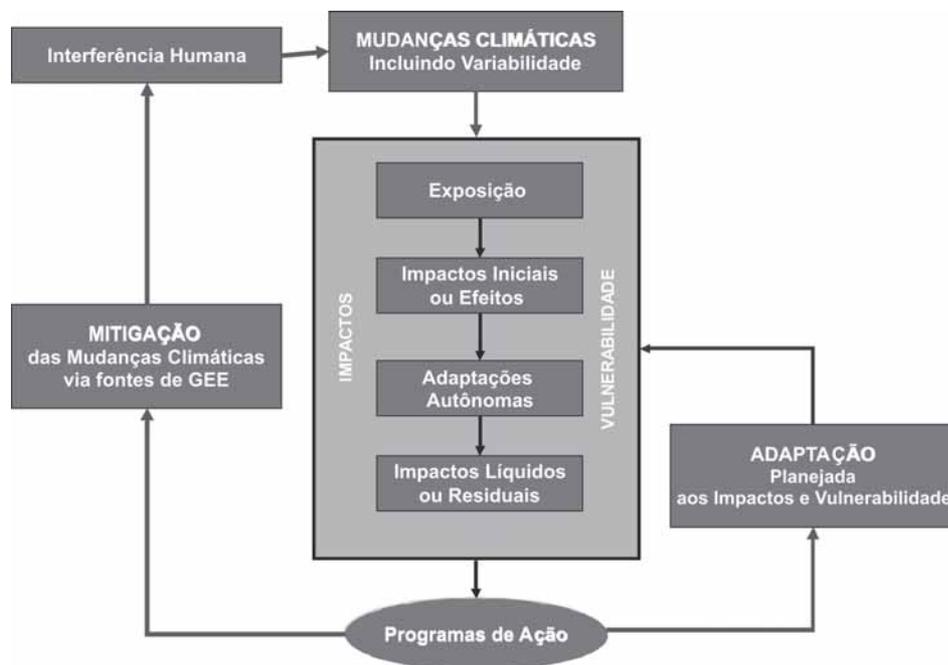
de resposta aos efeitos adversos da mudança climática, incluindo a variabilidade climática e os eventos extremos”.

Os impactos decorrentes da mudança do clima estão diretamente ligados à vulnerabilidade nos quais os sistemas naturais e antrópicos estão expostos. Aprender a lidar com a vulnerabilidade, em especial, com a sensibilidade e com a capacidade de adaptação a esses impactos, será o caminho mais eficaz para mitigar o problema das mudanças climáticas. Para tanto, faz-se necessário a definição de métodos e estratégias para nortear os estudos de pesquisa nessa área e a aplicação dos mesmos nas diferentes regiões. Nesse sentido, o terceiro relatório do IPCC (2003) estabeleceu setores de atuação para estudos em vulnerabilidade climática nos sistemas humanos, tais como:

- Aumento do nível do mar;
- Recursos hídricos - secas, enchentes e precipitações intensas;
- Ondas de calor;
- Agricultura e segurança alimentar;
- Saúde humana;
- Atividades econômicas;
- Zonas costeiras;
- Assentamentos humanos.

Smit et al (1999) apud IPCC (2003) afirma que o entendimento da adaptação é essencial para uma avaliação de impacto e vulnerabilidade e, conseqüentemente, fundamental para estimar os custos e riscos das mudanças climáticas. A magnitude na qual os ecossistemas, o suprimento alimentar e o desenvolvimento sustentável são vulneráveis depende da exposição dos mesmos aos impactos das mudanças climáticas e a habilidade dos sistemas afetados para se adaptar. Então, para se avaliar o risco das mudanças climáticas, a avaliação de impacto e vulnerabilidade deve considerar a probabilidade de ocorrência de adaptação autônoma a essas mudanças, ou seja, aquela que ocorreria sem interferência antrópica direta sobre o sistema (ver Figura 1).

Figura 1. A posição das ações de mitigação e adaptação dentro do contexto das mudanças climáticas



Fonte: Traduzido do IPCC (2003)

Mesmo com a previsão de redução das emissões de gases efeito estufa (GEE), a adaptação é considerada uma importante estratégia, junto à mitigação, por conta das prováveis mudanças no clima, como o aumento das temperaturas globais, do nível do mar e dos eventos extremos (em frequência e/ou magnitude/intensidade). Por essa razão, o desenvolvimento de estratégias de adaptação para lidar com estes riscos é tão relevante quanto à necessidade conjunta de ações de mitigação.

O IPCC (2003) e Magrin et al. (2007) definem que a “adaptação” no contexto das mudanças climáticas é “o ajustamento dos sistemas naturais, sociais e econômicos em resposta para o atual ou futuro estímulo climático e/ou seus impactos, nos quais podem ser adversos (danos) ou benéficos (oportunidades)”. Nesse contexto, a adaptação refere-se às alterações em processos, práticas e infra-estrutura para compensar potenciais danos ou, até mesmo, tirar vantagem de oportunidades associadas às mudanças do clima.

A característica principal das mudanças climáticas em relação à vulnerabilidade e adaptação dos recursos hídricos está relacionada às alterações sensíveis na variabilidade do regime hidrológico e os eventos extremos, e não simplesmente com a tendência média da mudança do clima. A adaptação é uma importante questão dentro das mudanças climáticas e deve ser tratada em dois sentidos: avaliação dos impactos e vulnerabilidades, e desenvolvimento e implementação de estratégias e medidas concretas de redução de riscos (KUNDZEWICZ, et al., 2007).

A maioria dos setores, regiões e comunidades estão razoavelmente adaptadas às condições médias de mudança do clima, particularmente se as mudanças forem graduais. Contudo, as perdas oriundas das variações climáticas extremas são substanciais e crescentes em alguns setores. Essas perdas indicam que a adaptação autônoma não tem sido suficiente para impedir os danos associados às variações das condições climáticas.

As comunidades têm se mostrado mais vulneráveis e menos adaptáveis às mudanças climáticas, especialmente em relação aos eventos extremos.

Bergkamp et al (2003) expõe que a adaptação pode ser caracterizada de diferentes maneiras, distinguindo adaptação planejada e adaptação espontânea, conforme se verifica a seguir:

- *Adaptação planejada* – processo de criação de políticas públicas baseado numa consciência das vulnerabilidades e condições existentes. Os atributos que irão mudar e as ações requeridas servirão para minimizar as perdas e/ou otimizar benefícios. Referem-se às ações pró-ativas governamentais;
- *Adaptação espontânea* – freqüentemente associada a um contexto de adaptação de negócios, enfatizando o papel do setor privado, dentro de uma postura reativa. É motivada, em geral, por mudanças de mercado, alterações na assistência social governamental e nas preferências da sociedade.

3. EFEITOS E VULNERABILIDADE CLIMÁTICA SOBRE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

3.1 AVALIAÇÕES DO IPCC

Segundo o IPCC (2003 e 2007 a, b), os efeitos da evolução do clima sobre a vazão dos cursos de água e recarga dos aquíferos variam de acordo com as regiões e os cenários climáticos idealizados, principalmente em função das variações de precipitações projetadas. Nas projeções realizadas até o momento, os resultados para América do Sul não apresentam coerência na projeção das vazões, em primeiro lugar, por causa das diferentes projeções de precipitação, e em segundo lugar, em função das diferentes projeções relativas à evaporação, que pode contrabalançar o aumento das precipitações. Em geral, as variações projetadas do escoamento superficial anual médio são menos confiáveis que as projeções baseadas no aumento de temperatura, pelo fato da evolução das precipitações variarem muito nos cenários (ver Quadro 1).

Quadro 1. O efeito das mudanças climáticas nos recursos hídricos

Na escala das bacias hidrográficas, o efeito de uma determinada mudança climática varia segundo as propriedades físicas e de vegetação de cada bacia e as quais se agregam as alterações da cobertura terrestre (uso do solo).

Um terço da população mundial, cerca de 1,8 bilhões de habitantes, vive atualmente em países e regiões que sofrem com estresse hídrico médio e alto². Segundo as projeções da Organização das Nações Unidas, o crescimento demográfico mundial colocará cerca de 5 bilhões de habitantes nesta situação até 2025.

² Uma classificação de zonas de Estresse Hídrico é proposta por Alcamo, J. et al. (2000): Zonas Sem Estresse Hídrico – relação de retiradas de água (demandas) estão abaixo de 0,1 da disponibilidade hídrica (média); Zonas de Baixo Estresse Hídrico – relação de retiradas de água (demandas) estão entre 0,1 e abaixo de 0,2 da disponibilidade hídrica (média); Zonas de Médio Estresse Hídrico – retiradas de água (demandas) acima de 0,2 e abaixo de 0,4 da disponibilidade hídrica (média); Zonas de Alto Estresse Hídrico – retiradas de água (demandas) entre 0,4 e 0,8 da disponibilidade hídrica (média); Zonas de Muito Alto Estresse Hídrico – retiradas de água (demandas) acima de 0,8 da disponibilidade hídrica (média).

Sendo assim, a mudança climática prevista poderá ter um efeito negativo na vazão dos rios e na recarga dos lençóis freáticos e aquíferos em muitos países expostos ao estresse hídrico.

Se a demanda por água aumenta geralmente em função do crescimento demográfico e do desenvolvimento econômico, ela diminui, entretanto, em certos países em função de uma utilização mais eficaz.

A mudança climática não deverá ter uma influência importante sobre a demanda de água nas cidades e nas indústrias em geral. Todavia, poderá ter um efeito considerável sobre o consumo de água para irrigação, que depende da maneira como a evaporação é contrabalançada ou acentuada pelas variações da pluviosidade. Uma alta das temperaturas, e por conseqüência uma elevação das perdas por evaporação das culturas, deverá normalmente se traduzir por um aumento na demanda de água para fins de irrigação.

As inundações poderão aumentar em amplitude e freqüência em muitas regiões devido ao aumento de eventos extremos de precipitações, aumentando o escoamento na maior parte das zonas e facilitando, por outro lado, a recarga da água subterrânea em certas planícies inundáveis.

As mudanças de uso do solo poderão acentuar estes fenômenos. Durante o período de estiagem (também denominado “águas baixas”), o nível dos cursos de água deverá diminuir em numerosas regiões em razão de uma evaporação elevada, cujos efeitos poderão ser ampliados ou neutralizados em função da pluviosidade.

A mudança climática projetada deverá, em algumas áreas, contribuir para diminuir a qualidade dos recursos hídricos – elevando sua temperatura e aumentando a carga poluente proveniente do escoamento superficial e do transbordamento das estações de tratamento e sistemas de esgotamento sanitário.

Em regiões de previsão de redução de chuvas e, portanto, de diminuição de vazão nos rios, a qualidade das águas também deverá sofrer abalos em função da limitação para diluição dos efluentes.

Deve-se dar especial atenção às bacias hidrográficas menos reguladas por não possuírem estruturas hidráulicas, assim como aquelas que já sofrem com eventos extremos, cheias e secas, ou ainda, as que são exploradas de maneira não satisfatória, com problemas recorrentes de poluição e falta d'água, dentre outros problemas. No caso dos sistemas não regulados, que não possuem obras hidráulicas suficientes para atenuar os efeitos da variabilidade hidrológica sobre a qualidade e quantidade de água, a vulnerabilidade é ainda maior. No caso de bacias hidrográficas exploradas de maneira desordenada, de forma não sustentável, os diversos usuários da água e do solo geram restrições suplementares que acentuam a vulnerabilidade às mudanças climáticas.

Entretanto, é possível aplicar instrumentos de gestão de recursos hídricos, notadamente a gestão integrada de bacias hidrográficas, a fim de facilitar a adaptação aos efeitos hidrológicos da mudança climática e atenuar as diversas formas de vulnerabilidade de cada bacia.

Atualmente, tem sido usual a gestão da oferta de água (proteção estrutural contra as inundações, construção de diques, utilização de zonas de estocagem de água, melhoramento da infra-estrutura para captação e distribuição de água) no lugar de métodos de gestão da demanda (destinados a influir no comportamento dos usuários da água, visando reduzir as perdas e melhor gerenciar o consumo de água na bacia hidrográfica).

Fonte: IPCC, (2003 e 2007 a, b).

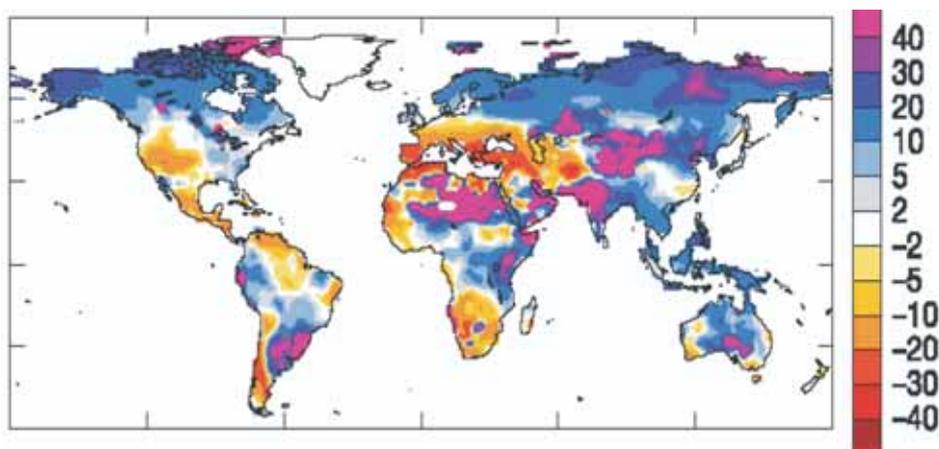
3.2. AS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS REGIONAIS E SUAS LIMITAÇÕES SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS

As projeções de mudanças climáticas em nível regional sobre os recursos hídricos, ou seja, as previsões relacionadas às anomalias de precipitação sobre as bacias hidrográficas em território brasileiro variam bastante de um modelo para outro. A título de exemplo, segundo os modelos do *Hadley Center* (Inglaterra), variações projetadas para 2050 no escoamento superficial anual médio, para um aumento de 1% na concentração de CO₂, sobre a bacia do rio Paraná, aparecem como positivas no modelo HadCM3 (+ 50 a 150 mm/ano nas cabeceiras da bacia) e negativas no modelo HadCM2

(-50 a 150 mm/ano nas cabeceiras da bacia) (IPCC, 2003 E 2007, b). De fato, os modelos são mais incertos no Hemisfério Sul em função de uma menor e mais recente rede de observação hidrometeorológica da região do que no Hemisfério Norte.

Na Figura 2 são apresentados os resultados da projeção das vazões dos rios em 2050, representado a média de 12 modelos usados pelo IPCC no seu relatório de 2007 no Cenário A1B. Nessas previsões, teríamos redução de vazões em parte das Bacias Amazônica e do Tocantins, o que seria preocupante principalmente para os novos empreendimentos dessas bacias com grande potencial hidráulico. Todavia, no que diz respeito à Bacia do Paraná, manteríamos a tendência de aumento de vazões, o que favoreceria, sobretudo, o parque hidrelétrico já instalado hoje, como a Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional e a UHE de Porto Primavera.

Figura 2. Projeções de mudanças em vazões de rios ate 2050 (média de 12 modelos de IPCC AR4, cenário A1B)



Fonte: IPCC, 2007a.

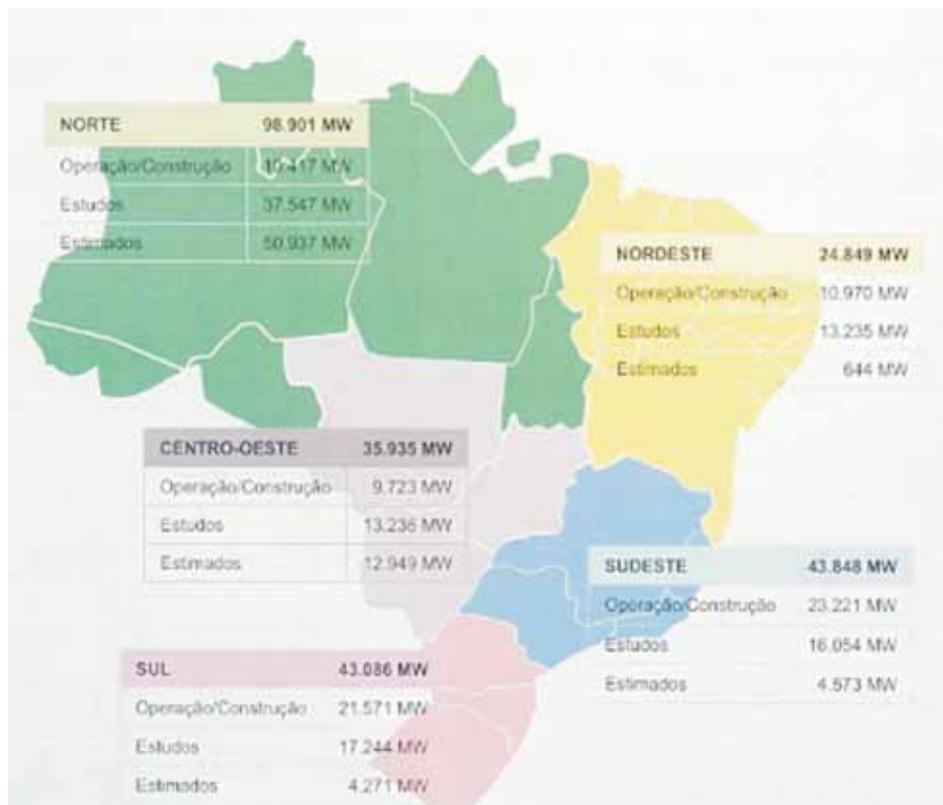
4. ENERGIA HIDRÁULICA E USOS DA ÁGUA NO BRASIL

4.1 SITUAÇÃO ATUAL DO POTENCIAL HIDRÁULICO BRASILEIRO

O potencial hidrelétrico brasileiro registrado em dezembro de 2007 no Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (Sipot), da Eletrobras, era de aproximadamente 247 GW, sendo que 31% representam aproveitamentos na fase de operação ou construção (Eletrobras, 2007).

Na Figura 3 é apresentado o potencial hidrelétrico brasileiro, por região geográfica. O potencial de cada região foi agrupado da seguinte forma: Estimados, Estudos e Operação/Construção, ou seja, empreendimentos em funcionamento ou com garantia de entrar em funcionamento.

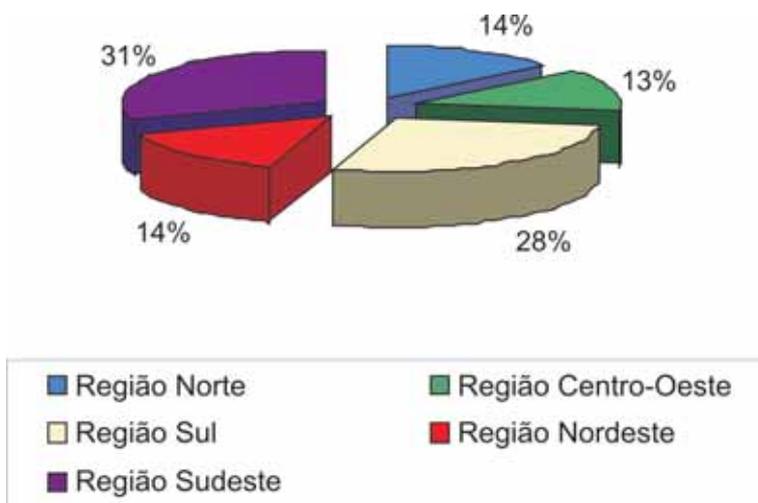
Figura 3. Potencial Hidrelétrico Brasileiro – 2007



Fonte: Eletrobrás, Sipot (2007)

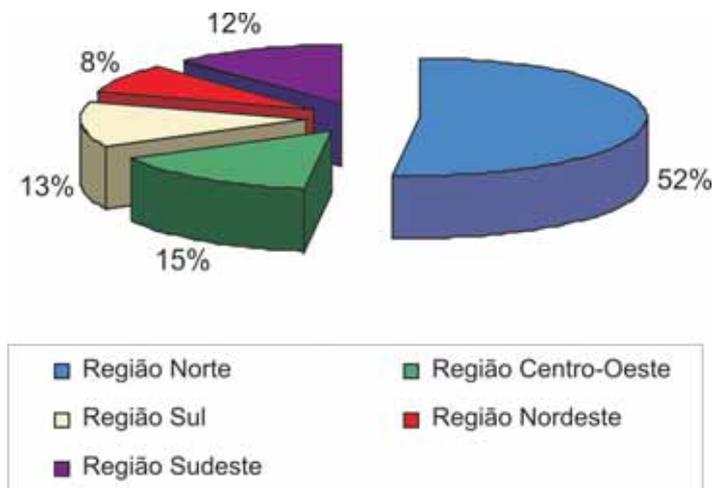
Observando os gráficos 1 e 2 apresentados a seguir, podemos observar que as Regiões Sul e Sudeste detêm juntas cerca de 59% do potencial hidrelétrico em operação/construção. Por outro lado, a Região Norte detém sozinha, cerca de 52% do potencial hidrelétrico em estudos e estimados. Ou seja, isso indica que no presente (curto prazo) as preocupações com a vulnerabilidade devem se concentrar principalmente nas Regiões Sul e Sudeste, porém, no futuro a compreensão das alterações climáticas e de suas relações com o potencial hidráulico deve priorizar a Região Norte.

Gráfico 1. Potencial hidrelétrico brasileiro – operação/construção – 2007



Fonte: Eletrobras, SIPOT (2007).

Gráfico 2. Potencial hidrelétrico brasileiro – estudos e estimados – 2007



Fonte: Eletrobras, SIPOT (2007).

Figura 4. Potencial hidrelétrico brasileiro total e correspondente às PCH's, por regiões hidrográficas – 2007



Fonte: Eletrobras, SIPOT (2007).

A Figura 4 apresenta o potencial hidrelétrico brasileiro segundo a divisão hidrográfica nacional, que foi estabelecida pela Resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Nessa mesma figura é apresentado, também, o potencial de cada região hidrográfica correspondente às Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), totalizando o valor de 24.106 MW. Esse valor alcança o percentual de cerca de 9,8% do potencial hidrelétrico total nacional.

De imediato, observa-se uma significativa concentração da geração hidráulica nas bacias situadas nas Regiões Sul e Sudeste brasileiras, próximas aos grandes pólos consumidores, e um reduzido aproveitamento dos recursos hídricos. Portanto, do potencial hidráulico nas Regiões Norte e Centro-Oeste, onde esses recursos são abundantes.

4.2. ALTERAÇÕES DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO E VAZÕES NA AMÉRICA DO SUL

O sistema elétrico brasileiro é fortemente dependente da disponibilidade hídrica de médio e longo prazos, para a produção de energia firme³ e, portanto, para a garantia de atendimento da demanda. Esse sistema foi projetado com base na probabilidade de falha estimada, utilizando séries históricas de vazão que se iniciam em 1930 e às quais, anualmente, são incorporadas novas informações da rede hidrometeorológica nacional, atualmente administrada pela Agência Nacional de Águas (ANA).

A interligação cada vez mais efetiva do sistema de geração hidrelétrica reduz consideravelmente os riscos de não atendimento da demanda, por falta ocasional de chuvas em uma dada bacia hidrográfica. Todavia, como a maioria das usinas hidrelétricas está localizada na Bacia Hidrográfica do Paraná, mais de 55% da capacidade instalada está sujeita às mesmas variabilidades climáticas. Deve-se, portanto, buscar a melhoria dos modelos de previsão de vazão de médio e longo prazos.

Segundo estudos do IPH/UFRGS e do IAG/USP, desde 1970 as Regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste apresentam vazões médias aproximadamente 30% superiores ao período anterior (1940-1970). Se o aumento fosse permanente, seria possível reavaliar a energia firme das usinas, ou seja, para a mesma capacidade instalada, seria possível gerar mais energia, com menor risco de falha (TUCCI, et. al., 2002).

O aumento de vazões ocorre devido a dois fatores (TUCCI, op. cit.):

- Aumento das precipitações nas referidas Regiões do Brasil;
- Modificação no uso do solo nas mesmas Regiões.

No primeiro caso, as alterações podem representar variabilidades que, em médio e longo prazos, tendem a mudar de inclinação, reduzindo novamente a energia citada e a produção média.

No segundo caso, o aumento seria permanente e, portanto representaria, de alguma forma, um ganho energético, apesar dos outros aspectos danosos ao ambiente.

³ A energia firme de uma usina hidrelétrica corresponde à máxima produção contínua de energia que pode ser obtida, supondo a ocorrência da seqüência mais seca registrada no histórico de vazões do rio onde ela está instalada.

Segundo os resultados aferidos no relatório do Grupo de Trabalho 2 do IPCC de 2007, as tendências de precipitação da América do Sul entre 1960 e 2000, reforçam a tese de aumento das precipitações na Bacia do Prata e redução nas vertentes do Pacífico do Chile e Peru. Nas demais áreas o sinal não é claro (Figura 5).

Figura 5. América do Sul - Tendências de Precipitação de 1960 a 2000



Nota: As bolas indicam tendência de redução e as cruzes de aumento das chuvas, o negrito indica uma tendência mais acentuada.

Fonte: IPCC, WG II (2007, b).

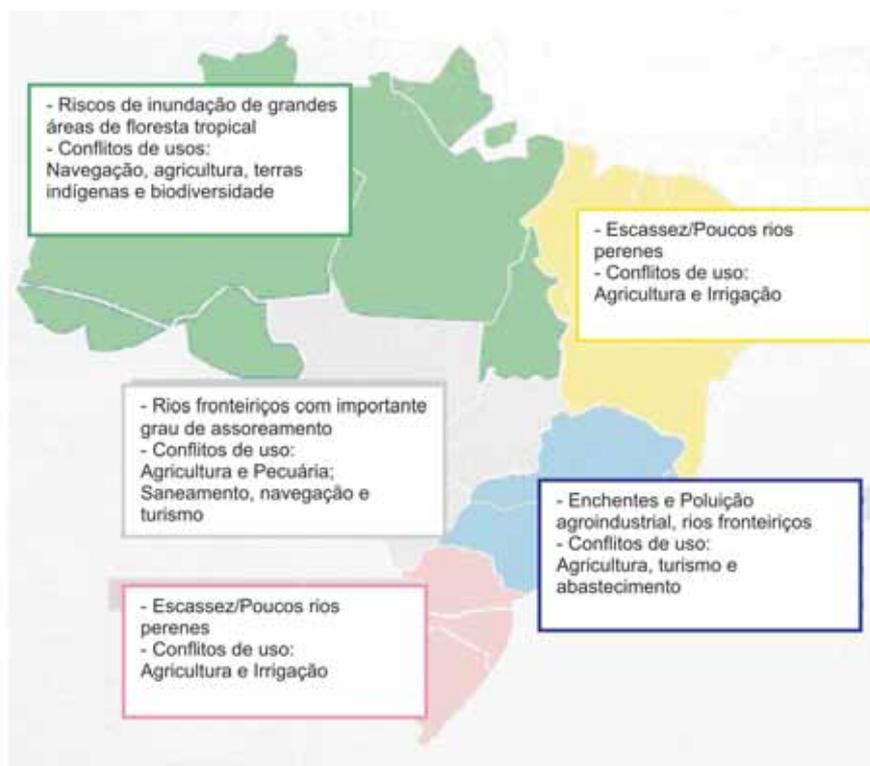
4. 3. CONFLITOS, IMPACTOS E VULNERABILIDADES DA GERAÇÃO HIDRÁULICA

Um agravante na experiência brasileira de uso do potencial hidráulico diz respeito à grande diversidade entre as regiões do país quanto à disponibilidade hídrica. Se as secas são recorrentes no sertão nordestino, no Sudeste, é a poluição industrial e urbana, além do assoreamento dos rios que preocupam, enquanto mais ao Sul, a produção agrícola e animal é responsável por uma poluição difusa de difícil controle dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos. Mesmo na maior bacia hidrográfica do planeta existem problemas decorrentes da expansão demográfica e ocupação desordenada. Alguns pontuais, como a poluição dos igarapés e rios que banham os centros urbanos, outros de amplitude regional, como a transmissão

de doenças de veiculação hídrica e a degradação da qualidade da água nas comunidades menores durante os períodos de estiagem.

Assim sendo, é importante destacar, nos cenários de médio e longo prazo do uso da água em bacias hidrográficas brasileiras, que as necessidades em água tendem a aumentar em função do crescimento demográfico e, sobretudo, do desenvolvimento econômico. A Figura 6 resume este quadro delicado de conflitos entre energia, meio ambiente e recursos hídricos.

Figura 6. Restrições e vulnerabilidade do uso do potencial hidrelétrico por região



Fonte: Elaboração própria.

Bacias Hidrográficas

Neste capítulo é apresentado uma síntese dos recursos hídricos disponíveis para os diversos usos, destacando a vulnerabilidade para o seu aproveitamento e os principais conflitos de uso da água existentes.

BACIA DO SÃO FRANCISCO – RECURSOS HÍDRICOS, VULNERABILIDADE E PRINCIPAIS CONFLITOS DE USO DA ÁGUA

A bacia do Rio São Francisco possui uma capacidade instalada de geração hidrelétrica de cerca de 10,23 GW, vazão média de longo período na foz de 2850 m³/s, área de drenagem de 645.000 km² e população superior a 15 milhões de habitantes. Atualmente, ela já registra uma demanda atual de recursos hídricos para outorga de irrigação da ordem de 500 m³/s, embora o consumo atual verificado não ultrapasse a 150 m³/s, indicando um superdimensionamento das outorgas, embora ocorram algumas incertezas⁴. Para 2025, é possível se considerar um consumo médio outorgado de 335 m³/s, o que pode sugerir um impacto na geração de energia hidrelétrica de 300 a 900 MW médios, dependendo da localidade em que se retiraria a água da bacia do São Francisco⁵ e da forma como se utilizaria o recurso hídrico (irrigação, abastecimento humano e animal, etc.).

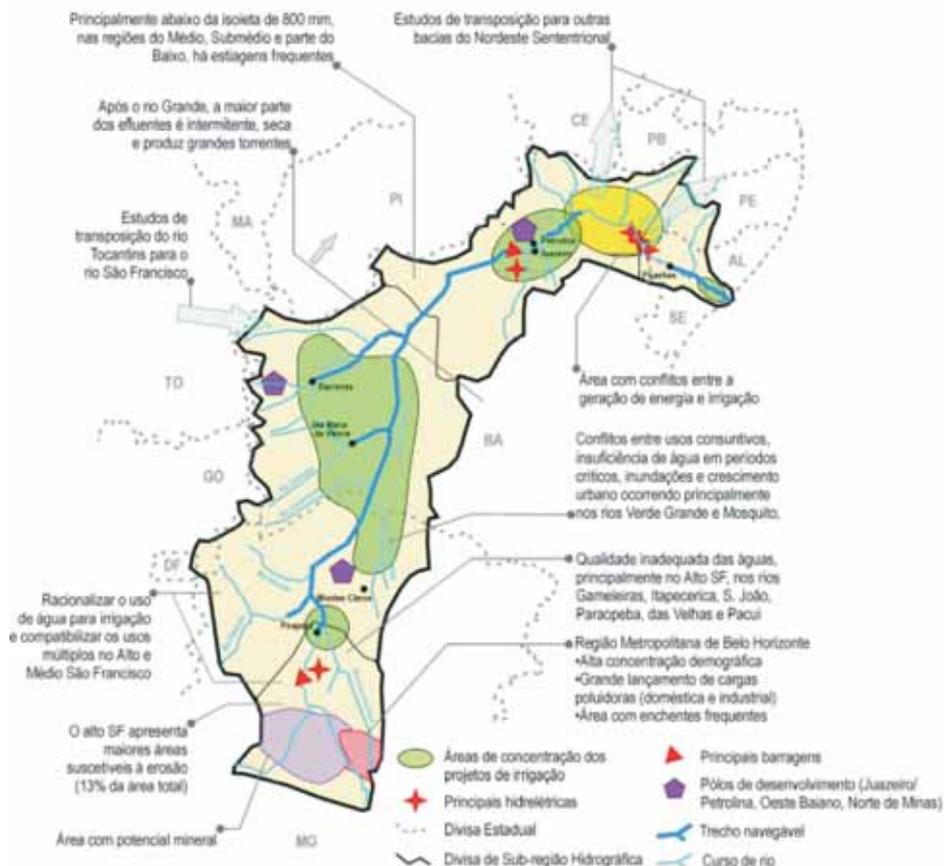
Na Figura 7 é possível se identificar os principais usos e potenciais conflitos de uso da água na bacia do rio São Francisco.

Em relação às mudanças climáticas, a bacia do Rio São Francisco é caracterizada principalmente pela disponibilidade hídrica limitada ao atendimento das demandas de uso consuntivo, como irrigação para produção de alimentos e abastecimento de água para fins de consumo humano e para diluição de poluentes proveniente de esgotos urbanos e industriais, sendo assim, com uma possível alteração do regime de chuvas os conflitos pelo água podem aumentar. Ações que aumentem a eficiência no usos dos recursos hídricos para irrigação e no maior tratamento de poluentes urbanos devem ser priorizadas. Já quanto ao potencial hidráulico, uma redução de 50 m³/s na vazão média anual do São Francisco, poderia provocar uma diminuição na geração de algo em torno de 80 a 160 MW ao longo ano, que deveria ser completada por outras fontes no sistema elétrico interligado.

⁴ Segundo estudos da ANA, estima-se a existência de uma área irrigada na bacia do São Francisco de aproximadamente 350.000 ha, que corresponde a uma vazão retirada equivalente de 207 m³/s médios.

⁵ A perda energética acumulada para cada m³/s consumido da cascata do São Francisco varia de 1,06 MW médios na região da UHE de Xingo a 3,22 MW médios a montante da UHE de Três Marias.

Figura 7. Bacia do Rio São Francisco – principais conflitos no uso da água



Fonte: ANA, 2002a.

BACIA DO PARANÁ – VULNERABILIDADE E PRINCIPAIS CONFLITOS DE USO DA ÁGUA

A Bacia do Paraná é de vital importância para o sistema elétrico brasileiro, nela se encontra mais de 50% da capacidade instalada em operação no país e a Usina Hidrelétrica de Itaipu de 14.000 MW de potência. Todavia, essa bacia também é a maior densidade populacional, o que leva a diversos conflitos de uso do solo e da água, sejam urbanos ou rurais, que podem inviabilizar o aproveitamento futuro do potencial hidráulico e, sobretudo, trazer limitações à geração de energia elétrica em usinas já construídas e em funcionamento.

Sendo assim, na Bacia do Paraná é necessária atenção aos conflitos que se traduzem em vulnerabilidades da geração de energia hidrelétrica, que merecem uma maior atenção do setor elétrico e dos gestores da água, pois podem se agravar no futuro, seja com o crescimento da demanda pelos recursos hídricos, seja pela maior ocorrência de anos de estiagem provocados como decorrência do aquecimento global. Apresentamos a seguir alguns desses conflitos:

- setor de navegação, destaque para hidrovias do Paraná-Tietê, responsável pelo transporte de boa parte da produção de grãos das Regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste do país, que necessita de um nível mínimo nos rios e prioridade na operação das eclusas do Canal Pereira Barreto, por exemplo;
- setor de turismo e lazer, pode-se ressaltar o conflito do Lago da Furnas, na bacia do Rio Grande, em Minas Gerais, onde 33 municípios limítrofes, entraram na justiça para exigir uma indenização contra a empresa Furnas Centrais Elétricas, por ter baixado em cerca de 12 metros o nível médio do referido lago, em 2001, ano da Crise de Energia Elétrica do Brasil (ANA e EFEI, 2001);
- setor de saneamento, são inúmeros casos de conflito, porém, é de se salientar o de Santos, Grande São Paulo, a Usina Hidrelétrica de Henry Borden situada no Rio Cubatão reduziu sua capacidade de geração de energia elétrica de 880 MW para menos de 100 MW, devido ao alto grau de poluição das águas do Rio Tietê, o que impediu o bombeamento forçado de suas águas para o canal do Rio Pinheiros, para em seguida ser jogada na Represa Billings e terminar na UHE de Henry Borden (ver quadro 2) (CAPOBIANCO, 2002).

Em relação às mudanças climáticas, a bacia do Rio Paraná tem sido caracterizada principalmente pelo risco de enchentes. Com maior frequência nos anos de aquecimento anômalo do Oceano Pacífico, ou seja, de ocorrência do fenômeno *El Niño*. A cascata de hidrelétricas da bacia tem sido usada na regulação da disponibilidade hídrica e na gestão dos eventos extremos de cheia. A integração transfronteiriça é fundamental para aumentar o êxito dessa gestão. Em outras palavras, Brasil, Argentina, Paraguai, Uruguai e Bolívia devem intensificar a integração dos seus sistemas de meteorologia,

recursos hídricos e energia hidrelétrica para potencializar os benefícios da variabilidade climática, que tem provocado um aumento significativo da disponibilidade hídrica, porém, sem deixar de se considerar a proteção dos usos do solo e da água à jusante das barragens. Já quanto ao potencial hidráulico, um aumento de 30% na vazão média de longo período do Rio Paraná provocou um acréscimo considerável no potencial hidráulico. A estatística das vazões entre 1941-1971 e 1972-2000 apresenta uma variação média de mais 36%⁶. Sendo assim, a Usina Hidrelétrica de Itaipu que foi projetada nos anos 1970 para ter uma capacidade instalada de 12.600 MW, pode a partir de 2007 ampliar sua capacidade de geração para 14.000 MW.

Quadro 2. Vulnerabilidade do Lago da Represa Billings – Região Metropolitana de São Paulo

A qualidade da água na Represa Billings encontra-se bastante comprometida devido ao bombeamento das águas poluídas dos Rios Tietê e Pinheiros, à ressuspensão dos sedimentos contaminados e à ocupação humana desordenada de sua bacia hidrográfica.

A concentração de poluentes disponíveis no meio líquido decorre tanto de cargas externas, lançadas de forma concentrada diretamente no reservatório ou em seus tributários, como também de cargas internas, provenientes dos sedimentos, que interagem permanentemente com o meio líquido, devido, principalmente, ao fenômeno da ressuspensão, resultante da movimentação da água provocada pela ação dos ventos, chuvas ou mudanças de temperatura. Dessa forma, mesmo que o despejo de substâncias poluentes seja paralisado completamente em uma determinada represa, a presença de sedimentos acumulados em seu leito ao longo dos anos em que recebeu cargas de esgotos domésticos e industriais faz com que a mesma possa apresentar elevadas concentrações de substâncias contaminantes por um longo tempo.

⁶ Segundo Silva & Guetter (2001), tem-se observado que algumas áreas da Bacia do Paraná tem apresentado uma aceleração do ciclo hidrológico desde o início da década de 1970, o que pode ser constatado por meio do aumento da frequência de chuvas mais intensas, do aumento de vazões médias e da ocorrência de estiagens com maior duração.

As maiores preocupações com a água da Represa Billings são a eutrofização, a concentração de metais pesados e a presença de microrganismos patogênicos e algas potencialmente tóxicas.

Lago da Represa Billings



Fonte: Capobianco, 2002

BACIA AMAZÔNICA – RECURSOS HÍDRICOS, VULNERABILIDADE E VARIABILIDADE CLIMÁTICA E PRINCIPAIS CONFLITOS DE USO DA ÁGUA

A Bacia Amazônica continental é a maior bacia hidrográfica do globo, com uma superfície de aproximadamente 6.100.000 km². Situada na zona intertropical, recebe precipitações médias anuais de 2460 mm. A vazão média na foz do Rio Amazonas no Oceano Atlântico está estimada em 209.000 m³/s (MOLINIER et al., 2002).

O quadro 3 apresenta questões básicas do conhecimento científico atual sobre a vulnerabilidade climática da Bacia Amazônica.

Quadro 3. Bacia Amazônica – Aspectos básicos e incertezas da vulnerabilidade e variabilidade climática e do regime hidro-meteorológico

De acordo com os resultados do projeto Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica (HiBAm) (FREITAS, 2004 e FILIZOLA, 2002), a Bacia Amazônica é afetada por variabilidades climáticas do El Niño South Oscillation (ENSO) que ocasionam uma importante baixa nas precipitações (ACEITUNO, 1988; RAO e HADA, 1987). O impacto dessa variabilidade climática sobre a hidrologia do Rio Amazonas e seus principais tributários tem sido estudada por diversos autores (MARENGO e HASTENRATH, 1993; MARENGO, 1995), mas esses resultados são em parte inválidos por não considerarem o fenômeno de alguns barramentos hidráulicos ao longo do curso principal do Amazonas (MOLINIER et al., 1996). O impacto dessa variabilidade climática sobre a erosão e os fluxos de matéria transportados na Bacia Amazônica ainda são desconhecidos.

Entre as certezas e incertezas do conhecimento do regime hidro-meteorológico da Bacia Amazônica destacam-se:

- A variabilidade pluviométrica está relativamente bem conhecida na Amazônia brasileira (MARENGO e HASTENRATH, 1993; ROUCOU, 1997), bem como na zona tropical andina (ACEITUNO, 1988; RONCHAIL, 1996, 1998 e 2002). No entanto, existe ainda uma zona ainda pouco estudada e entendida (entre os paralelos 5° e 25° de latitude sul), posto que está ligada, a priori, ao sinal oceânico, e que corresponde às planícies amazônicas (Llanos) da Bolívia, do Peru e do extremo oeste do Brasil.
- Os regimes hidrológicos hoje já são bem conhecidos para os Rios da Amazônia boliviana e brasileira, graças aos levantamentos realizados pelos programas PHICAB e HiBAm (ROCHE e FERNANDEZ, 1992; MOLINIER et al., 1996, 1997). No entanto, não existe praticamente nenhuma informação sobre hidrologia e erosão nos cursos d'água no domínio tropical andino (Colômbia, Equador e Peru), isso também se constitui num freio à modelização hidrológica do conjunto da bacia Amazônica. Por fim, a relação ENSO –

hidrologia, só foi um pouco explorada para o Rio Amazonas e alguns de seus tributários mais importantes (MARENGO, 1995). O impacto da variabilidade climática sobre a hidrologia no conjunto da Bacia Amazônica é ainda pouco conhecido.

Fonte: Freitas, 2006.

O Quadro 4 e a Figura 8 apresentam restrições sócio-ambientais ao uso do potencial hidráulico da Bacia Amazônica.

Quadro 4. Hidrelétricas e meio ambiente na Amazônia

A construção de usinas hidrelétricas na Amazônia brasileira teve início na década de 70, com a entrada em operação em 1975, no Estado do Amapá, da Usina de Coaracy Nunes de 40 MW de potência e 23 km² de área inundada. Desde então já foram construídas seis usinas hidrelétricas, totalizando uma potência instalada de 6.050 MW e uma área alagada de cerca de 7.600 km². Os impactos sócio-ambientais decorrentes da implantação desses empreendimentos no maior ecossistema de floresta tropical do planeta, e também, de elevada diversidade cultural e biológica, vem servindo de base para estudos e avaliações, que tem orientado os novos empreendimentos.

Entre os casos estudados, o da hidrelétrica de Tucuruí, localizada na bacia hidrográfica do Rio Tocantins, em região de floresta tropical úmida, é sem dúvida um dos mais significativos, sendo a usina de maior potência instalada e área inundada na região, 4.240 MW e 2.800 km², respectivamente, tendo deslocado 4.407 famílias.

O início de obra foi em 1976, e o da operação em 1984, com objetivo inicial de gerar energia elétrica para as cidades da Amazônia Oriental, para favorecer a ocupação e o desenvolvimento da Região Norte do país, e também viabilizar a navegação, a partir de eclusas. Contudo o enorme potencial minerológico da região, atraiu indústrias eletrointensivas para o local, principalmente de alumínio que necessitam de muita energia. Diante dessa demanda Tucuruí também iria fornecer energia para o parque industrial. Atualmente a usina fornece 50% de sua geração para as indústrias e o restante para os centros urbanos, nos estados do Pará e Maranhão.

A falta de uma legislação ambiental na época, o desrespeito à legislação vigente e a ausência de dados sobre a região, provocaram uma série de impactos esperados ou não. O setor elétrico brasileiro aprende muito com Tucuruí.

Entre os impactos inesperados destacaram-se os seguintes: isolamento da população ribeirinha após o enchimento do reservatório; ocupação irregular e desordenada; conflito de uso da água; ausência de infra-estrutura; proliferação intensa de mosquitos; intensificação da atividade madeireira predatória; perdas de zonas de pesca a jusante da barragem; aparecimento de grandes cardumes a montante; enorme mortandade de animais com o enchimento do reservatório; emissão de gases de efeito estufa a partir da superfície do lago; reassentamento em áreas impróprias para a agricultura; alto índice de abandono de lotes e de comercialização dos mesmos; pressão na estrutura fundiária local; destruição das relações sociais das comunidades indígenas na região; suprimento de energia seletivo, sem atendimento a população atingida; mudanças da estrutura produtiva agro-extrativista para industrial; oferta de empregos a quem da mão-de-obra atraída para a região; conflitos entre pesca artesanal e comercial e problemas referentes ao cálculo da compensação financeira paga aos municípios que tiveram áreas inundadas. Entre os impactos esperados, destacou-se a perda da rica biodiversidade do local.

A variável ambiental no planejamento do setor elétrico foi incorporada tardiamente

Na fase de construção as medidas para o tratamento das questões sociais foram implementadas de maneira reativa pela concessionária responsável, sem a orientação de políticas voltadas para o reassentamento e ressarcimento das populações afetadas, bem como para o enfrentamento de situações emergenciais.

Diante de todas as circunstâncias ocasionadas pelo empreendimento, algumas lições foram apreendidas, como:

- Futuros projetos hidrelétricos devem ser implantados, incluindo, desde sua concepção, objetivos de desenvolvimento regional e local, não se limitando à geração

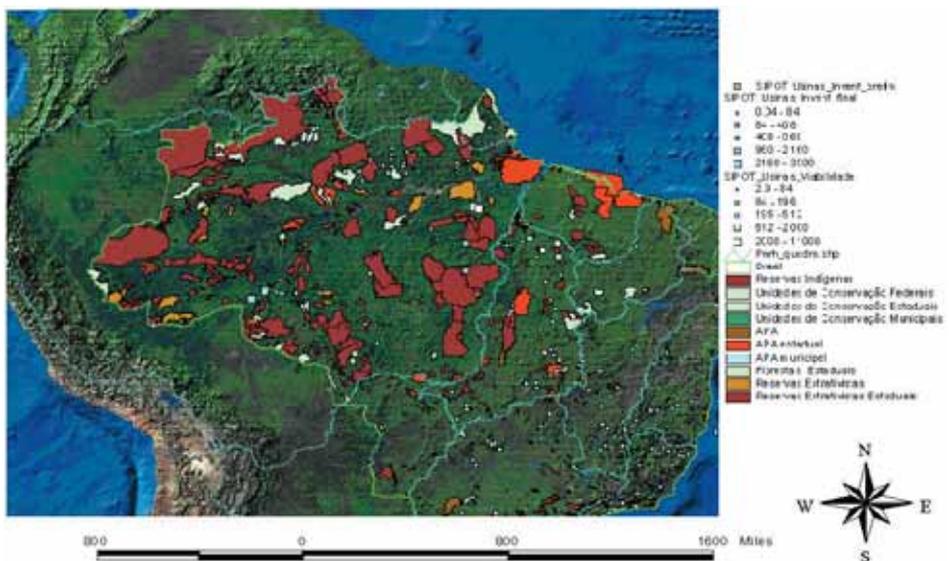
de energia elétrica para empreendimentos com benefícios externos à região;

- A implantação de novos empreendimentos hidrelétricos deve ser efetuada previamente a revisão dos estudos de inventário hidrelétrico de toda a bacia, contemplando além da participação da queda, a avaliação dos impactos sociais e ambientais decorrentes;
- A importância de um processo de avaliação prévia dos impactos ambientais de diversas alternativas exige a criação e aperfeiçoamento de novos mecanismos de participação pública em todas as etapas do projeto de grandes barragens;
- A implantação de empreendimentos hidrelétricos deve contar com a avaliação e respaldo de um comitê de bacia hidrográfica, que deve disciplinar a negociação entre os diversos agentes e usuários da água envolvidos;
- Devem ser objeto de revisão legal os critérios de definição da área diretamente impactada pelos empreendimentos hidrelétricos, com direito à compensação financeira, não se restringindo ao percentual de área inundada, e a criação de mecanismos de controle social da destinação e aplicação dos recursos financeiros;
- A incerteza científica sobre a magnitude e a relevância dos impactos e riscos ambientais do empreendimento, deve suscitar a adoção do “princípio de precaução” ao longo de todas as etapas de planejamento, construção e operação do projeto;
- O reconhecimento por parte do empreendedor que os movimentos sociais são interlocutores legítimos na definição das políticas públicas e na tomada de decisão que afetam o seu modo de vida;
- Necessidade de garantir o acesso às informações técnicas, em linguagem apropriada para domínio público referente ao projeto e os impactos associados;

- Necessidade da criação de canais permanentes de comunicação entre o empreendedor e as comunidades atingidas pelo empreendimento ao longo de todo o ciclo do projeto;
- Promoção de ações de desenvolvimento integrado das áreas rurais com ênfase em projetos de energia renovável e de melhoria da qualidade de vida da população, considerando a facilidade ao acesso aos benefícios dos empreendimentos pelas populações urbanas e baixos índices de atendimento às zonas rurais na Amazônia;
- As lições aprendidas com o caso estudado da UHE Tucuruí devem ser aproveitadas no planejamento, construção e operação de novos projetos hidrelétricos na Amazônia para que estes possam contribuir de fato para o desenvolvimento sustentável e participativo da região e do país.

Fonte: World Commission on Dams, 2000 e Freitas, 2003 e 2004

Figura 8. Bacias do Rio Amazonas e Tocantins – Usinas hidrelétricas inventariadas e em estudo de viabilidade e unidades de conservação e reservas indígenas



Fonte: Elaboração própria

É importante ressaltar os importantes progressos técnicos conseguidos nos últimos projetos de usinas hidrelétricas na Bacia Amazônica, ou seja, é perceptível a preocupação dos empreendedores públicos e privados do setor elétrico em projetarem usinas com lagos menores, como o exemplo das Usinas do rio Madeiras de Santo Antônio (3.150 MW) e Jirau (3.300 MW) com área inundada prevista total de cerca de 271 e 258 km², respectivamente, e na bacia do Rio Xingu, com a Usina de Belo Monte, com área inundada prevista também de aproximadamente 400 km² e capacidade instalada esperada da ordem de 7500 MW (FURNAS, 2005).

Quadro 5. Usinas hidrelétricas na Região Amazônica – relação da área do reservatório com potência da usina

USINAS NA REGIÃO AMAZÔNICA	ÁREA DOS RESERVATÓRIOS (km ²)	POTÊNCIA (MW)	ÁREA RESERVATÓRIO/POTÊNCIA DA USINA (km ² / MW)
BALBINA	2.360	250	9,44
SAMUEL	584	217	2,69
MANSO	387	210	1,84
TUCURUÍ			
1ª ETAPA	2.414	4.000	0,61
2ª ETAPA		8.000	0,30
JIRAU	258	3.300	0,08
SANTO ANTÔNIO	271	3.150	0,086

Fonte: Furnas, 2005

Já quanto às questões globais, a Bacia Amazônica tem uma enorme importância na dinâmica climática e no ciclo hidrológico do planeta. A bacia representa aproximadamente 16% do estoque de água superficial doce e, conseqüentemente, uma importante contribuição no regime de chuvas e evapotranspiração da América do Sul e do mundo. Mudanças regionais e globais têm provocado alterações no clima e na hidrologia da região. Notadamente, transformações no uso do solo com a conversão de mais de 700.000 km² de florestas tropicais em pastagens, acrescido ao fenômeno do aquecimento climático global, que tem registrado aumentos de temperatura médios de 0,6° a 0,9° C nos últimos cem anos. Com efeito, a mudança de temperatura pode levar a várias outras alterações do meio ambiente, entre elas, a intensificação do ciclo hidrológico global, o que provocará impactos

sobre os recursos hídricos a nível regional. De fato, mudanças diferenciadas de temperatura da atmosfera, dos continentes e dos oceanos, levam à mudanças de padrões de pressão atmosférica e de ventos. Portanto, poder-se-ia esperar mudanças nos padrões de precipitação, conforme os modelos matemáticos de previsão global do clima do Hadley Center para 2050, que apresentam reduções médias de 150 a 250 mm/ano-1 nas chuvas da região.

É de se salientar que, caso venha a se intensificar a ocorrência de fenômenos de aquecimento anômalo da Temperatura da Superfície dos Oceanos Pacífico e Atlântico as chuvas e, portanto, vazões dos rios devem ser reduzidas. De fato, no que diz respeito ao Oceano Pacífico “as ocorrências de El Niño tem determinado eventos extremos de deficiência de chuva e por conseqüência, baixas descargas nos rios da região, sobretudo, na parte norte oriental da Amazônia”. Tendências para condições mais secas foram observadas durante os eventos de El Niño de 1903, 1912, 1925-26, 1982-83, 1986-87 e 1997-98. Já quanto ao Oceano Atlântico, segundo o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/Inpe) e o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), no período de setembro de 2004 a setembro de 2005, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) esteve entre 0,5°C e 1,5°C acima da média no Oceano Atlântico Norte, ou seja, foi registrado a persistência de um aquecimento anormal. Esse fenômeno, possível responsável pela seca Amazônica de 2005, acabou alterando as correntes de massas de ar úmidas da Amazônia, principalmente em parcelas importantes das bacias do Rio Solimões, Rio Negro, Rio Madeira, Rio Juruá, entre outros (FREITAS, 2006). Já quanto ao potencial hidráulico, a tendência de reservatórios de menor capacidade de regulação, conforme comentado anteriormente, tende a deixar mais vulnerável à geração hidrelétrica em anos de deficiência hídrica.

5. MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO DO SISTEMA HIDRELÉTRICO BRASILEIRO E DOS USOS DA ÁGUA AOS RISCOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

Dada às incertezas dos modelos climatológicos atuais para prever as precipitações futuras nas bacias hidrográficas brasileiras, as recomendações aqui presentes, são, sobretudo, concentradas na redução da vulnerabilidade já existente para expansão e manutenção da geração da energia hidráulica no país.

A. Conflitos energia hidráulica e demais usuários de recursos hídricos

A ocorrência mais freqüente e com maior intensidade de eventos extremos, como secas e cheias, deverá aumentar o conflito entre usuários da água nas diversas bacias hidrográficas brasileiras. Com relação especificamente aos empreendimentos hidroelétricos, a expansão da demanda por recursos hídricos – em valores absolutos e em sua diversidade – exigirá um conhecimento mais profundo da área onde eles atuam, um acompanhamento permanente das condições de geração e não apenas no sítio da usina e no entorno do reservatório. Os balanços hidrológicos deverão ser mais precisos, os levantamentos dos impactos econômicos e ambientais terão de ser mais detalhados, enfim, tende a aumentar a responsabilidade social da usina perante a comunidade ribeirinha e os demais usuários. O desafio na geração hidrelétrica é integrar em seu planejamento e operação novos temas – e, portanto, novas competências – muitas vezes de natureza bastante distintas.

B. Conflitos energia hidráulica e demais usuários do solo

O crescimento demográfico e a expansão da ocupação ordenada e desordenada do território brasileiro tende a ampliar o número de atingidos pelos empreendimentos hidrelétricos, e assim, ganhar apoio político para suas reivindicações, o que torna a viabilização e execução do projeto uma etapa extremamente crítica. Isso porque depende, não só de financiamento de longo prazo, mas também de negociações cada vez mais demoradas, com custos de transação mais elevados e com menores garantias de êxito. Urge uma revisão das leis que definem os critérios de compensação financeira dos empreendimentos hidrelétricos. A título de exemplo, hoje não está previsto o ressarcimento de populações e municípios à jusante do barramento, além de grupos populacionais específicos, como os povos indígenas.

C. Gestão múltipla e integrada dos reservatórios

O aumento da freqüência e da intensidade dos eventos extremos, como os fenômenos de aquecimento anômalo do Oceanos Pacífico (El Niño) e Atlântico, necessitaram de uma gestão mais eclética dos reservatórios, que não só a otimização da geração hidráulica, reduzindo os impactos negativos e ampliando os benefícios para a bacia e para os demais usuários, decorrente tanto da decisão de instalar uma usina, quanto da gestão do reservatório da usina, alguns custos sociais acabarão sendo internalizados pelos geradores

por imposição do poder público, seguindo uma tendência já observada no plano internacional. Assim, deverão aumentar os investimentos em atividades antes marginais, como a conservação da cobertura vegetal, a regularização da vazão dos rios e seus afluentes, o controle de despejo de efluentes, a aquisição de informações hidrológicas e a ordenação do uso dos solos na bacia hidrográfica.

D. Novos arranjos institucionais e regulatórios para geração energia hidráulica

A redução da vulnerabilidade dos empreendimentos hidráulicos passa, sobretudo, por um maior aceite dos mesmos pela sociedade. É importante constatar que a complexidade dos projetos mais recentes já é superior ao que se observava até a década de 1980, em decorrência essencialmente das alterações na legislação. Hoje, são numerosos os arranjos institucionais e articulações políticas que precedem a tomada de decisão de investir na construção de uma barragem, uma usina hidroelétrica, ou uma grande central de geração térmica. As autorizações devem ser obtidas em órgãos de regulação do setor elétrico, hídrico e ambiental, além dos acordos com governadores, prefeitos e associações de moradores locais. Os atuais marcos reguladores, não somente exigem sucessivas licenças ambientais, concessões de exploração do potencial hidráulico e outorgas de uso da água, mas também impõem taxas pelo uso, consumo e descarga, assim como obrigações quanto à obtenção e fornecimento de informações hidrológicas. Não é por menos que, dos vários projetos em carteira no setor elétrico, poucos foram aqueles que não foram cancelados, postergados, ou reformulados na década de 1990.

E. Oportunidades tecnológicas e econômicas à geração de energia elétrica

A redução da vulnerabilidade de geração do sistema elétrico passa fortemente pela integração com outras fontes de energia e empreendimentos em diversas escalas. Ou seja, um desafio adicional a ser considerado diz respeito às mudanças ocorridas na própria indústria de geração elétrica, no plano tecnológico e no plano econômico. Paradigmas técnico-econômicos foram fortemente contestados, como por exemplo, o das grandes usinas, e novas oportunidades de negócio surgiram na instalação e operação de pequenas unidades de geração. Proliferaram as pequenas usinas colocadas em córregos e quedas d'água, o aproveitamento de resíduos da biomassa, as fazendas de geração eólica nas regiões costeiras e as turbinas derivadas da aviação, abastecidas por gás natural, e que podem ser instaladas em prédios

urbanos. O impacto econômico foi quase imediato: menos dependentes dos ganhos de escala, as novas tecnologias de geração viabilizaram o ingresso de novos produtores melhorando significativamente as condições de concorrência. Movimento esse que foi reforçado pela ampla desregulamentação dos serviços de infra-estrutura nos países industrializados e em desenvolvimento. Nesse cenário completamente remodelado, entre os atores mais importantes incluem-se alguns grandes grupos multinacionais, que se baseiam na escala planetária de suas operações, assim como nas crescentes economias de envergadura (ou escopo) que surgem entre os diferentes setores de infra-estrutura. Mas, são os novos atores que se destacam, são empresas e conglomerados de dimensão regional e local, que ingressaram na geração incentivados pela disponibilidade de unidades menores, que podem ser localizadas próximas aos centros de consumo, construídas mais rapidamente e em módulos, bastante flexíveis na operação e que podem funcionar apenas nos horários de pico. A favor desses empreendimentos estava também a pressão pela rentabilidade advinda da especulação acionária nas Bolsas de Valores do mundo, durante a década de 1990. No setor de infra-estrutura e particularmente na geração de energia, o *leit motiv* passou a ser a rapidez do retorno e a mitigação dos riscos, o que se coaduna perfeitamente com a filosofia e a estrutura de custo dos novos projetos.

Por último, em guisa de conclusão, indicamos sugestões de ações estruturais e não-estruturais nas bacias hidrográficas e na gestão do potencial hidráulica, principalmente na geração de energia elétrica, logicamente levando em consideração incertezas dos modelos de previsão de vazão e a vulnerabilidade de bacias e da área de energia e, portanto, da matriz energética brasileira aos riscos de alteração climática.

Ações estruturais

1. Construção / modificação de infra-estrutura física

Será necessário, o quanto antes, uma revisão dos arranjos de geração hidrelétrica do parque já instalado, principalmente em relação aos usos múltiplos da água, seja para períodos extremos de seca e cheia, seja para garantir uma melhor adaptação às necessidades de crescimento populacional e econômico das bacias hidrográficas.

2. Remoção de sedimentos de reservatórios

É fundamental uma ação de remoção periódica dos sedimentos do fundo dos reservatórios para garantir um maior armazenamento de água e, por conseguinte, manter uma maior capacidade de geração de energia e vida útil do empreendimento.

3. Transferências de energia e água entre bacias hidrográficas (integração regional e continental)

O estímulo a uma maior integração continental e regional entre bacias hidrográficas e sistemas elétricos é fundamental. Essa ação pode, sem dúvida alguma, reduzir consideravelmente a vulnerabilidade da oferta de energia e água entre países e mercados consumidores.

Hoje, a operação do Sistema Interligado Brasileiro garante a compensação dos desequilíbrios sazonais e decenais entre bacias e os mercados de energia elétrica. Uma seca na bacia do Rio São Francisco não provoca maiores risco ao consumo de energia elétrica da Região Nordeste.

Por outro lado, a integração continental ainda é bastante incipiente, com instabilidades políticas nacionais trazendo restrições a intensificação do intercâmbio de energia entre os países da América do Sul. Exemplos do Gasoduto Brasil-Bolívia e da Usina Hidrelétrica de Itaipu (Brasil e Paraguai) devem ser aperfeiçoados num modelo de integração sul-americana. Recentemente, em abril de 2008, um acordo firmado entre os governos brasileiro e argentino estipularam o fornecimento de energia elétrica do Brasil a Argentina no período de inverno, quando aumenta a demanda por energia para aquecimento, com o inverso no verão quando aumenta a demanda de eletricidade no Brasil para climatização de ambiente.

Ações não-estruturais

1. Gestão adaptável de sistemas de provisão de água existentes

Estruturar os sistemas de provisão de água para conviver com períodos de quotas mais baixas e com integração de sistemas alternativos de abastecimento.

2. Mudança regras operacionais

As regras operacionais das usinas hidrelétricas necessitam ser revistas em momentos de contingência, e se manterem bem informadas das restrições de diversos usos consuntivos e não consuntivos a estas regras.

3. Uso conjunto de águas atmosféricas, superficiais e subterrâneas

A gestão futura do uso da água caminha para uma tentativa de abordagem integrada do ciclo hidrológico. Ou seja, sistemas de bacias hidrográficas, aquíferos e massas de ar devem ser levados em consideração em escalas de tempo diferenciadas, porém, integradas com destaque para os potenciais e restrições de cada um desses sistemas. Uma tentativa de integração das águas da Bacia do Prata pode ser realizada com a discussão do Aquífero Guarani e da Gestão das Massas de Ar e Vapor d'Água que afetam a região, envolvendo Argentina, Brasil, Bolívia, Paraguai e Uruguai.

4. Integrar sistemas de operação de reservatórios

Hoje existe uma integração entre a operação dos reservatórios de geração energia hidroelétrica, todavia, não existe interação entre estes e os demais para abastecimento urbano e rural. Além disto, a interação continental de reservatórios é bastante incipiente e não leva em consideração as limitações das bacias hidrográficas transfronteiriças como a Bacia do Prata e do Rio Amazonas.

5. Aumentar a coordenação espaço-temporal entre oferta e demanda de água e energia, ou seja, entre bacia hidrográficas, sistemas energéticos e a sazonalidade, variabilidade e vulnerabilidade climática. Com destaque para:

- Água

Usos consuntivos e não-consuntivos

- Energia

Recursos renováveis e não-renováveis

- Uso eficiente da energia.

REFERÊNCIAS

- ACEITUNO, P. On the functioning of the southern oscillation in the south american sector: surface climate. *Monthly Weather Review*, n. 116, p. 505-524, 1988.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *A evolução da gestão de recursos hídricos no Brasil*. Brasília, 2002a. 64 p.
- _____. *Avaliação expedita sócio-econômica e ambiental dos municípios Lindeiros ao reservatório de Furnas*. Brasília, 2001. Mimeografado.
- _____. *Overview of hydrographic regions in Brazil*. Brasília, 2002b. 85 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *BIG - Banco de Informações de Geração*. Brasília, 2007.
- _____. *Projeto BRA/00/29: capacitação do setor elétrico brasileiro em relação à mudança global do clima*. Brasília, 2003. Cd-Rom.
- ALCAMO, J.; HENRICHIS, T.; ROSCH, T. *World water in 2025: global modelling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st century*. [S.l.]: University of Kassel, 2000. (Kassel World Water Series, n. 2).
- BERGKAMP, M. et al. *Change: adaptation of water resources management to climate change*. Washington: [s.n.], 2003.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de pesquisa energética. *Balanco energético nacional, 2007: ano base 2006: relatório final*. Rio de Janeiro: EPE, 2007.
- CALLEDE, J. Evolution du débit de l'Amazone à óbidos de 1903 à 1999. *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques*, v. 47, n. 2, p. 321-334, Avr. 2003.
- CAPOBIANCO, J. P. R. et al. *Billings 2000: ameaças e perspectivas para o maior reservatório de água da região metropolitana de São Paulo: relatório do diagnóstico socioambiental participativo da bacia hidrográfica da Billings no período 1989-99*. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2002.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS; ELETROBRAS. *Sistema de informação do potencial hidrelétrico brasileiro - SIPOT*. Rio de Janeiro, 2007.
- COMISSÃO DE ANÁLISE DO SISTEMA HIDROTÉRMICO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório final*. Brasília, 2001. Mimeografado.
- FILIZOLA, N. Caracterização hidrológica da Bacia Amazônica. In: RIVAS, A.; FREITAS, C. E. (Org.). *Amazônia: uma perspectiva interdisciplinar*. Manaus: Editora Universidade do Amazonas, 2002. p. 33-54.

FREITAS, M. A. V. Vulnerabilidade e impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos. In: POPPE, Marcelo Khaled; LA ROVERE, Emilio Lebre (Org.). *Mudanças climáticas*. Brasília: Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, Presidência da República, 2005. p.198-206. (Cadernos do Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República-NAE, v. 1).

_____. *Vulnerabilidade climática e antrópica dos recursos hídricos da Bacia Amazônica*. [S.l.: s.n.], 2006. 43 p. Nota técnica do Projeto Gerenciamento Integrado e Sustentável dos Recursos Hídricos Transfronteiriços na Bacia do Rio Amazonas considerando a variabilidade e as mudanças climáticas - Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guiana, Peru, Suriname, Venezuela. Brasília, PROJETO GEF AMAZONA

_____ et al. Hidreletricidade no Brasil: perspectivas de desenvolvimento e sustentabilidade. In: FREITAS, M. A. V. (Org.). *O estado das águas no Brasil: 2001–2002*. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2003. p. 49-63.

_____. Hydroelectricity in Brazil: developing and sustainable. In: ROSA, L. P.; SANTOS, M. A.; TUNDISI, J. G. *Greenhouse gas emissions from hydropower reservoirs and water quality*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004. p. 7-26.

FURNAS. *RIMA das usinas hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau*. Rio de Janeiro, 2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Bilan 2001 des changements climatiques : rapport de synthèse*. Genebra: OMM: PNUMA, 2003.

_____. *Freshwater resources and their management*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007b. 155 p.

_____. *Climate change, 2001: Working Group II: impacts, adaptation and vulnerability*. [S.l.]: Oxford Press, 2001.

KOSUTH, P. et al. Altimetric reference for Amazon area: first experiments. In: HYDROLOGICAL AND GEOCHEMICAL PROCESSES IN LARGE SCALE RIVER BASINS, 1999, Manaus. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1999.

_____. Influence de la marée océanique sur le cours aval de l'Amazone. In: HYDROLOGICAL AND GEOCHEMICAL PROCESSES IN LARGE SCALE RIVER BASINS, 1999, Manaus. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1999.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. Freshwater resources and their management. In: PARRY, M. L. et al (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. p. 173-210. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

LIEBMANN B.; MARENGO, J. A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon basin. *Journal of Climate*, n. 14, p. 4308-4317, 2001.

MAGRIN, G., C. et al. Latin America. In: PARRY, M. L. et al (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. p. 581-615. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

MARENGO, J. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, n. 12, p. 853-863, 1992.

_____. Variations and change in South American streamflow. *Climate Change*, n. 31, p. 99-117, 1995.

_____. *Hidrologia y regimen hidrico en la Cuenca Amazonica*. [S.l.]: INPE, 2004.

_____; HASTENRATH, S. Case studies of the extreme climatic events in the Amazon basin. *Journal of Climate*, n. 6, p. 617-627, 1993.

_____; NOBRE, C. A. The hydroclimatological framework in Amazonia. In: RICHEY, J.; MCCLAIN, M.; VICTORIA, R. (Ed.). *Biogeochemistry of Amazonia*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 17-42.

_____; SAMPAIO, G. On the associations between hydrometeorological conditions in Amazonia and the extremes of the southern oscillation. *Bulletin de l'Institut Français d' Études andines*, n. 27, p. 789-802, 1998.

MECHOSO, C. R., IRIBARREN, G. P. Streamflow in south eastern South America and the southern oscillation. *Journal of Climate*, n. 5, p. 1535-1539, 1992.

MOLINIER M. *Hydrological variability in the Amazon drainage basin and African tropical basins: hydrological processes*. [S.l.: s.n.], 2002.

_____ et al. Les regimes hydrologiques de l'amazone et de ses affluents hydrologie tropicale: geoscience et outil pour le developpement. *LAHS*, n. 238, p. 209-222, 1996.

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, n. 2, p. 107-117, 1987.

_____. Amazonian rainfall and its variability. In: *HYDROLOGY and water management in the humid tropics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. p. 99-111.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL - OMM. *Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2003*. Ginebra, 2004. 12 p. (OMM, n. 966).

PARRY, M. L. et al (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007a. 976 p. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

POPPE, M. K.; LA ROVERE, E. (Org.). *Mudanças climáticas*. Brasília: Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, Presidência da República, 2005. (Cadernos do Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República-NAE, v. 1).

ROCHE, M. A. et al. *Balance hídrico de Bolivia*. La Paz: UNESCO, 1992. 16 p.

RONCHAIL, J. Variabilité pluviométrique en Bolivie lors des phases extrêmes de l'oscillation Australe du Pacifique (1950-1993). *Bulletin de l'Institut Français d' Etudes Andines*, n. 27, p. 687-698, 1988.

_____; COCHONNEAU, G. Main patterns of summer rainfall variability and associated circulation in western and southern Amazon. In: VAMOS/CLIVAR CONFERENCE ON SOUTH AMERICAN LOW-LEVEL JET, 2002, Santa Cruz de la Sierra. *Communications...* [S.l.: s.n.], 2002.

_____. *Variabilité pluviométrique en bolivie lors des phases extremes de l'oscillation Australe du Pacifique (1950-1993)*. Paris: Université de Paris 7, 2003. 12 p.

_____; BOURREL, L. Enchentes, chuvas e circulação atmosférica na Bacia Amazônica Boliviana. In: CONGRESO LATINOAMERICANO E IBÉRICO Y BUENOS AIRES, 9., 2001, Buenos Aires. *Anales...* [S.l.: s.n.], 2001. Evento simultâneo VIII Congreso Argentino de Meteorología.

_____ et al. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and SSTs in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic Oceans. *International Journal of Climatology*, n. 22, p. 1663-1686, 2002.

ROUCOU, P. *Impact des températures de surface océanique d'échelle globale sur la dynamique de l'atmosphère et les précipitations tropicales en Amérique du Sud à l'est des Andes: diagnostic et simulation numérique*. 1997. Tese (Doutorado)- Centre de Recherche de Climatologie, Université de Bourgogne, France, 1997.

SILVA, M. E. S. ; GUETTER, A. K. Mudanças climáticas regionais observadas no estado do Paraná. *Terra Livre*, São Paulo, ano 19, v. 1, n. 20, p. 111-126, jan./jul. 2003.

TAYLOR, R. The possible role and contribution of hydropower to the mitigation of climate change. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE SCOPING MEETING ON RENEWABLE ENERGY, 2008, Luebeck, Germany. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2008.

TUCCI, C. E. M. et al. *Previsão de médio prazo da afluência de reservatórios com base na previsão climática*. Brasília: MCT, 2002. Mimeografado. Relatório de pesquisa ANEEL, PNUD, MCT.

WORLD COMMISSION ON DAMS. *The report of the World Commission on Dams: dams and development a new framework for decision-making*. London: Earthscan Publications Ltda, 2000. 365 p.

Resumo

Em 2005, a energia hidráulica contribuiu com 25,8 EJ (Exajoules) do total de 490 EJ de energia consumidos no planeta (5,3%) (IPCC, 2007a). Em relação à produção de eletricidade, a fonte hidráulica teve maior participação, 16,48% dos 17.430 GWh consumidos mundialmente em 2005 (Taylor, 2008). O Brasil possui cerca de 19,4% da disponibilidade hídrica superficial do planeta, sendo o terceiro país do mundo em capacidade instalada de geração hidrelétrica, atrás da China e do Canadá. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2007 (Brasil – MME/EPE, 2007) cerca de 84% do total da energia elétrica gerada foi obtida de forma renovável por meio de usinas hidrelétricas no Brasil. Em dezembro de 2006, dos 104.822 MW de capacidade instalada de geração elétrica (sistemas interligado e interligações internacionais⁷), aproximadamente 76% eram devidos à fonte hidráulica – 74.000 MW divididos em 638 usinas nacionais e 5.650 MW da parcela paraguaia da Usina Hidrelétrica de Itaipu (Aneel, 2007). Uma possível alteração no regime de chuvas e, portanto, no regime hidrológico futuro, fruto do aquecimento climático global, pode afetar consideravelmente o sistema elétrico brasileiro, que apresenta forte dependência dos recursos hídricos. Entre os principais impactos projetados, pode-se destacar um provável aumento da frequência de eventos de precipitação extrema, elevando o risco de inundações e de efeitos adversos na qualidade da água superficial e subterrânea; assim como, um provável aumento da extensão de áreas afetadas por secas gerando escassez generalizada de água. Procedimentos de adaptação e práticas de gerenciamento de risco para o setor hídrico estão sendo desenvolvidos em alguns países e regiões que reconheceram as mudanças hidrológicas projetadas. O presente trabalho visa discutir as possíveis consequências da vulnerabilidade climática do sistema elétrico brasileiro, com destaque para os efeitos no Sistema Interligado e nos Sistemas Isolados e as possíveis medidas de adaptação de curto, médio e longo prazos. Neste trabalho discutimos também as incertezas futuras da interação clima e água, a vulnerabilidade dos recursos hídricos e do potencial

⁷ Inclusive os aproveitamentos existentes que compõem os Sistemas Isolados, às interligações internacionais já em operação e também a parcela de Itaipu importada do Paraguai.

hidráulico brasileiro aos eventos climatológicos extremos e sugerimos medidas estruturais e não estruturais de adaptação do setor hidrelétrico às mudanças climáticas globais.

Palavras-chave

Energia hidráulica. Energia elétrica. Mudanças climáticas globais. Vulnerabilidade. Aquecimento climático global.

Abstract

In the year of 2005, the hydraulic energy contributed with 25,8 EJ (ExaJoules) of the total of 490 EJ of energy consumed in the planet (5,3%) (IPCC, 2007). in relation to the production of electricity, the hydro power had larger participation, 16,48% of 17.430 GWh globally consumed in 2005 (Taylor, 2008). Brazil possesses about 19,4% of the readiness superficial hídrica of the planet, being the third country of the world in installed capacity of hydroelectric generation, behind China and of Canada. According to the National Energy Swinging of 2007 (Brasil – MME/ EPE, 2007) about 84% of the total of the electric power produced it was obtained in a renewable way through hydroelectric power in Brazil. In December of 2006, of 104.822 MW of installed capacity of electric generation (national systems interconnected and international connections), approximately 76% were due to the hydraulic source - 74.000 MW shared in 638 national plants and 5.650 MW of the Paraguayan portion of the Hydroelectric power station of Itaipu (ANEEL, 2007). A possible alteration in the rainfall and, therefore, in the hydrological cycle, fruit of the global climatic change, it can affect the Brazilian electric system. Among the main projected impacts it can stand out a probable increase of the trend of precipitation events, elevating the risk of floods and of adverse effects in the quality of the superficial and underground water; as well as, a probable increase of the extension of affected areas for droughts generating widespread shortage of water. Adaptation procedures and practices of risk administration for the water resources are being developed in some countries and areas that recognized the projected hydrologic changes. The present work seeks to discuss the possible consequences of the climatic vulnerability of the Brazilian electric system, with prominence for the effects in the Interlinked Grid System and in the Isolated Systems and the possible measures of adaptation of short, medium and long period. In this work we also discussed the future uncertainties of the interaction climate and water, the vulnerability of the water resources and of the Brazilian hydraulic potential to the extreme climatological events and we suggested structural and non structural measures of adaptation of the hydroelectric generation to the global climatic changes.

Keywords

Hydraulic energy. Electric power. Global climate changes. Vulnerability. Electric.

Os autores

MARCOS AURÉLIO VASCONCELOS DE FREITAS é mestre em Engenharia Nuclear e Planificação Energética (Universidade Federal do Rio de Janeiro) e doutor em Ciências e Economia do Meio Ambiente e de Energia. É professor do Programa de Planejamento Energético (Coppe/UFRJ).

JOÃO LEONARDO DA SILVA SOITO é engenheiro de Furnas Centrais Elétricas e doutorando em Planejamento Energético (PPE/Coppe/UFRJ).

Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira

Claudio Freitas Neves

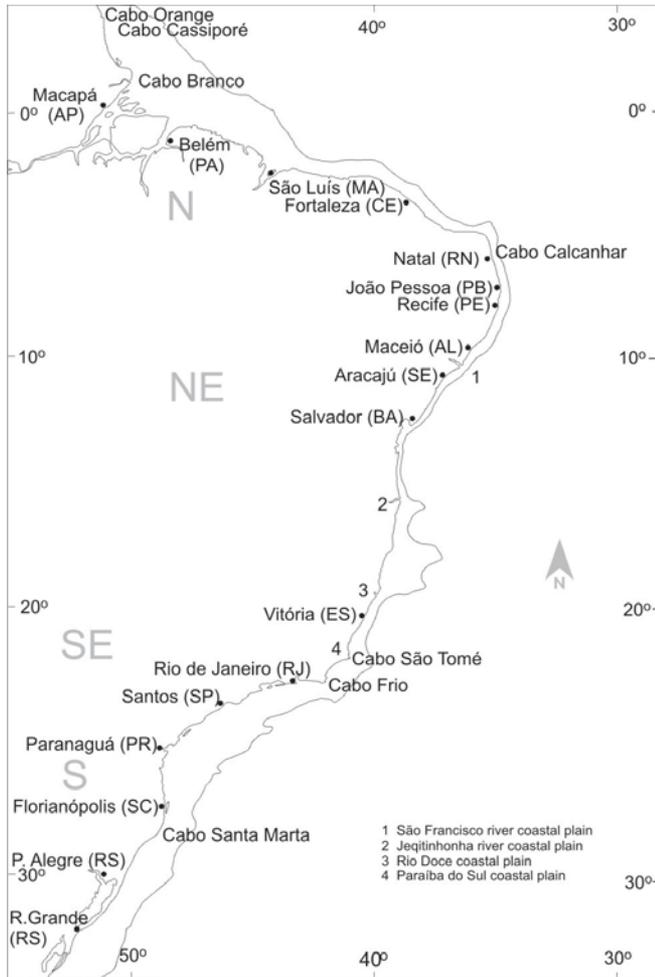
Dieter Muebe

1. APRESENTAÇÃO

O litoral do Brasil se estende da região equatorial do Hemisfério Norte às latitudes subtropicais do Hemisfério Sul, ao longo de mais ou menos 8.000 km banhados pelo Oceano Atlântico ocidental (Figura 1). Como consequência a Zona Costeira atravessa, ao longo de toda essa extensão, diferentes ambientes climáticos, que variam do úmido equatorial e tropical ao semi-árido no Nordeste e ao clima subtropical do Sul, e diferentes ambientes geológicos e geomorfológicos. Para efeitos legais, a Zona Costeira é constituída por uma faixa marítima, com 12 milhas náuticas de largura, e por uma faixa terrestre, com 50 km de largura a partir da linha de costa, correspondendo a uma superfície territorial total de 535.000 km² (VIDIGAL, 2006).

A ocupação do litoral, vista de maneira geral, é relativamente baixa. Os Censos de 1980 e 1991 mostraram que a população residente nos municípios costeiros, banhados diretamente pelo mar ou em regiões estuarinas, permaneceu em torno de 20% da população total do país (MUEHE e NEVES, 1990, 1995). Esse valor era equivalente à população residente nos Estados interiores, o que leva a uma reflexão mais cuidadosa sobre a visão de um país eminentemente costeiro e desabitado no interior. De fato, os Estados da Região Nordeste, o Rio de Janeiro e o Amapá, por diferentes motivos, têm concentrada sua população na zona costeira, enquanto que dois Estados populosos – São Paulo e Paraná –, possuem baixa densidade populacional nos municípios costeiros. A distribuição geográfica da população na zona costeira era (e ainda é) bastante irregular: fortes concentrações ocorrem nas proximidades das capitais, principalmente

Fig.ura 1. O litoral do Brasil: localização de capitais, acidentes geográficos e plataforma continental



nas cidades do Rio de Janeiro, Salvador, Maceió, Recife e Fortaleza, seguido por Vitória e São Luís. Nessas áreas, os problemas da erosão costeira são mais notados e muitas vezes agravados por obras de engenharia diversas que desequilibram o balanço sedimentar, tais como: estabilização de canais de maré, canais de acesso e estruturas de abrigo a portos ou terminais marítimos, construção de espigões. Muitas vezes, no passado, a concepção das obras não considerava o equilíbrio morfológico da costa em sentido mais amplo e as soluções técnicas dos problemas, embora conhecidas, jamais foram implementadas.

As cidades de Belém e Porto Alegre são dois casos particulares de capitais situadas às margens de grandes sistemas estuarinos, onde processos tanto continentais quanto marinhos desempenham papéis às vezes conflitantes. Por esse motivo, são regiões que merecem tratamento diferenciado quando se discutem as mudanças climáticas globais e os efeitos das variações do nível médio do mar.

A fim de caracterizar o grau de ocupação da zona costeira, para cada microrregião do IBGE, contabilizou-se apenas a população residente naqueles municípios costeiros ou em margens de estuários, e definiu-se um parâmetro – população por quilômetro de linha de costa” (PLC) –, que é a razão entre a população e a extensão da linha de costa da microrregião. Obteve-se, assim, um critério objetivo para hierarquizar os trechos de costa onde os impactos de mudanças seriam potencialmente mais danosos, a partir do pressuposto que, quanto maior a concentração populacional, maior a diversidade de atividades econômicas. Identificaram-se quatro categorias de ocupação (Tabela 1).

Tabela 1. Distribuição populacional ao longo da costa brasileira

Densidade de ocupação PLC (população/km)						
Ano	Linha de costa	<1.000	1.000-5.000	5.000-10.000	>10.000	Total
1980	Extensão (km)	3.824	2.683	385	560	7.452
	Porcentagem	51,3%	36,0%	5,2%	7,5%	100%
1991	Extensão (km)	3.328	2.867	512	745	7.452
	Porcentagem	44,7%	38,5%	6,9%	10,0%	100%

Para os segmentos com densidade inferior a 1.000 habitantes por quilômetro de linha de costa, que corresponde a cerca de 40% do litoral, as principais ações direcionam-se a ordenar a ocupação futura, evitar urbanização de áreas naturalmente frágeis (como embocaduras fluviais) e criar zonas de proteção ambiental; o monitoramento dessas áreas deve ser conduzido de modo a servir como teste para comprovação com outras localidades. As áreas críticas são aquelas que apresentam taxas de ocupação entre 1.000 e 10.000 habitantes por quilômetro de linha de costa. Aí são

necessários planos de gerenciamento integrado de recursos costeiros e hídricos, reformulação dos planos de zoneamento (caso existam), ações de educação ambiental direcionadas a professores e alunos em todos os níveis de ensino, monitoramento da evolução costeira e socioeconômica. É necessário rigor no projeto e controle das obras de engenharia e condução de planejamento de longo prazo. Trechos com ocupação superior a dez mil habitantes por quilômetro de linha de costa são aqueles onde ocorre maior diversidade de atividades econômicas e, em conseqüência, os impactos das mudanças climáticas seriam potencialmente mais danosos; por outro lado, nesses locais haveria população em número suficiente para dividir os custos de proteção do estado atual de ocupação.

Nos últimos anos, esforços vêm sendo feitos para identificar as áreas mais vulneráveis para posterior monitoramento e detalhamento das razões dos desequilíbrios observados (MUEHE, 2006). O controle dos órgãos ambientais, a legislação que impõe responsabilidades de monitoramento às atividades econômicas e industriais situadas na costa (por exemplo, Lei 8.630/93), e as próprias ações de educação ambiental e divulgação científica, em conjunto farão com que se desenvolva gradualmente uma nova “mentalidade marítima”¹ e de gerenciamento integrado da zona costeira.

Atualmente, porém, a identificação das causas da erosão costeira tem sido freqüentemente um exercício mais especulativo do que propriamente científico devido à inexistência (ou, pelo menos, dificuldade de acesso) de dados de monitoramento ambiental de longo prazo, o que inclui: comportamento do nível (médio) do mar, dados meteorológicos sobre o oceano e zona costeira, informações diretas sobre ondas, evolução da morfologia da costa e plataforma continental interna (até 50 m). Ao mesmo tempo, fatores diversos, tais como a ocupação territorial desordenada, a exploração indiscriminada de jazidas de areia nos estuários e braços de mar, a construção de obras de proteção costeira sem critérios técnicos de engenharia, muitas vezes têm desencadeado processos erosivos rápidos (por exemplo, Fortaleza (CE), Olinda (PE), Conceição da Barra (ES), Matinhos (PR)). Por essa razão, e em especial pela falta de referências pretéritas, tem sido difícil, e muitas vezes impossível, distinguir se os episódios de erosão

¹ De acordo com Vidigal (2006), denomina-se “mentalidade marítima de um povo a compreensão da essencial dependência do mar para a sua sobrevivência histórica”.

ou progradação da linha de costa resultam das intervenções antrópicas ou indicam alguma tendência de longo prazo.

Este trabalho estrutura-se em três partes. Na primeira, são identificados os agentes físicos que atuam sobre a zona costeira, descrevendo-se os impactos decorrentes, suas escalas espaciais e temporais. Na segunda parte, é feita uma avaliação da vulnerabilidade da zona costeira, exemplificando-se com relatos de casos ao longo do litoral brasileiro. São considerados separadamente os ambientes naturais e as obras de engenharia. Finalmente, a terceira parte apresenta um elenco de ações de mitigação dentro do contexto de mudanças climáticas, que podem ser agrupadas em três categorias – recuo, acomodação ou proteção –, de acordo com a nomenclatura do IPCC (1994). No primeiro caso, os beneficiamentos da orla ou a forma de ocupação corrente são abandonados; no segundo caso, adaptam-se os usos da zona costeira a uma nova situação (i.e. de nível do mar, de salinidade etc.); no terceiro caso, projetam-se obras de engenharia de forma a manter a ocupação corrente.

2. AGENTES FÍSICOS

2.1 ASPECTOS GERAIS

A zona costeira é influenciada por agentes oceânicos, atmosféricos e continentais, motivo pelo qual ela é particularmente sensível a mudanças climáticas. Alterações na intensidade, na distribuição espacial ou na climatologia de ventos afetam os esforços sobre estruturas portuárias, trazem impactos sobre construções urbanas, mobilizam sedimentos de dunas, apenas para citar alguns poucos exemplos de situações críticas ocorridas nos últimos 40 anos no Brasil. Contudo, é sobre os oceanos e os corpos d'água costeiros que os ventos produzem efeitos mais significativos, gerando ondas e induzindo circulações de massas d'água em várias escalas temporais e espaciais. Existem, porém, outras formas de interação entre oceano e atmosfera que trazem conseqüências para o meio biótico e algumas atividades humanas, como por exemplo, vórtices da Corrente do Brasil influenciam localmente a geração e a propagação de ondas, bem como a qualidade das massas d'água na plataforma continental; diferença de temperatura ar-mar, formando névoa, com prejuízos para a operação de aeroportos e navegação costeira; penetração da brisa marinha (maresia), afetando materiais e estruturas na zona costeira.

Os ventos e as condições meteorológicas atuam também sobre o oceano provocando mudanças no nível médio do mar. Reduções de pressão atmosférica produzem elevação do nível do mar, por um efeito conhecido como barômetro invertido, de modo que uma redução de 1 hPa produz uma elevação do nível médio do mar da ordem de 1,0 cm. Além disso, as tensões tangenciais do vento sobre o mar provocam deslocamentos de massa d'água, conhecido como “transporte de Ekman”, responsável por fenômenos como a ressurgência em Cabo Frio (RJ), o empilhamento de água junto à costa bloqueando o escoamento de rios, a inundação de lagoas costeiras prejudicando a drenagem pluvial, entre outros efeitos. No caso de conjunção da elevação do nível do mar (maré meteorológica) e ocorrência de ondas mais altas, as ressacas, as praias ficam expostas a mudanças morfológicas que resultam no recuo da linha de costa.

A temperatura tem sido a grandeza ambiental mais facilmente associada às mudanças climáticas através dos meios de comunicação: o fenômeno El Niño, o efeito estufa, o aquecimento global ou uma “nova era glacial” são exemplos que mobilizam a opinião pública. As conseqüências de mudanças de temperatura da atmosfera e dos oceanos, e as respectivas interações, são bem mais complexas e certamente ainda não foram suficientemente estudadas em todas as suas dimensões. O problema não se resume ao simples aumento da massa d'água dos oceanos em decorrência do derretimento das geleiras continentais.

Em primeiro lugar, um aquecimento do oceano, induzido pelo aquecimento atmosférico, provoca a expansão térmica da água, aumentando assim o volume das águas marinhas e acarretando em um aumento do nível médio dos mares. Os oceanos, porém, longe de serem uma massa d'água uniforme, possuem várias massas d'água, cuja salinidade e densidade estão intrinsecamente relacionadas à temperatura (SOLOMON et al., 2007). O padrão termo-halino de circulação planetária, meridional e zonal (por exemplo, D. Evans <<http://www.csus.edu/indiv/e/evansd/geology8/>>), pode ser muito afetado pelo aquecimento ou pela redução da salinidade das águas na região ártica, com reflexos sobre o clima do planeta em todos os continentes, a vida marinha e a produção pesqueira (SOLOMON et al., 2007, p.397).

Mudanças nos padrões de temperatura da superfície do mar (TSM) influenciam o regime de ventos, não apenas as brisas como também a força

dos furacões. Por esse motivo, o sensoriamento remoto da TSM mostra-se uma grandeza de muito interesse para várias atividades humanas, desde a pesca até a defesa civil. Mais ainda, os processos termodinâmicos existentes na interface ar-mar influenciam também o padrão de formação das ondas – e não apenas a intensidade do vento e a extensão da pista de atuação, parâmetros usados para cálculo da previsão de ondas. No entanto, não se dispõe ainda de um monitoramento eficiente, com abrangência planetária, das temperaturas dos oceanos em profundidade, nem das propriedades físico-químicas das águas profundas. Os oceanos continuam sendo uma imensa fronteira desconhecida para o homem, cuja exploração requer tecnologia avançada e esforço cooperativo internacional.

Alterações no regime hidrológico raramente são levadas em consideração em estudos na zona costeira, assim como ações de gerenciamento de recursos hídricos raramente incluem os trechos estuarinos em seu escopo. Isso é um paradoxo. Sabe-se hoje que as águas do Rio da Prata deslocam-se para Norte junto à costa do Rio Grande do Sul, levando consigo minerais e organismos plantônicos, influenciando a qualidade da água costeira. O mesmo se pode dizer do Amazonas, cujo caudal influencia largas porções do mar adjacente, é regido pelas variações sazonais e transporta grandes quantidades de sedimentos. Em bacias hidrográficas com escalas geográficas menores, é possível quantificar e estabelecer relações de causa e efeito entre as intervenções continentais e as respostas da zona costeira. As análises de longo prazo (50 anos) de vazões fluviais diárias no Rio Paraíba do Sul permitiram estabelecer vínculos temporais entre as construções de obras hidráulicas, o aumento da utilização de recursos hídricos na bacia e o acúmulo de sedimentos no Pontal de Atafona (COSTA, 1995). Situação análoga citada na literatura foi a erosão do delta do Nilo após a construção da represa de Assuan e conseqüente regularização da vazão fluvial, que resultou na diminuição do aporte de sedimentos à embocadura do rio e em acelerado processo de erosão num segmento estável de linha de costa (FANOS et al., 1995). Problemas semelhantes são relatados em outras regiões deltaicas, como nos Rios Changjiang (Yangtse), Amarelo, Mekong e Mississipi, entre outros (KAY e MAGOON, 1993). Ou seja, qualquer ação antrópica ou fenômeno natural que venha a alterar a vazão fluvial e sedimentar que chega à embocadura traz conseqüências sobre a morfologia, sobre a qualidade da água e sobre os diversos ciclos de vida e biomas associados aos ambientes estuarinos. Redução de vazões fluviais – não

importando se devido à transposição de bacias ou construção de barragens ou mudança de regime de chuvas – facilita a penetração da água salgada do mar para o interior dos estuários, onde em geral é feita a captação de água doce para diversos fins (por exemplo, abastecimento humano, usos industriais de resfriamento, irrigação, aqüicultura). O balanço entre os volumes de água doce (vazão fluvial) e de água salgada (prisma de maré) pode ser facilmente perturbado em consequência de mudanças climáticas que afetem o nível do mar, os padrões de chuvas ou o consumo de água na bacia hidrográfica, confirmando a vulnerabilidade da população costeira (NICHOLLS et al., 2007, p.326-327).

As próximas seções procuram ajudar a construir uma visão sistêmica da interligação entre os diversos agentes naturais e processos físicos, de modo a identificar como eles atuam sobre a zona costeira.

2.2 REGIME DE VENTOS

As considerações sobre as mudanças de regime de ventos devem levar em conta a abrangência da circulação atmosférica em questão, a intensidade do vento, a distribuição espacial e as frequências temporais. Os ventos afetam a vida do homem localizado na zona costeira de várias maneiras, em diferentes escalas espaciais e temporais. A apresentação a seguir divide os fenômenos em larga escala, mesoescala e escala local; destas, apenas os de larga escala são objeto dos cenários estudados pelo IPCC, o que transmite ao leitor a magnitude das incertezas sobre os impactos na zona costeira.

Larga escala

- *Regime de chuvas*

Ao contrário dos padrões de precipitação continental, a precipitação sobre os oceanos tem sido pouco observada e ainda são largamente desconhecidos os efeitos do regime de chuvas sobre a produção de massas d'água, sobre a estrutura de camada limite ar-mar, sobre trocas térmicas e, em última instância, sobre os organismos vivos. Por exemplo, uma explicação para a fraca validação do modelo global do NCEP/NCAR² para os ventos sobre o Oceano Índico é exatamente a previsão insatisfatória do modelo para a precipitação (GOSWAMI e SNGUPTA, 2003).

²National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR).

- *Climatologia de ventos*

Em larga escala, sobre os oceanos, o clima de ventos é responsável pelos grandes padrões de circulação oceânica de massas d'água, que por sua vez também influenciam o clima continental. Exemplos característicos são os fenômenos oceânicos (por exemplo, El Niño / La Niña no Oceano Pacífico, a oscilação do Atlântico Norte (NAO) e no Oceano Índico) que influenciam outras regiões do planeta através de teleconexões atmosféricas.

- *Geração de ondas*

A altura e o período das ondas dependem, entre outros parâmetros, da intensidade do vento, da pista de atuação sobre o oceano e da duração ou permanência do vento. Mudanças na distribuição espacial dos grandes sistemas meteorológicos (por exemplo, ciclones extratropicais, tempestades tropicais) podem influir nas propriedades das ondas, especialmente a direção de propagação. Assim como se fala de uma climatologia de ventos, pode-se também falar de uma climatologia de ondas associada aos ventos. Atualmente busca-se aprimorar os modelos de previsão de ondas associando-os a modelos globais de circulação atmosférica, sensoriamento remoto e observações com bóias, de modo a reconstruir (*hindcast*) o clima de ondas.

Mesoescala

- *Geração de ondas*

Neste caso, trata-se da geração de ondas em águas restritas ou em condições de pista limitada pela presença de continente. Essa situação interessa à navegação costeira e possui particular relevância para a navegação de barcaças oceânicas como, por exemplo, vem sendo realizado entre o Sul da Bahia e o Norte do Espírito Santo. É de interesse também para a geração de ondas em corpos d'água mais extensos (por exemplo, Lagoa dos Patos e Mirim, baías de Paranaguá, Ilha Grande, Sepetiba, Guanabara, Todos os Santos e São Marcos)³; merece destaque a interação entre ondas e correntes e suas conseqüências sobre a morfologia de embocaduras fluviais, o transporte de sedimentos de fundo, a movimentação de manchas de óleo e a dispersão de poluentes.

³ O mesmo comentário aplica-se aos grandes reservatórios de usinas hidroelétricas e aos processos erosivos em suas margens.

- *Variações do nível médio do mar*

As tensões tangenciais do vento sobre o mar e sua distribuição espacial não uniforme, combinadas com o efeito de rotação da Terra, produzem o transporte de massas d'água, seja aproximando-as em direção à costa, seja afastando-as da costa. Como consequência, verificam-se na costa Sudeste do Brasil oscilações do nível médio do mar na escala de cinco a nove dias, com amplitudes da ordem de 1 m (por exemplo, CASTRO e LEE, 1995; SILVA, 1992; KALIL, 1997). Relatos em várias partes do mundo indicam que no caso de ciclones, tempestades mais intensas e furacões, tais variações podem chegar a 3 m de altura. A costa Sul e Sudeste brasileira está sujeita a ciclones extratropicais, que numa situação única atingiu força de furacão, o Catarina, que atingiu a costa catarinense em fevereiro de 2004⁴. Uaissone (2004) encontrou altas correlações entre as flutuações no nível médio do mar em Piraquara, baía de Ilha Grande (RJ), e as variações meteorológicas de vento e pressão (ciclones extratropicais) em pontos localizados a 200 km de distância, sobre a plataforma continental, em escalas de tempo que variavam de 5 a 21 dias.

- *Usos de recursos hídricos na zona costeira da bacia hidrográfica*

Na medida em que a circulação atmosférica afeta a precipitação, o balanço hídrico das regiões costeiras é muito sensível a variações climáticas (incluindo os rios e as lagunas bem como as restingas, as dunas, onde fica armazenada água da chuva, e os manguezais). Por ser área de grande valor econômico e de atração populacional, aparece uma pressão maior sobre o uso de recursos hídricos, seja como fontes de água doce, seja como áreas de despejo de resíduos.

Escala local

- *Hidrodinâmica de corpos d'água*

A ocorrência de seiches em recintos costeiros tem sido associada à ação de grupos de ondas, porém estudos efetuados no porto de Rotterdam evidenciaram a relação direta com eventos meteorológicos (JONG, 2004; JONG et al., 2003). Oliveira e Paiva Jr. (1993) relatam a ocorrência de um

⁴ Infelizmente não havia marégrafos em operação na região, o que teria permitido quantificar a elevação do nível do mar. A previsão de 12cm fornecida por alguns modelos numéricos é enormemente subestimada.

acidente devido a ressonância portuária na Marina da Glória (RJ), durante uma ressaca em agosto de 1992. A circulação hidrodinâmica de baías é bastante influenciada pela ação de ventos, podendo alterar o transporte de substâncias passivas que fiquem próximo à superfície (influenciadas pelo arraste de vento) ou no meio da coluna d'água (influenciada pelas correntes induzidas pela maré) (por exemplo, XAVIER, 1996; MIRANDA, 2000; XAVIER, 2002).

- *Transporte de sedimentos*

O regime de ventos associado ao desmatamento de dunas tem sido fator limitante da ocupação urbana em vários pontos do litoral brasileiro (por exemplo, Itaúna (BA), Grussaí, Cabo Frio e Arraial do Cabo (RJ) e vários locais no Nordeste) devido ao transporte eólico de sedimentos. Ao longo da costa do Ceará, essa forma de transporte desempenha um importante papel no equilíbrio morfodinâmico das praias; em alguns locais, o volume de areia transportada pode alcançar até 30% do volume mobilizado pelas ondas na zona de arrebentação segundo Valentini (1994), que também apresenta revisão bibliográfica sobre metodologias para quantificação do transporte eólico. Durante a maré baixa, a areia é retirada pelo vento do estirâncio na face da praia, alimenta as dunas e depois é soprado de volta para a praia, de onde é mobilizado pelas ondas e correntes litorâneas. Mudanças climáticas que afetem o regime local de ventos ou a vegetação fixadora de dunas, na presença de disponibilidade sedimentar na faixa costeira, podem trazer impactos adversos.

- *Ação de ventos sobre estruturas e embarcações*

Normas para dimensionamento de estruturas à ação de ventos na zona costeira ou estão desatualizadas, ou não foram adaptadas a mudanças climáticas. Muitas vezes, a própria metodologia de observação e de classificação dos dados é inadequada. Alguns episódios merecem ser citados como alerta: a passagem do ciclone Catarina em 2004, que apresentou ventos com força de furacão tipo I; a ocorrência, em graus crescentes, de destruições por efeitos de tornados no Sul do Brasil; o abaloamento de um pilar da ponte Rio-Niterói por um navio em janeiro de 1987 (ALCÂNTARA e WASHINGTON, 1989), com ventos persistentes de 70 a 90 km/h; os acidentes com tombamentos de guindastes em vários portos. Esses exemplos alertam para maior vigilância e necessidade de se atualizar os critérios de

projeto de obras ou de aproveitamentos costeiros. Para finalizar, deve-se estar atento a variações do alcance da brisa marinha quanto à ação da maresia sobre materiais e estruturas.

2.3 REGIME DE ONDAS

As ondas que chegam às praias são formadas no meio dos oceanos por ação de ventos, que sopram durante um determinado intervalo de duração e ao longo de uma determinada extensão (denominada “pista do vento”); as diferenças de temperatura e a estrutura de turbulência na camada limite ar-mar também influenciam a altura da onda gerada. Mudanças na climatologia de ventos certamente afetarão a climatologia das ondas. No caso da costa brasileira, distinguem-se três regiões oceânicas distintas: a costa Sul-Sudeste, que sofre ações de ondas geradas em latitudes mais altas por ciclones extratropicais; a costa Leste, que sofre ação das vagas⁵ geradas por ventos do Anticiclone semi-estacionário do Atlântico Sul e dos marulhos de quadrante SO-SE; e a costa Nordeste Setentrional, que está sujeita aos ventos alísios e a eventos de tempestades mais distantes no Atlântico Norte (MELO e ALVES, 1993; MELO *et al.*, 1995).

Ciclones extratropicais vindos de Sul produzem eventos extremos com a geração de ondas e marulhos com alturas significativas da ordem de 15 m e períodos de 17 segundos em mar aberto. Até atingir a costa, essas ondas mais altas sofrem alterações – dissipam energia e são refratadas pela batimetria – podendo a altura chegar a 4 m em alguns locais (REGO, 1992). A caracterização do regime de ondas nesse segmento da costa e em especial na Baía de Campos foi feita por Violante-Carvalho (1998), Pinho (2003), entre outros, seguindo a metodologia proposta por Parente (1999) que permitia caracterizar a evolução temporal conjunta dos espectros de ondas e do regime de ventos. Na zona costeira essa alternância entre tempo bom e tempestade define o clima de ondas e o transporte de sedimentos, mais intensamente do extremo Sul ao Cabo Frio (RJ), diminuindo aos poucos a influência das ondas de Sul em direção a Salvador e Recife. Na costa Leste, por influência dos ventos alísios gerados pelo Anticiclone do Atlântico Sul, as ondas se deslocam de Leste e Sudeste nas áreas próximas ao Equador e giram gradualmente para a direção Nordeste com o aumento da latitude.

⁵ A distinção entre vagas e marulhos (ou ondulações) diz respeito ao estado menos ou mais organizado do mar, correspondendo as vagas ao termo em inglês *sea* e os marulhos ao termo *swell*.

Alturas significativas em mar aberto variam entre 1 m e 2 m com incremento para 1,5 m a 2,5 m no extremo Sul. O período das ondas varia entre 4 e 6 segundos. Ondas geradas por tempestades tropicais no Hemisfério Norte atingem a Região Nordeste (Ceará) na forma de marulho, com períodos de até 18 segundos e importantes efeitos erosivos (MAIA, 2002).

As ondas provocam o transporte de sedimentos e a mudança da morfologia das praias, produzem esforços sobre estruturas e afetam a navegação. As medições no passado se restringiam às especificações de projetos de obras marítimas e portuárias, sem se atentarem para a questão mais ampla do gerenciamento ambiental (HOMSI, 1993). Assim, o Brasil não dispõe de um sistema de monitoramento permanente que seja acessível a toda a sociedade. Os dados atualmente coletados pela Petrobras são de uso exclusivo dessa empresa, não sendo divulgados por motivo de sigilo industrial; os dados pretéritos obtidos pelo Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH/Portobras, hoje vinculado à Cia. Docas do Rio de Janeiro) podem ser acessados, mas não foram digitalizados, não integram o Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, nem possuem extensão temporal suficiente para caracterizar um clima de ondas. Isso dificulta a elaboração de projetos de engenharia e introduz um grau de incerteza ainda maior em cenários de mudanças climáticas. Em geral, utilizam-se cartas de ondas compiladas (por exemplo, Global Wave Statistics) que não refletem o clima de ondas local e que são baseadas em observações *ship*, ou seja, observações meteorológicas ou oceanográficas feitas por navios em rotas comerciais (por conseguinte, informações nem sempre muito confiáveis); alternativamente, utilizam-se dados pretéritos de algum outro local próximo.

É importante mencionar que observações efetuadas no Mar do Norte na época dos primeiros projetos das plataformas de exploração de petróleo já mostram diferenças em relação às medições atuais da ordem de 25%. Já existe vasto conhecimento acumulado internacionalmente nos últimos 60 anos sobre a evolução do clima de ondas – embora o conhecimento brasileiro sobre o regime de ondas que afeta a nossa costa seja insuficiente, inadequado e limitado a pontos isolados do litoral. Na maioria das vezes, as campanhas de medição são de prazo relativamente curto (inferior a 10 anos) e são motivadas pelo interesse de alguma atividade econômica ou de alguma empresa. A necessidade de um programa abrangente de monitoramento permanente de ondas já era alertada por Homsí (1978) e, desde então, nada

foi implementado. É imperativo que o governo brasileiro, por meio de suas esferas federal, estadual e municipal, assumam a coordenação de um programa amplo e permanente de monitoramento de ondas, com recursos financeiros, materiais e humanos para estabelecer um serviço operacional, a exemplo de outros países.

As evidências de erosão em vários pontos da costa brasileira carecem, em grande parte das vezes, de diagnóstico preciso das causas e de quantificação cientificamente bem fundamentada, na medida em que o principal agente transformador da costa, a onda, não é monitorado. Além disso, se os levantamentos topo-batimétricos não forem efetuados ao largo daqueles locais, os estudos para solução do problema ficam comprometidos. Considerando, por um lado, a cadeia de eventos: mudança climática → aumento de tempestades (*storminess*) → aumento da altura das ondas → mudanças morfológicas costeiras, e considerando, por outro lado, a vulnerabilidade de diversas cidades litorâneas aos efeitos de ressacas, questiona-se por que mais recursos não são diretamente alocados ao monitoramento permanente de ondas e de outros parâmetros meteorológico-oceanográficos de uso em projetos de engenharia.

2.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A incidência oblíqua das ondas sobre a praia produz uma corrente longitudinal limitada pela largura da zona de arrebentação das ondas, que é um dos mecanismos responsáveis pelo transporte de sedimentos na zona costeira. O padrão geral da direção do transporte litorâneo ao longo da costa brasileira é variável e depende do alinhamento da praia e do clima de ondas. Por exemplo, nos trechos que vão do Amapá ao Cabo Calcanhar (RN), ao longo da costa de Pernambuco, e ao sul do Cabo Santa Marta ao Rio Grande do Sul, o transporte residual anual é direcionado para a esquerda de um observador olhando de frente para o mar, enquanto que do sul do Espírito Santo até o cabo de São Tomé, o transporte direciona-se para a direita de um observador de frente para o mar. Do Cabo Calcanhar em direção ao sul até a Paraíba e ao longo do litoral do Rio de Janeiro entre Arraial do Cabo e a Ilha da Marambaia, o transporte residual se aproxima de zero.

A relação entre os amplos depósitos de areias costeiras e a plataforma continental como principal fonte dos sedimentos foi reconhecido por Tricart (1959, 1960). A origem desses sedimentos se encontra na erosão dos

depósitos sedimentares da formação geológica denominada Grupos Barreiras e outros que, ao longo da costa das Regiões Norte, Nordeste e parte do Sudeste, formam depósitos de algumas dezenas de metros acima do nível do mar e emolduram a orla na forma de falésias. Concreções lateríticas formadas na faixa de oscilação do lençol freático no interior dos depósitos sedimentares se encontram dispersos na plataforma continental atestando a amplitude de erosão dos mesmos pelos agentes marinhos. Além da incorporação na plataforma continental dos sedimentos oriundos da erosão dos depósitos do Barreiras, ocorreram fases de intenso entalhamento e alargamento erosivo dos baixos cursos dos vales fluviais que atravessam os citados depósitos, cuja largura não apresenta nenhuma relação com o volume dos atuais cursos fluviais. Também os maciços de rochas cristalinas do embasamento aflorante das regiões Sudeste e Sul mostram, pela amplitude dos vales entalhados, a remoção de importantes volumes de sedimentos cujo depósito final foi a plataforma continental.

O principal sumidouro de sedimentos na costa brasileira é representado pelos campos de dunas resultantes da imensa transferência de sedimentos da praia para o interior, retirando definitivamente sedimentos que fazem parte do equilíbrio no balanço sedimentar do sistema praia-antepraia, implicando, ao longo do tempo, na ruptura desse equilíbrio e resultando em erosão costeira. O campo de dunas de maior expressão é representado pelos Lençóis Maranhenses que se estendem por cerca de 20 km para o interior da planície costeira, ao longo de 50 km de linha de costa. Outros campos de dunas se estendem de forma descontínua até a Bahia, com importantes expressões espaciais nos Estados do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, onde o clima é seco. A tendência erosiva do litoral do Nordeste entre os Lençóis Maranhenses e o Estado de Alagoas (a Norte do Rio São Francisco), identificada por Dominguez e Bittencourt (1996), é caracterizada pela ocorrência de falésias ativas, ausência de depósitos pleistocênicos e afloramentos de arenitos de praia defronte à linha de costa; ela é certamente decorrência da transferência de areias para os campos de dunas. Nas Regiões Sul e Sudeste os principais sumidouros de sedimentos são representados pelas planícies de cristas de praia e terraços arenosos, cordões litorâneos e campos de dunas, estes com importante expressão no litoral do Rio Grande do Sul. Outro exemplo de sumidouro são os bancos de areia ao largo do cabo de São Tomé, uma importante formação subaquática de acumulação de sedimentos, oriundos das praias a sul e a norte do cabo, e que são transportados para lá por ação das ondas.

2.5 VARIAÇÕES DO NÍVEL DO MAR

Comparativamente a outros países com a mesma extensão de linha de costa ou com a mesma exposição marinha, pouca importância se tem dado às observações do nível do mar no Brasil. Medições sistemáticas têm sido feitas pela Marinha do Brasil, por meio de sua Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e, mais recentemente, pelo Centro Hidrográfico da Marinha (CHM), pelo Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH), órgão vinculado à extinta Portobras e atualmente vinculado à Cia. Docas do Rio de Janeiro, pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Além dessas entidades, existem esforços, isolados de universidades e empresas ou em rede (como é o caso da Rede do Milênio, coordenada pela Universidade Federal do Paraná; da Rede Maregráfica para Fins Geodésicos (RMPG), coordenada pelo IBGE; e da Rede Maregráfica Fluminense que envolve a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), o CHM, o IBGE, a Eletronuclear, o Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e a Petrobras). Consulta feita ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos da DHN revelou que apenas 20% das informações disponíveis haviam sido coletadas há menos de 15 anos e cerca de 75% dos registros possuíam duração inferior a 40 dias. Não se obteve informações, porém, sobre o controle geodésico das estações cadastradas, o que é indispensável para se determinar tendências confiáveis de longa duração.

Desde 2000 instalou-se o programa Gloss-Brasil (Global Sea Level Observing System-Gloss), por sua vez vinculado a um programa mais amplo da Comissão Oceanográfica Intergovernamental da Unesco denominado Global Ocean Observing System (Goos), e que propõe instalar até 10 estações maregráficas permanentes ao longo da costa brasileira e ilhas oceânicas. Atualmente fazem parte desta rede as estações de Imituba (PR), Cananéia (SP), Ilha Fiscal (RJ), Macaé (RJ), Salvador (RJ), Fortaleza (CE), Santana (AP), Fernando de Noronha (PE) e Trindade (ES).

A falta de informações históricas sobre o nível do mar constitui, no momento, a grande vulnerabilidade do Brasil a mudanças do nível relativo do mar, posto que sequer se pode garantir se a variabilidade observada é um fenômeno local, regional ou global. A medição maregráfica, por sua simplicidade, é comparativamente a mais barata dos monitoramentos oceanográficos e pode fornecer informações úteis para o navegante, para o

administrador portuário, para o planejador urbano, para a comunidade costeira ligada a esportes náuticos etc. A partir desta medição, filtram-se as oscilações de período inferior a 12 horas e a maré astronômica, a qual pode ser prevista de modo extremamente preciso (por exemplo, Franco, 1992). O resíduo após a filtragem é denominado Nível Médio do Mar (NMM), o qual, ao contrário do que se pensava no passado, não é uma referência estática dentro da escala de tempo das sociedades humanas.

As oscilações mais curtas, da ordem de 10^1 a 10^2 minutos, estão associadas a fenômenos meteorológicos ou ação de ondas em eventos de ressaca. Jong (2004) relata a ocorrência de seiches no porto de Rotterdam, causados pela passagem de frentes frias cujo perfil vertical de temperatura favorecia a formação de circulações atmosféricas secundárias. Esse fenômeno é de importância para o projeto de portos, especialmente aqueles destinados a pequenas embarcações, pois induzem a ressonância da água no recinto portuário, produzem fortes correntes e trazem conseqüências desastrosas para as embarcações (por exemplo, rompimento de amarras, colisões).

Em escalas de 10^2 a 10^3 minutos, estão as oscilações de nível do mar associadas à maré astronômica que, no Brasil, possui características semi-diurnas (dois ciclos por dia e seus harmônicos). Acredita-se que este fenômeno não seja influenciado por variações climáticas, a menos que ocorresse uma elevação ou rebaixamento do nível médio do mar de tamanha magnitude que viesse a afetar a propagação da onda de maré nas bacias oceânicas e plataforma continental. A maior parte do litoral, do extremo sul ao Estado de Alagoas é submetido ao regime de micro-maré (amplitude menor que 2m). No Rio Grande do Sul a amplitude da maré de sizígia se reduz a apenas 0,6 m. Amplitudes com mais de 4 m (macro-maré) ocorrem nos Estados do Maranhão, parte do Pará (Salinópolis) e no Sul do Amapá. O restante da costa, incluindo pequenos segmentos como o interior da Baía de Todos os Santos (Bahia) e o terminal portuário em Sergipe, são submetidos a regime de meso-maré (amplitudes entre 2 e 4 m).

Em escalas de 10^4 minutos, porém, começam a ocorrer fenômenos que são diretamente vinculados a efeitos meteorológicos, a chamada “maré meteorológica”. A propagação de ciclones extratropicais de Sul para Norte, ao longo da plataforma continental brasileira, produz empilhamentos de água junto à costa ou excita a formação de ondas de plataforma que se propagam no mesmo sentido. Os efeitos no litoral da Região Sul são

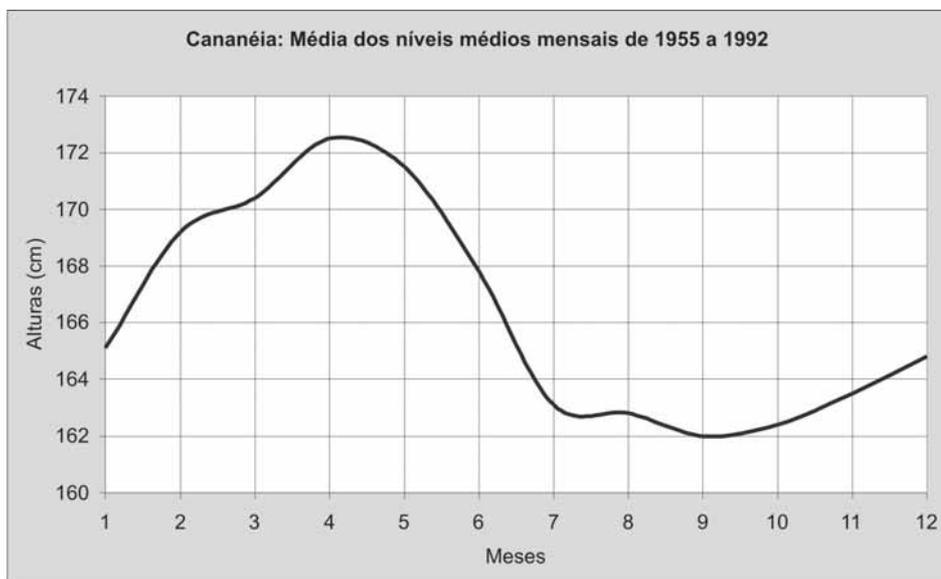
particularmente danosos ao ambiente costeiro, na medida em que elevações do NMM são muitas vezes concomitantes à ocorrência de ressacas. Castro e Lee (1995) relatam estes eventos a partir de observações maregráficas e meteorológicas durante 3 meses, em estações distribuídas desde São Francisco do Sul (SC) até Arraial do Cabo (RJ); Kalil (1997) estabelece correlações entre dados de 5 marégrafos ao longo da costa do Estado do Rio de Janeiro durante o ano de 1996. Uaissone (2004) apresenta uma abrangente revisão bibliográfica sobre estudos de nível médio do mar realizados no Brasil e compara o nível do mar em Piraquara (RJ), com as variáveis atmosféricas (pressão, tensão do vento) fornecidas pelo modelo de reanálise do NCEP/NCAR⁶ sobre a plataforma continental adjacente. Menezes (2007) repetiu análise semelhante para marégrafos em Macaé e na Baía de Guanabara, e constatou que a correlação entre a resposta do nível médio do mar e as variáveis atmosféricas era mais significativa quando utilizava dados ao largo (NCEP/NCAR) em vez de dados observados em aeroportos próximos à costa.

Esforços teóricos no sentido de prever numericamente as variações do nível do mar em consequência de efeitos meteorológicos seguem dois caminhos: o primeiro é o de modelagem numérica direta, acoplando modelos atmosféricos com modelos de circulação oceânica, o segundo é o de aplicação de redes neurais (OLIVEIRA, 2006; OLIVEIRA et al. 2006, 2007). Ambos, porém, exigem o monitoramento extensivo do nível do mar, de alguns parâmetros oceanográficos e das condições atmosféricas sobre o oceano, seja para calibração dos resultados, seja para construção dos “neurônios”.

Em escalas de 10⁵ minutos, existem os fenômenos sazonais e intra- anuais, que são igualmente influenciados por fatores climáticos globais. Silva (1992), Kalil (1997) e Uaissone (2004) confirmaram as variações sazonais do NMM, o mesmo sendo observado nos registros de Cananéia (Figura 2). Menezes (2007) verificou variações análogas nos valores de pressão atmosférica; nos períodos de outono, o NMM chega a ser 10 a 15 cm mais alto do que nas demais estações enquanto que as variações de pressão atmosférica eram da ordem de 10 hPa.

⁶ Modelo numérico global elaborado pelos “National Centers for Environmental Prediction e National Center for Atmospheric Research”.

Figura 2. Variação mensal do nível médio do mar em Cananéia.
(janeiro=1 a dezembro=12)

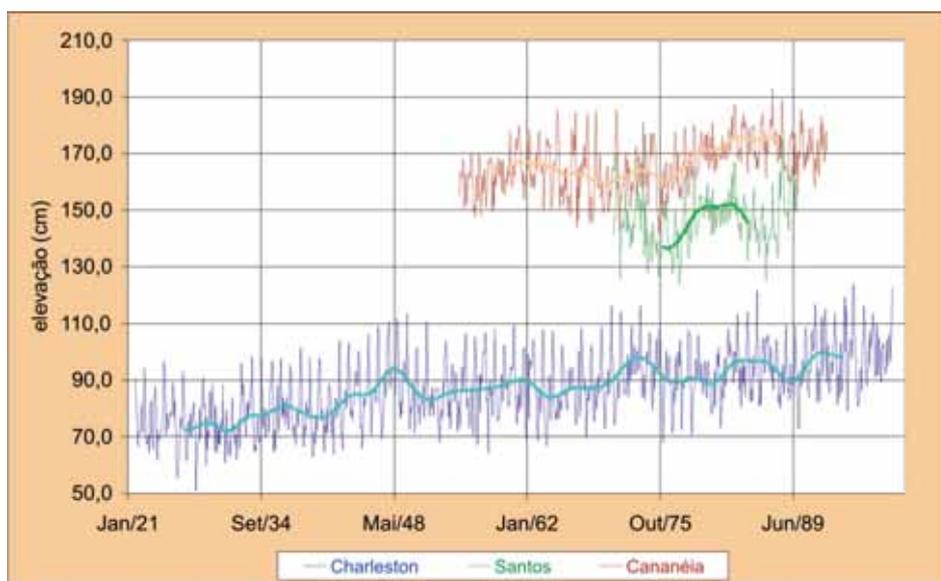


Fonte: Prof. J.Harari, IOUSP.

As escalas maiores ou iguais a 10^6 minutos correspondem à variação de longo prazo. Pirazzoli (1986) estudou as tendências de variação do NMM para 1.178 estações distribuídas em todo o planeta, das quais apenas 259 permitiam determinar uma tendência secular por apresentarem registros contínuos com mais de 30 anos e monitoramento geodésico confiável. Em Galveston, Texas (EUA), a elevação do NMM foi de 70 cm enquanto que em Juneau, Alasca (EUA), observou-se um decréscimo do NMM de 60 cm no mesmo período de 40 anos. Nestes dois exemplos, fatores geológicos explicam tal variação (respectivamente, subsidência de regiões deltaicas e reequilíbrio isostático após o degelo da última Era Glacial). Isso alerta para o fato de que fatores tectônicos e geológicos também contribuem para a percepção do nível médio do mar em relação ao continente. Na escala de vida útil de uma cidade, de um empreendimento industrial importante localizado a beira-mar, ou de um porto, o monitoramento contínuo do nível do mar precisa incluir critérios precisos de controle geodésico, sob a perspectiva de mudanças de longo prazo, a mesma categoria das mudanças climáticas.

Deve ser enfatizado que a mentalidade de monitoramento de longo prazo ainda não existe no Brasil e urge que seja estabelecida. As séries de dados maregráficos mais longas são as das estações de Cananéia (SP), mantida pelo IOUSP desde 1955, e da Ilha Fiscal (RJ), mantida pela DHN desde 1966. No caso do porto de Charleston, Carolina do Sul (EUA), observações contínuas de 1920 a 1990 indicaram uma elevação de 25 cm no nível médio do mar e evidenciam a alta variabilidade interanual (Figura 3).

Figura 3. Variação do nível médio do mar em Santos, Cananéia e Charleston (EUA).



Fonte: J.Harari e B.Kjerve

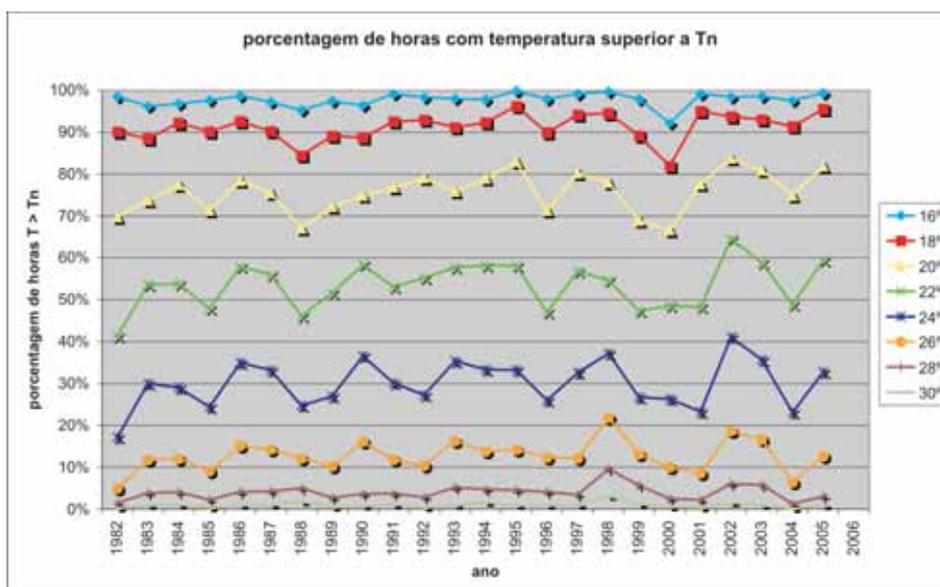
Certamente há estações maregráficas mais antigas no Brasil do que as de Cananéia e de Ilha Fiscal, contudo não se consegue assegurar a qualidade da manutenção da referência altimétrica ao longo dos anos e, por este motivo, tais registros não podem ser utilizados para inferir variações do nível médio relativo do mar.

2.6 TEMPERATURAS

A análise de valores médios, diários ou mensais, de temperatura atmosférica, se for restrita apenas aos últimos 20 ou 30 anos, indica uma

fraca tendência de elevação e possui baixa significância estatística. Alternativamente, propõe-se estudar a variabilidade dos dados, utilizando-se o conceito de “permanência de valores”. Com base em uma série histórica de 24 anos de dados horários de temperatura do ar, medidos em Angra dos Reis e cedidos pela Eletronuclear S.A., foram calculadas, para cada ano, as porcentagens de tempo em que a temperatura permanecia acima de um certo valor. A Figura 4 indica o resultado de tal análise, que permite concluir que os anos de 2000 e 2002, foram mais frios ou mais quentes, respectivamente, tomando como referência uma temperatura de 20 °C. Além disso, para uma determinada faixa de temperatura escolhida, por exemplo entre 20 e 24 °C, verifica-se que existe grande variabilidade da taxa de permanência ao longo dos anos. Outra forma de análise recomendável é avaliar a média e desvio padrão das oscilações de temperatura para as estações do ano⁷.

Figura 4. Variação anual das taxas de permanência de temperatura



Fonte: Eletronuclear S.A.

⁷ Existem divergências entre oceanógrafos e meteorologistas quanto à divisão do ano em estações, alguns escolhendo o período de verão no Hemisfério Sul como de janeiro a março, e outros como de dezembro a fevereiro, respectivamente. Alternativamente, sugere-se adotar períodos de tempo centrados nos solstícios (de inverno e verão) e nos equinócios (de outono e primavera).

Mudanças climáticas que afetam a temperatura dos oceanos podem reverter em alterações térmicas na atmosfera, disparando um processo que se auto-alimenta perigosamente, tendo em vista o balanço térmico entre oceano e atmosfera, a maior capacidade de armazenamento de calor dos oceanos e a sua escala de tempo de resposta relativamente mais lenta do que a da atmosfera. Localmente, as diferenças térmicas entre o oceano e o continente influem no regime de brisas, marinhas e terrestres, com conseqüências sobre o transporte eólico de sedimentos e circulação hidrodinâmica das águas costeiras.

A expansão térmica da água do mar pode ser responsável por algo em torno de 40% da variação do nível médio dos mares, o restante advindo do degelo das geleiras continentais (SOLOMON et al. 2007). O que ainda não se considerou satisfatoriamente foi o efeito desta mudança do padrão de temperaturas sobre a circulação oceânica meridional e zonal, os ciclos de vida da fauna e flora marinhas e a retro-alimentação sobre os climas regionais.

Enquanto a maioria dos pesquisadores considerava uma progressão lenta do degelo na Antártica e na Groenlândia, monitoramentos por satélite das calotas de gelo indicaram desprendimentos súbitos de uma grande porção nestes dois locais. Isto reverte as expectativas anteriores e exige maior aprofundamento. O Brasil, como signatário do Tratado da Antártica e realizador de trabalhos de pesquisa na região, deveria dedicar maior atenção à meteorologia polar e à oceanografia sub-antártica, tendo em vista a influência que os fenômenos nesta região possuem em relação à climatologia da América do Sul e à confluência de massas d'água quente (Corrente do Brasil) e fria (Corrente das Malvinas).

O aquecimento de áreas costeiras traz conseqüências diversas para a circulação hidrodinâmica, bem como para a fauna e flora das águas mais rasas. Isto se faz particularmente mais grave por conta dos parâmetros de dimensionamento dos emissários submarinos de esgoto. Nos casos do Rio de Janeiro, Niterói, Salvador e Camboriú, onde o esgoto é lançado *in natura* (apenas peneiramento), mudanças nas condições de estratificação marinha ou da temperatura da água superficial podem fazer com que a meia-vida bacteriana seja maior do que aquela projetada e águas com grau de contaminação acima do exigido por lei atinjam algumas praias mais distantes (CARVALHO, 2003; FEITOSA, 2003 e 2007).

2.7 PRECIPITAÇÃO

Uma das conseqüências mais estudadas no âmbito das mudanças climáticas é o regime de chuvas, associado preponderantemente à questão agrícola e à desertificação de determinadas áreas. Menos estudados são os efeitos da precipitação sobre os oceanos, o escoamento de vazões fluviais em áreas sujeitas à maré e os impactos do regime hidrológico sobre os sistemas de drenagem de áreas costeiras.

O estudo da precipitação sobre o oceano tem várias conseqüências para o sensoriamento remoto, posto que na região em questão mudam a circulação do vento, a rugosidade da superfície do mar, o balanço térmico ar-mar, a circulação termo-halina da água do mar, e a movimentação plantônica. O monitoramento deste efeito em escala mundial exige a colocação de bóias e tecnologia de transmissão de dados que somente agora começam a ser executados, tendo em vista o desafio de monitoramento de uma área que corresponde a 70% da superfície do planeta!

Mudanças de regime pluviométrico trazem conseqüências bem documentadas na literatura: erosão de encostas, aumento da sedimentação em rios, inundações, necessidade de obras de saneamento geral. Bem menos relatados e estudados no Brasil, contudo, são os efeitos da chegada da onda de cheia à porção estuarina dos rios, as inundações que aí ocorrem, especialmente se o evento for coincidente com marés de sizígia (maiores amplitudes, nas fases da Lua Nova e Cheia) ou se coincidir com efeito de sobrelevação do nível médio do mar por efeito meteorológico (o que é muito comum de acontecer). Devido à ausência de marégrafos nos principais estuários brasileiros, à falta de análise coordenada de dados hidrológicos e hidrográficos, à falta de uma base cartográfica e datum geodésico comum para áreas costeiras oceânicas (cartas náuticas da DHN) e continentais (mapas do IBGE), perde-se a visão sistêmica sobre os fenômenos na zona costeira, sobressaindo as explicações setorizadas. Dois exemplos de muito interesse, onde se está buscando esta visão integrada, são o do rio Itajaí-Açu (SC) e o do Amazonas (PA e AP), ao contrário de outros importantes estuários, como o do Paraíba do Sul (RJ), Doce (ES), São Francisco (SE/AL), Jequitinhonha (BA) e Parnaíba (PI/MA), cujas dinâmicas não são estudadas.

No outro extremo, não se pode deixar de considerar, nos cenários possíveis de mudanças climáticas, a redução da precipitação sobre as bacias hidrográficas, o que acarretaria a salinização de estuários, o aumento relativo da importância do prisma de maré sobre a vazão fluvial, a redução do transporte de sedimentos fluviais em direção à costa e mudanças na circulação hidrodinâmica induzida pelas ondas. Um programa de monitoramento dos estuários (vazões, maré e sedimentos), integrado ao gerenciamento da bacia hidrográfica, seria a única forma de se caracterizar e quantificar a evolução dos ambientes estuarinos.

O regime hidrológico de áreas costeiras, especialmente a drenagem de áreas urbanas vizinhas a lagunas, é assunto também merecedor de estudos mais aprofundados e prolongados. Em várias cidades de veraneio na Região dos Lagos (RJ) é comum a ocorrência de inundações e transbordamento das lagunas, coincidindo com chuvas (passagens de frentes frias que ocasionam elevação do nível médio do mar). Sendo a rede de esgotos ligada usualmente à rede de drenagem pluvial, esta situação transforma-se em problema de saúde pública. Fenômeno semelhante ocorre na Baixada Fluminense, tendo em vista a pouca capacidade de drenagem dos rios devido ao entulhamento da calha fluvial, mas potencializado por elevações transientes do nível médio do mar (ou da baía de Guanabara) de origem meteorológica.

Nas regiões de restinga, especialmente em áreas mais remotas, a infiltração da água das chuvas nas dunas permite o abastecimento sustentável de uma pequena população. O excesso de captação de água doce, a contaminação do aquífero pelo lançamento de esgotos (fossas), conjugado a mudanças climáticas, que resultem na alteração de regime hidrológico (redução de pluviosidade) ou na elevação do nível médio relativo do mar, podem se tornar impactantes para estas populações devido à salinização dos poços (por exemplo, Arraial do Cabo (RJ), Jaboatão (PE)).

3. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

3.1 EROSION E PROGRADAÇÃO

Inventários sobre erosão e progradação da linha de costa realizados pelos diferentes grupos de pesquisa associados ao Programa de Geologia e Geofísica Marinha em todos os estados costeiros (MUEHE, 2006) indicam

que os relatos sobre erosão são bem mais numerosos do que os de avanço (progradação) da linha de costa. É preciso, porém, levar em conta que a identificação de progradação é difícil de ser feita apenas por observação pontual, sem conhecimento histórico sobre o local, ao contrário da erosão que deixa vestígios claros. Mas também aí há problemas, na medida em que uma indicação de erosão não significa necessariamente uma tendência, o que só se substancia a partir de monitoramento de longo prazo por meio de medições sistemáticas em campo ou de comparação entre imagens de satélites de alta definição. Grosso modo, cerca de 35% da linha de costa do Brasil está sob efeito erosivo. Essa ocorre preferencialmente nas praias e, em menor escala, nas falésias sedimentares e nas proximidades de desembocaduras fluviais e estuarinas. Nessas, os relatos de ocorrências de erosão e progradação mais ou menos se equivalem, caracterizando sua elevada mobilidade morfológica, atestando o risco, já conhecido, de construir nestes ambientes. Sob o ponto de vista da vulnerabilidade a uma elevação do nível do mar e às modificações do regime de ventos e ondas associadas à mudança climática prevista, as áreas com evidências erosivas, mesmo as que não representam uma tendência de retrogradação, passarão a ter sua vulnerabilidade aumentada. Assim sendo, para ter uma idéia mais precisa da vulnerabilidade de acordo com a morfologia do litoral serão analisadas as características de distintos compartimentos geomorfológicos do litoral brasileiro.

3.2 COMPARTIMENTOS GEOMORFOLÓGICOS DE MARCANTE INDIVIDUALIDADE MORFODINÂMICA

Uma análise das publicações científicas permite claramente distinguir, pelo menos, nove ambientes geomorfológicos submetidos a processos erosivos:

- o litoral lamoso do Amapá;
- o litoral de dunas do Ceará;
- os cordões litorâneos e ilhas barreira de elevada mobilidade do litoral setentrional do Rio Grande do Norte;
- as falésias sedimentares ativas do Grupo Barreiras do Ceará e Rio Grande do Norte;
- a costa de arrecifes de Paraíba a Alagoas;

- as planícies de cristas de praia da Baía, Alagoas/Sergipe, Espírito Santo e Rio de Janeiro;
- os duplos cordões litorâneos do litoral do Rio de Janeiro;
- o litoral cristalino e das praias de enseada de São Paulo e Santa Catarina;
- as barreiras múltiplas do litoral do Rio Grande do Sul.

A caracterização dos sedimentos da plataforma continental interna em frente a esses compartimentos é importante indicador do potencial de fornecimento de material de empréstimo para obras de aterros e alimentação artificial de praias.

Para concluir essa categorização, não se pode deixar de mencionar os recifes de corais (LEÃO et al. 1994, 1996 e 1999; CASTRO, 1994; KIKUCHI et al., 2002), que se estendem no litoral Nordeste até o sul da Bahia, e os manguezais (HERZ, 1991), que ocupam uma área total de 1 milhão de hectares desde o Amapá até o litoral norte de Santa Catarina. Esses ecossistemas, embora protegidos por várias medidas legais, têm se mostrado muito vulneráveis a acidentes e a ações antrópicas (GONCHOROSKY et al., 1989; MAIA PORTO e TEIXEIRA, 2002, p.40-42). No contexto das mudanças climáticas, eles são vulneráveis a variações de nível do mar, temperatura, salinidade, acidez e turbidez das águas, o que constitui tema de investigação específica em face da cadeia complexa de processos físicos, químicos e geológicos. No caso dos manguezais brasileiros, cuja área representa metade da área ocupada na América do Sul, de acordo com recente estudo da FAO (2007), eles sofreram uma redução de aproximadamente 5% desde 1980 em sua cobertura. Sua expansão é condicionada pela presença humana no entorno, pelas características do substrato geológico, pela variação do nível médio relativo do mar e pelo balanço hídrico entre as contribuições continentais e marinhas.

3.3 O LITORAL LAMOSO DO AMAPÁ

Uma quantidade imensa de sedimentos finos, lamosos, é introduzida na plataforma continental pelo Rio Amazonas e transportada para Noroeste, pela Corrente das Guianas, ao longo do litoral do Amapá em direção às Guianas. A plataforma continental é muito larga e rasa. O fundo lamoso

atenua a altura das ondas e altera a propagação da onda de maré (GABIOUX, 2002). Apesar da abundância de sedimentos ocorre erosão (Figura 5) em longos trechos do litoral (DIAS et al., 1992; NITTROUER et al., 1996).

Figura 5. Erosão no litoral do Amapá – Cabo Norte



(Foto G.T.M. Dias)

A ocupação é praticamente ausente com exceção do litoral estuarino, na margem do canal do norte do Rio Amazonas em Macapá, Fazendinha e Porto Santana, onde o recuo da linha de costa ocorre tanto por causas naturais quanto por efeito de obras, no caso da zona urbana de Macapá (TORRES e EL-ROBRINI, 2006).

O clima é quente e as chuvas são abundantes. Os alísios de sudeste, que sopram paralelamente à linha de costa mudam de direção para nordeste durante os meses de janeiro a março, passando a incidir perpendicularmente à linha de costa. Ganham velocidade e, em vez de provocar erosão, trazem sedimentos finos da plataforma em direção à costa na forma de lama fluida (KINEKE e STERNBERG, 1995).

A amplitude da maré decresce de macro-maré ao sul do Cabo Norte para meso-maré em direção a norte. De acordo com Nittrouer et al. (1996), as fortes correntes de maré, mais freqüentemente direcionadas para o oceano aberto, parecem constituir o principal fator desencadeador da erosão costeira. Acumulação sedimentar ocorre nos cabos Orange e Cassiporé, na extremidade norte do litoral e no flanco nordeste do Cabo Branco até ao norte da Ilha de Maracá, enquanto a erosão predomina ao longo da maior parte da costa entre o limite sul do Parque Nacional do Cabo Orange e as proximidades de Almeriana, e a sul da Reserva Biológica do Lago Piratubo, a partir do Rio Araguari, no flanco leste do Cabo Branco. Taxas de recuo da linha de costa foram relatadas como sendo 0,5 m/ano a 1 m/ano no Cabo Cassiporé e de 5 m/ano a 10 m/ano na Ilha de Maracá (ALLISON 1993 *apud* TORRES e EL-ROBRINI, 2006).

Não obstante a atual tendência erosiva a evolução da costa durante o Holoceno foi, segundo Nittrouer et al. (1996), predominante progradacional, com alternâncias entre erosão e progradação em intervalos de 100 a 1000 anos.

3.4 O LITORAL DE DUNAS DO CEARÁ

A constância dos ventos alísios e a pronunciada estação seca (agosto a dezembro) durante a qual as velocidades do vento atingem os maiores valores (até 8 m/s), assim como uma abundante transferência de areias da plataforma continental para o continente favorecida por larga exposição do estirâncio da praia durante os ciclos de maré baixa, fornecem as condições para um amplo desenvolvimento de dunas ao longo dos 572 km de linha de costa. Taxas médias de migração das dunas são citadas por Maia et al. (1999) como sendo de 17,5 m/ano para dunas barcanas e 10 m/ano para lençóis de areia. O transporte eólico foi estimado como sendo da ordem de 300.000 m³/ano (VALENTINI e ROSMAN, 1993; VALENTINI, 1994). A obliquidade de incidência das ondas é responsável pelas elevadas taxas de transporte litorâneo unidirecional, da ordem de 10⁶ m³/ano, com forte resposta erosiva no caso de interrupção deste fluxo por algum obstáculo. Por exemplo, a construção em 1875 de um quebra-mar destacado em frente à cidade de Fortaleza, com cerca de 430 m de extensão paralelo à costa, com a finalidade de criar condições de abrigo às embarcações, provocou forte deposição de areia (KOMAR, 1976, p.330); posteriormente, construiu-

se um molhe na ponta de Mucuripe para a proteção do novo porto de Fortaleza, que interrompeu o transporte de sedimentos e desencadeou um processo erosivo ao longo de segmento costeiro a sotamar da obra, o que afetou severamente as praias da região urbana e mais além em direção à foz do rio Ceará; Valentini (1994) apresenta histórico detalhado sobre as obras, os impactos e o balanço sedimentar na orla da Região Metropolitana de Fortaleza. A praia de Iracema, a mais importante praia urbana, foi recuperada através de aterro mantido através de dois longos espigões (Figura 6). Uma outra obra, a do porto de Pecém, a noroeste de Fortaleza, também provocou impactos sobre a linha de costa, apesar da concepção do projeto (quebramar destacado) não interromper o transporte longitudinal de sedimentos.

Figura 6. Espigões na praia de Iracema – Fortaleza



Independentemente destes pontos localizados, a maior parte da costa parece estar sendo soterrada pelo imenso volume de areia. A ampla ocorrência de arenitos de praia defronte às praias constitui uma certa proteção contra a erosão. Não obstante, a presença de raízes de mangue no estirâncio da praia é um indicador de que, em muitos segmentos, a linha de costa está recuando. Isto é confirmado pelas observações realizadas por Moraes et al. (2006) que

mapearam 15 pontos de erosão distribuídos ao longo de toda a costa do Estado, envolvendo praias, mesmo com presença de arenitos, e falésias, contra apenas sete pontos com indicação de progradação.

3.5 OS CORDÕES LITORÂNEOS E ILHAS BARREIRA DE ELEVADA MOBILIDADE DO LITORAL SETENTRIONAL DO RIO GRANDE DO NORTE

O setor setentrional do Rio Grande do Norte engloba 100 km de linha de costa orientada para o Norte com forte e constante transporte litorâneo direcionado para oeste. O clima é seco e o aporte de sedimentos continentais praticamente ausente. A compartimentação tectônica influencia a batimetria e, conseqüentemente, a propagação de ondas e os processos costeiros (VITAL et al., 2003).

Um aspecto marcante deste trecho do litoral é a expressiva mobilidade das ilhas barreira e esporões que se estendem a distâncias variáveis da linha de costa (Figura 7).

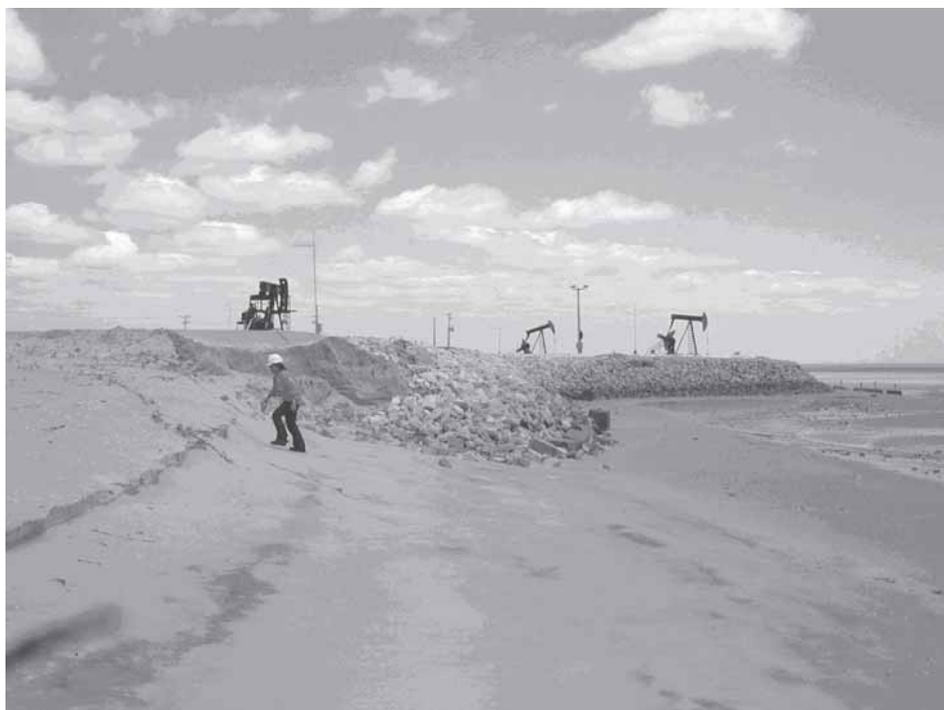
Figura 7. Ilha barreira defronte ao litoral do Rio Grande do Norte.



(Foto E.E.Toldo Jr).

Enquanto nas praias dos cordões litorâneos e ilhas barreira, expostas ao oceano aberto, o transporte litorâneo é direcionado para oeste, na linha de costa da planície costeira, protegida pelas barreiras arenosas, predomina a rápida retrogradação em grande parte decorrente da falta de sedimentos aprisionados nos corpos arenosos das ilhas barreira e pontais (VITAL et al., 2006). Bandeira (1993) descreve as mudanças morfológicas ao longo de um trecho de 27,5 km de costa em Guamaré, na restinga de Galinhos e na Ponta de Tubarão, no período 1982 a 1990. Segundo o autor, mudanças no padrão das correntes de maré seguiram-se à nova conformação das restingas, o que resultou em uma nova conformação da linha de costa no continente. O estudo desse trecho de costa torna-se muito importante em face da presença de estruturas de apoio à exploração de petróleo nos campos de Macau e Ubarana (Figura 8) e do risco de ruptura, por ressonância, dos dutos originalmente enterrados e que ficaram expostos à ação das correntes.

Figura 8. Ampla retrogradação do litoral colocando em risco os poços de petróleo (Ponta do Tubarão).



As causas da erosão são o resultado de uma conjugação de fatores como a falta de aporte sedimentar, transporte unidirecional de sedimentos, hidrodinâmica costeira, transferência de sedimentos para o campo de dunas e neo-tectonismo. Constitui um exemplo importante e emblemático, para outros trechos do litoral, do que poderiam ser as conseqüências de mudanças climáticas.

3.6 AS FALÉSIAS SEDIMENTARES ATIVAS DO GRUPO BARREIRAS DO CEARÁ E RIO GRANDE DO NORTE

Tanto no litoral sudeste do Ceará quanto na costa leste meridional do Rio Grande do Norte a predominância de campos de dunas é interrompida por falésias ativas do Grupo Barreiras. As mesmas não estão restritas a essas áreas pois ocorrem disseminadas em outros Estados e apresentam problemas semelhantes aos descritos abaixo. Morro Branco no Ceará e Pipa no Rio Grande do Norte são locais representativos e são um forte atrativo para turistas devido à beleza da paisagem.

No Rio Grande do Norte, as falésias se estendem ao longo do litoral sul, de Tibau do Sul até o limite com a Paraíba (Figura 9). Conforme Silva et

Figura 9. Falésia ativa. Segmento Tibau do Sul – Pipa



al. (2003) as falésias ativas estão limitadas à porção central deste trecho, onde as ondas atingem a base da falésia durante a preamar provocando seu colapso e gradual retrogradação. A construção freqüente de casas e piscinas nas proximidades imediatas do topo das falésias, com inevitáveis infiltrações, provoca um esforço adicional sobre a estabilidade da escarpa, aumentando o risco de escorregamento.

O gradual colapso das escarpas das falésias sedimentares não representa necessariamente o resultado de uma elevação relativa do nível do mar recente, mas sim um processo de adaptação ao nível do mar, que ainda não atingiu seu equilíbrio. Esse processo naturalmente se intensificará no caso de uma nova elevação do nível do mar ao mesmo tempo em que os sedimentos liberados pela erosão atuam no sentido de retardar a velocidade de recuo da linha de costa. A manutenção de uma faixa de não edificação, a partir do topo das falésias, é uma importante medida a ser adotada, conforme previsto no Projeto Orla do Ministério do Meio Ambiente.

3.7 A COSTA DOS ARRECIFES DE PARAÍBA A ALAGOAS

Afloramentos de arenitos de praia, em forma de alinhamentos paralelos à linha de costa, se tornam mais constantes a partir de João Pessoa (PB) até Coruripe (AL). Na zona submarina, esses arenitos servem de substrato para a instalação de colônias de corais, que crescem em forma de cogumelos denominados de chapeirões (DOMINGUEZ *et al.*, 1990).

A primeira impressão é a de que os arrecifes protegem a praia contra a elevação do nível do mar, mas na verdade eles funcionam como um obstáculo adicional ao equilíbrio do balanço sedimentar. Com a elevação do nível relativo do mar, as ondas transpõem os arrecifes durante uma parcela mais longa do ciclo de maré, modificam a circulação hidrodinâmica a sotamar e mobilizam os sedimentos da praia, que são levados para a região externa dos arrecifes pelas correntes e não conseguem mais retornar à praia. Em consequência, gera-se um déficit permanente de areia (BRAGARD e NEVES, 1995; NEVES e MUEHE, 1995).

A erosão intensa que afetou, em especial, o litoral de Olinda, parece estar originalmente ligado ao déficit de aporte sedimentar devido a dragagens no porto de Recife (NEVES *et al.*, 1991). Tal fato levou à construção de

uma série de espigões e, posteriormente, à construção de quebra-mares isolados sobrepostos aos arrecifes.

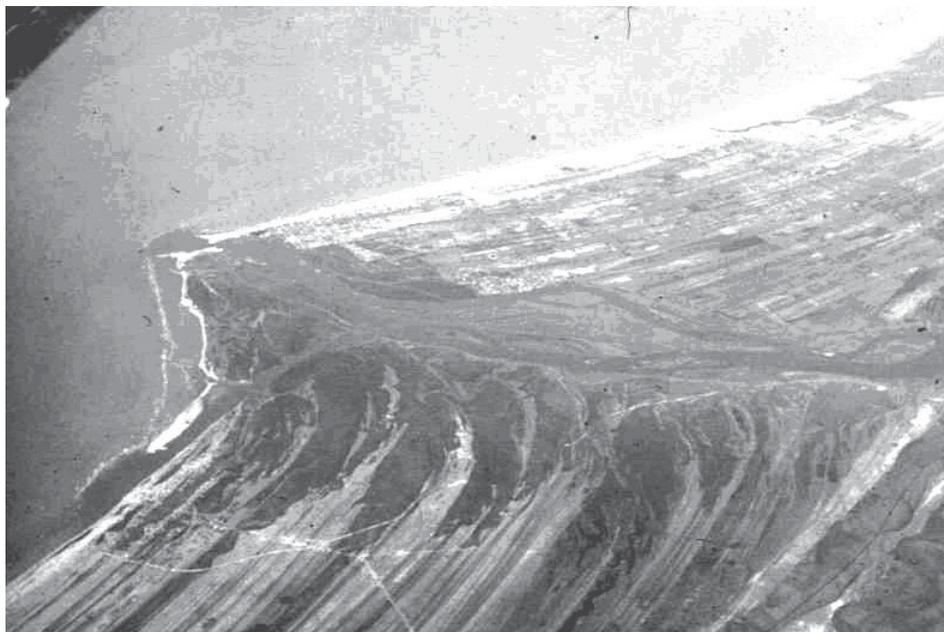
Ao sul da Paraíba, como reflexo da maior precipitação, começa a aumentar a ocorrência de estuários e manguezais associados, como o do Mamanguape, Paraíba, Goiana, Jaguaribe, Capibaribe, Beberibe, Suape e Manguaba. Coutinho (1994) chama a atenção para a completa ausência de deltas no litoral de Pernambuco, refletindo o reduzido aporte de sedimentos fluviais à praia, muitas vezes retidos em lagunas formadas na retaguarda dos arrecifes. Dessa forma, a principal fonte de sedimentos na formação das praias, cordões litorâneos e pontais, é a própria plataforma continental interna. Essa é estreita, com largura em torno de 50 km, e abarca a quase totalidade da plataforma continental. A diferença entre a isobatimétrica de 50 m e a quebra da plataforma continental (profundidade em torno de 200 m) é, freqüentemente, de apenas alguns quilômetros, sendo quase sempre inferior a 10 km. Em conseqüência, a dissipação de energia das ondas no fundo é menor quando comparada a outros trechos costeiros onde a plataforma continental é mais larga.

3.8 AS PLANÍCIES DE CRISTAS DE PRAIA DE ALAGOAS/SERGIPE, BAÍA, ESPÍRITO SANTO E RIO DE JANEIRO

Localizado numa faixa de latitude na qual a direção residual do transporte litorâneo é definida pela dominância entre ondas de nordeste, geradas pelos ventos alísios, e ondas e marulhos provenientes do sul, o alinhamento das cristas de praia que formam as planícies costeiras dos rios São Francisco (AL-SE), Jequitinhonha, (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ) refletem as alterações dessas alternâncias na direção de incidência das ondas (Figura 10), conforme descrito por Dominguez et al. (1993).

Dois mecanismos indutores da direção do transporte litorâneo foram reconhecidos: 1) o espigão hidráulico, que aumenta a progradação sedimentar a montante da desembocadura fluvial resultando numa configuração assimétrica da desembocadura fluvial e a migração da desembocadura na direção jusante durante fases de decréscimo da descarga fluvial; 2) a reversão da direção do transporte litorâneo de acordo com a direção predominante de incidência das ondas. (DOMINGUES et al. 2003).

Figura 10. Planície de cristas de praia do rio Paraíba do Sul. O truncamento de conjunto de cristas pode ser observado na margem direita indicando um deslocamento lateral da paleo-desembocadura. Atualmente a extremidade distal da margem direita se encontra sob erosão severa.



A reconstituição das reversões da direção do transporte litorâneo a partir da orientação e truncamento das cristas de praia, e o crescimento e truncamento da configuração em cúspide da desembocadura fluvial respectivamente associado a períodos de elevada e baixa descarga fluvial, foi apresentada por Dominguez et al. (2003) para a planície costeira do rio Jequitinhonha. Os autores descrevem que, nos últimos 300 anos, se desenvolveram três formas cuspidadas de expressão interrompidas por episódios de erosão severa, tendo o último ocorrido em 1906, seguido de ampla progradação. Essas mudanças foram explicadas tentativamente pelos autores como sendo decorrentes de uma diminuição no avanço das frentes frias com conseqüente redução das precipitações e redução na freqüência de penetração de ondas e marulhos do sul-sudeste.

O importante nesse exemplo é o reconhecimento das múltiplas interações entre clima, descarga fluvial, incidência das ondas e fonte de sedimentos, e a inerente instabilidade das desembocaduras fluviais

(por exemplo, COSTA, 1995). Atualmente as desembocaduras dos Rios São Francisco e Paraíba do Sul apresentam erosão severa nas suas margens Sul, com a completa destruição do vilarejo de Cabeço no primeiro caso e a erosão de uma faixa de 200 m de largura, completamente urbanizada em Atafona, no segundo caso (Figura 11).

Figura 11. Erosão em Atafona desembocadura do rio Paraíba do Sul – RJ



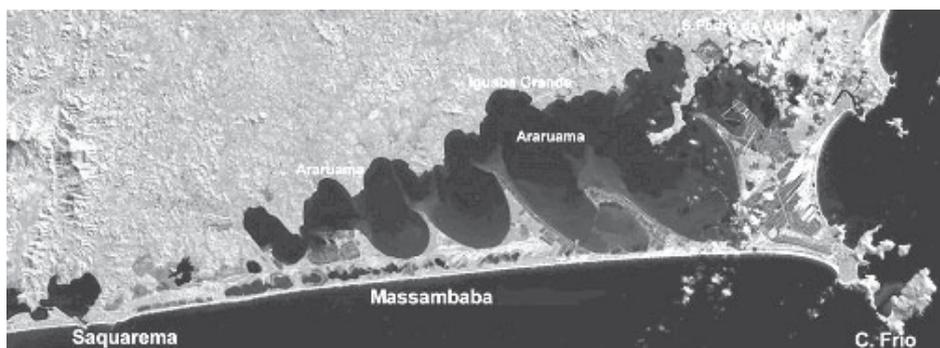
A vulnerabilidade destes sistemas está diretamente associada a um conjunto de variáveis climáticas e oceanográficas que controlam a vazão fluvial e o clima de ondas, o que se reflete na direção do transporte longitudinal, na retenção ou não de sedimentos nas desembocaduras fluviais por efeito de barramento hidráulico, na direção do alinhamento da linha de costa e conseqüentemente nos locais de ocorrência de erosão, estabilidade e progradação.

3.9 OS DUPLOS CORDÕES LITORÂNEOS DO LITORAL DO RIO DE JANEIRO

No Rio de Janeiro, a partir do cabo Frio, seguindo a brusca inflexão da linha de costa para oeste, até à ilha da Marambaia, defronte à baía de Sepetiba, a linha de costa apresenta longos e quase retilíneos segmentos de

praia ligados a cordões litorâneos, freqüentemente barrando lagunas à sua retaguarda (Figura 12). Essas por sua vez captam os sedimentos provenientes dos maciços costeiros próximos, bloqueando por completo a chegada de sedimentos continentais ao mar. O resultado são praias oceânicas com areias bem selecionadas e polidas de alta maturidade e que, por muito tempo, vêm sendo submetidas à ação das ondas, transitando continuamente entre os subsistemas praia, antepraia e plataforma continental interna. Elas formam um sistema fechado cuja ruptura, em caso de elevação do nível do mar ou aumento de intensidade ou freqüência de tempestades, se traduzirá diretamente em erosão costeira por déficit sedimentar. O transporte litorâneo de sedimentos é definido pela incidência das ondas que tendem a um transporte residual nulo devido à orientação leste-oeste da linha de costa e ao caráter bi-modal da direção de incidência das ondas (sudeste e sudoeste).

Figura 12. Segmento de linha de costa do Rio de Janeiro com duplos cordões litorâneos entre Arraial do Cabo e Niterói - RJ



A ocorrência localizada de dunas frontais desempenha um importante papel na estabilização do cordão litorâneo (MUEHE e FERNANDEZ, 1999). Na sua ausência a ocorrência de transposição do cordão pelas ondas de tempestade e as evidências erosivas de sua frente oceânica indicam o caráter transgressivo do mesmo, um processo que se intensificará como decorrência de uma elevação do nível do mar e de aumento de freqüência e intensidade de tempestades.

Mudanças na direção de incidência das ondas resultariam num alinhamento da praia em planta diferente do atual, de modo a ficar perpendicular ao clima de ondas que resultasse em transporte residual nulo.

Por conseguinte, uma extremidade da praia recuará (erosão) enquanto que a outra avançará em direção ao mar (progradação).

Uma tempestade excepcional ocorrida em maio de 2001 (MUEHE et al., 2001) resultou em destruição de casas nos municípios de Maricá e Saquarema, a leste de Niterói (BARROS et al., 2003). Todas as casas e quiosques afetados pela tempestade se localizavam muito próximas do perfil ativo da praia (Figura 13). No entanto, o que poderia ser considerado uma resposta a um evento excepcional isolado representa na realidade uma tendência de retrogradação conforme mostra o recuo gradual em cerca de 11 m do flanco oceânico de um campo de dunas frontais a oeste de Arraial do Cabo na praia da Massambaba, conforme resultado de monitoramento realizado durante os últimos oito anos.

Figura 13. Erosão no trecho urbanizado em Barra de Maricá (RJ) por ação da tempestade de maio de 2001



3.10 O LITORAL CRISTALINO E DAS PRAIAS DE ENSEADA DE SÃO PAULO E SANTA CATARINA

Praias de enseada (*pocket beaches*) são unidades fisiográficas em geral limitadas por pontões rochosos que restringem o transporte longitudinal de

sedimentos para fora desses limites. Em consequência, a linha de praia orienta-se perpendicularmente à direção de incidência das ondas. Face a potenciais mudanças no clima de ondas no Atlântico Sul, dois trechos do litoral brasileiro foram selecionados, onde estas feições são muito encontradas: em São Paulo, onde o alinhamento geral da costa é leste-oeste, e em Santa Catarina, onde o alinhamento é norte-sul.

O segmento de costa que se estende desde a Ilha de Marambaia (RJ) até São Vicente (SP), incluindo a Ilha Grande e a baía do mesmo nome, é caracterizado por um litoral de aspecto afogado, com inúmeras ilhas. As escarpas da Serra do Mar formam a linha de costa, que se apresenta com uma sucessão de pequenas enseadas e planícies costeiras de pequena expressão, o que não impede que a intervenção humana desencadeie processos erosivos (VALENTINI et al., 1995). Fúlfaro e Coimbra (1972), ao estudarem as praias do litoral paulista, identificaram duas áreas morfologicamente distintas. A área norte, desde a divisa do Estado do Rio de Janeiro até a ponta da Boracéia, é caracterizada por praias de enseada com comprimentos entre 2 a 4 km, separadas por pontões do embasamento cristalino. A maior extensão de praia contínua encontra-se na enseada de Caraguatatuba, com mais de 10 km de extensão, tendo a sua retaguarda a única planície costeira de expressão. Ao sul da ponta da Boracéia, as planícies costeiras se tornam mais contínuas, a linha de costa tende a ser mais retilínea, e ocorre uma gradual redução dos depósitos sedimentares costeiros (MARTIN et al., 1979; SUGUIO e MARTIN, 1978; MARTIN e SUGUIO, 1978).

A proximidade do relevo elevado favorece às precipitações orográficas, tornando o clima superúmido, provocando intenso escoamento superficial, aumento repentino das descargas fluviais, movimentos de massa e escorregamentos nas encostas íngremes com consequências ocasionalmente catastróficas.

A plataforma continental interna se alarga progressivamente em direção a sudoeste, distando a isobatimétrica de 50 m cerca de 15 km da ilha Grande e 44 km da ilha de Santo Amaro, enquanto que a de 20 m segue as reentrâncias do litoral. O material de fundo entre 20 e 50 m de profundidade é predominantemente arenoso, com lamas ocorrendo numa área limitada, na porção distal da plataforma continental interna, entre Ubatuba e a ilha de São Sebastião (KOWSMANN e COSTA, 1979). Os sedimentos da

plataforma continental entre Santos e Ilha Grande agrupam-se em dois centros de dispersão (COIMBRA et al., 1980): o principal, a sudeste da ilha Grande, caracteriza-se por sedimentos de granulometria grossa, elevado teor de carbonatos biodetríticos pouco fragmentados e baixo teor de lama; o segundo localiza-se a oeste da área de estudo, também apresentando sedimentos de granulação grossa, porém baixo teor de carbonatos. Nas proximidades do litoral aumenta a ocorrência de areias muito finas e de lamas, depositadas nos ambientes de baixa energia dos embaiamentos, como na região de Ubatuba (MAHIQUES, 1989) e parte da enseada de Caraguatatuba, com exceção da faixa defronte ao canal de São Sebastião, onde ocorrem areias grossas a muito grossas (SOUZA, 1992).

Da ponta do Vigia à extremidade sul da ilha de Santa Catarina, no Estado de Santa Catarina, o litoral também se apresenta recortado, com afloramentos de rochas cristalinas pré-cambrianas interrompendo a continuidade da planície costeira quaternária (GRÉ, 1994). Uma série de enseadas, pouco confinadas, se abrem para o oceano. Inicialmente para nordeste, como as enseadas de Camboriú e Porto Belo; para leste, como a baía das Tijucas, e para leste-sudeste, no litoral da ilha de Santa Catarina. O Itajaí-Açu forma o estuário de maior expressão neste trecho de litoral, frequentemente impactado por inundações, tendo o porto de Itajaí como importante escoadouro da produção do Estado.

A Ilha de Santa Catarina constitui feição alongada, com cerca de 52 km de comprimento e largura média em torno de 10 km, deslocado para leste, em relação ao alinhamento do litoral ao norte da ilha. Entre a ilha e o continente, formaram-se duas baías, a Norte e a Sul, conectadas por um estreito canal, passagem entre dois promontórios, sobre os quais está localizada a cidade de Florianópolis. Predominam rochas pré-cambrianas na constituição do arcabouço da ilha (CARUSO Jr. AWDZIEJ, 1993), enquanto que feições quaternárias, pleistocênicas e holocênicas, na forma de praias, cordões litorâneos e depósitos lagunares, formam uma estreita faixa no litoral norte e leste. No lado oceânico da ilha, destacam-se campos de dunas, ativos e inativos, a exposição de turfas na Praia do Moçambique, o que indica a migração do cordão litorâneo por cima de depósitos lagunares (MUEHE e CARUSO Jr., 1989) e a lagoa da Conceição, que se estende no sentido nortesul, ao longo de 13,5 km e se conecta ao mar por um estreito canal de maré, a norte da ponta da Galheta.

A plataforma continental interna se estreita ao norte da Ilha de Santa Catarina, distando a isóbatimétrica de 50 m não mais que 5 km da linha de costa. Deste ponto, volta a se alargar, em direção ao sul, chegando a 13 km, à medida que a linha de costa segue uma direção ligeiramente oblíqua à direção da isóbatimétrica de 50 m. Uma série de ilhas e alto-fundos, formados por rochas do embasamento, dão um aspecto movimentado à morfologia do fundo marinho. O recobrimento sedimentar da plataforma continental interna, a partir da isóbatimétrica de 40 m em direção a maiores profundidades passa a ser de lamas de origem fluvial e de plataforma (KOWSMANN e COSTA, 1979), voltando a areia a predominar de frente à metade leste da ilha de Santa Catarina para o sul.

Os dois trechos de litoral, por apresentarem enseadas e baías abrigadas, são adequados à implantação de aqüicultura (mariscos, vieiras, ostras). Mudanças nas propriedades físico-químicas das águas e da agitação marinha podem trazer impactos econômicos e morfológicos nas praias, tendo em vista a alta densidade de ocupação das estreitas planícies costeiras. Além disso, mudanças climáticas ou antrópicas que alterem a cobertura vegetal da Serra do Mar e dos maciços costeiros (SC) provocariam o aumento do aporte de sedimentos às enseadas, trazendo assoreamentos indesejados ou aumentando a turbidez das águas de duas regiões com alto atrativo turístico, alto valor para maricultura e muitas marinas.

3.11 AS BARREIRAS MÚLTIPLAS DO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL

Uma praia quase contínua, de direção nordeste-sudoeste, se estende entre Torres e Chuí, ao longo de cerca 640 km, formando a face oceânica da ampla planície costeira do Rio Grande do Sul. Três importantes interrupções na continuidade da linha de costa são as desembocaduras das lagunas de Mampituba e Tramandaí, ao Norte, e da Lagoa dos Patos, no Sul, estabilizadas por estruturas.

Quatro sucessões de cordões litorâneos ou barreiras ampliaram a planície costeira desde o Pleistoceno, cada barreira representando o limite de avanço de cada episódio de elevação do nível do mar (VILLWOCK, 1984; TOMAZELLI e VILLWOCK, 1996). A terceira barreira formou as lagunas dos Patos e Mirim durante o último episódio transgressivo do Pleistoceno, isto é antes do último período glacial, enquanto a quarta e mais

recente barreira se desenvolveu durante o período pós-glacial há cerca de 5.700 anos.

O clima é temperado úmido. Marulho proveniente de sudeste é responsável pelo transporte residual de sedimentos em direção a norte enquanto que ondas provenientes de leste e nordeste assim como ondas de tempestade episódicas de leste e sudeste desencadeiam os processos erosivos e progradação ao longo da costa (TOMAZELLI e VILLWOCK 1992, 1996). A amplitude média da maré astronômica é cerca de 0,5 m, mas as oscilações de maré meteorológica podem atingir 1,0 m.

A ocupação da linha de costa é baixa e se concentra essencialmente em pequenos vilarejos no litoral norte onde a distância para a metrópole é menor (ESTEVEES et al. 2003). Já ao longo da margem oeste da Lagoa dos Patos, há várias cidades e captações de água para irrigação; existe também a conexão hidroviária entre o Porto de Rio Grande e a Região Metropolitana de Porto Alegre.

O mapeamento sistemático da linha de costa, ao longo do estirâncio, por meio de DGPS, indicou forte mobilidade do perfil transversal da praia (ESTEVEES et al. 2002; TOLDO et al. 2006), sem que isto representasse uma tendência de erosão ou progradação conforme mostrado por Esteves (2004, 2006). Segmentos com erosão permanente foram localizados próximo ao farol de Albardão (cerca de 70 km a norte de Rio Grande) e no extremo sul entre o farol de Fronteira Aberta e Arroio Chuí, no limite com o Uruguai, estando associado a pontos de concentração da energia das ondas (CALLIARI et al. 1998; SPERANSKI e CALLIARI, 2000; SPERANSKI e CALLIARI, 2006). Tal mapeamento deveria ser feito também ao longo da orla da Lagoa dos Patos, tendo em vista a mobilidade de sua orla por ação de ondas geradas localmente por ventos.

3.12 VULNERABILIDADE DAS OBRAS COSTEIRAS

As regiões costeiras urbanas, especialmente nas capitais dos Estados, foram densamente ocupadas e transformadas, a tal ponto que é difícil reconhecer as feições originais. A cidade do Rio de Janeiro é um exemplo interessante quando considerada sob a ótica da engenharia costeira e das soluções de ocupação da orla. Muehe e Neves (2007) analisam detalhadamente a vulnerabilidade da cidade às mudanças climáticas, de

acordo com os prognósticos do IPCC, cujos resultados foram apresentados no seminário “Rio – Próximos 100 anos” realizado pelo Instituto Pereira Passos no Rio de Janeiro, em outubro de 2007, abordando aspectos multidisciplinares (geopolítica, população, usos do solo, zona costeira, manguezais, sistemas lagunares, meteorologia, encostas, hidrologia, saneamento, saúde).

Em várias cidades a construção de uma avenida litorânea serve ao propósito de conter a expansão urbana em direção ao mar e garantir o acesso público à praia. Essa não é a única opção de ocupação da orla, como é apresentado por Vallega (2001).

Como resultado da elevação de origem meteorológica e transitória do nível do mar, das ressacas ou da diminuição do aporte de sedimentos, ocorrem mudanças no perfil da praia, eventualmente afetando as estruturas e beneficiamentos urbanos costeiros. Entre as formas de proteção, existem as obras rígidas de fixação (muros ou enrocamento), que freqüentemente dificultam o acesso dos banhistas à praia (por exemplo, Boa Viagem e Candeias (PE), Marataízes (ES), Matinhos (PR)), a alimentação artificial da praia (por exemplo, Copacabana (RJ), Camburi (ES), Camboriú (SC)) e a construção de obras destacadas da costa (por exemplo, Olinda e Pau Amarelo (PE)) Em qualquer caso de proteção costeira, é preciso identificar: a ação dinâmica das ondas, sua sazonalidade, as variações do nível do mar, as características granulométricas da praia e áreas submersas adjacentes, a morfologia da plataforma continental interna adjacente (que determina o padrão de refração e difração das ondas), e as condições de projeto estrutural.

Outra classe de obras costeiras são as de abrigo portuário, como molhes e quebra-mares (por exemplo, Mucuripe e Pecém (CE), Recife (PE), Ilhéus (BA), Portocel, Tubarão e Ubu (ES), Imbituba (SC), entre outros) ou de proteção da costa (como os quebra-mares construídos sobre os arrecifes ao norte de Olinda). A vulnerabilidade dessas obras consiste na ocorrência de ondas com alturas e períodos que excedam as condições de projeto, ou que, por falta de manutenção, venham a ser gradualmente fragilizadas, a ponto de serem danificadas por condições de mar mais brandas do que as de projeto.

Uma terceira classe de obras costeiras são os guia-correntes, estruturas construídas para fixação das embocaduras lagunares e fluviais, ou de canais artificiais, como é o caso dos “molhes” de Rio Grande (RS), de Laguna

(SC), do Rio Itajaí-Açu (SC), do Rio Paraíba do Sul (RJ), da Barra do Furado (RJ), do porto de Luís Correia em um dos braços do delta do Parnaíba (PI), entre outros, de menor dimensão. Construídas em blocos de enrocamento ou artificiais, essas estruturas são igualmente vulneráveis à ação das ondas e à subsidência geológica ao longo dos anos (por exemplo, Rio Grande e Foz do Rio Paraíba do Sul). Seu funcionamento hidráulico é influenciado pela vazão fluvial e pelas correntes de maré: ambas condições podem sofrer variações como resultado das mudanças climáticas, seja por alteração no regime hidrológico, seja pela mudança de aporte de sedimentos em resultado de mudanças da cobertura vegetal da bacia hidrográfica, ou seja ainda pela mudança no prisma de maré (volume d'água que penetra o ambiente estuarino durante o ciclo de maré). Em alguns casos, como na barra do Furado, a construção dos guia-correntes interrompeu o transporte litorâneo de sedimentos de sul para norte, provocando severa erosão da praia a sotamar das estruturas, em direção ao Cabo de São Tomé. Nestes casos, tais estruturas possuem um efeito secundário de fragilizar a praia adjacente, tornando o local mais vulnerável às mudanças climáticas. A solução é a transposição, por meios artificiais, dos sedimentos que foram retidos, de modo a garantir a continuidade do transporte litorâneo, embora este tipo de obra nunca tenha sido realizada no Brasil até o momento.

A quarta classe de obras seriam as estruturas portuárias de acostagem, como cais, *piers*, *dolphins* etc., as pontes de acesso a terminais (por exemplo, Pecém (CE), Terminal Inácio Barbosa (SE), Terminal Salgema (AL)), os *piers* oceânicos com fins turísticos (Tramandaí (RS)), as ilhas artificiais (por exemplo, terminal de Areia Branca (RN)) e as plataformas fixas para exploração de petróleo. A cota de coroamento dessas estruturas é determinada em função da estimativa de maré, da sobrelevação de nível médio do mar e da ocorrência de ondas, o que determina também sua vulnerabilidade a mudanças climáticas marinhas. A ocorrência simultânea de maré meteorológica associada a ondas pode resultar no galgamento da estrutura pelas ondas e na produção de esforços adicionais que prejudiquem tanto a estabilidade estrutural quanto a sua funcionalidade.

Os emissários submarinos são outro tipo de obras cujo dimensionamento estrutural e funcional dependem das condições do nível do mar, da agitação marinha, das condições geotécnicas e da estratificação do oceano na região do lançamento dos efluentes. As ondas podem provocar esforços estruturais que levem à ruptura da tubulação por fadiga, como

ocorreu no emissário de Ipanema (RJ). Nesta categoria, devem ser incluídos também os oleodutos e gasodutos que atravessam (soterrados) as praias (por exemplo, Guamaré (RN), Cabiúnas e Barra do Furado (RJ)). Como resultado de mudanças do regime de ondas, a praia pode se acomodar a uma posição diferente e, em consequência, expor os dutos à ação das ondas na zona de arrebenção ou das correntes de maré, o que em geral não é considerado no projeto.

Muitas vezes, pela idade da obra, os dados ambientais (regime de ondas, nível do mar, dados geomorfológicos, correntes) que foram utilizados para projeto não são mais disponíveis. Isto torna a avaliação de vulnerabilidade das praias e estruturas costeiras um enigma. Mais sério, porém, é que aquelas informações ambientais não são tampouco monitoradas regularmente. Na hipótese de acontecer algum dano estrutural em consequência de uma ressaca, coloca-se em questão se as condições ocorridas foram excepcionais ou se houve degradação da estrutura. Esta é uma questão relevante para as seguradoras, o que se tornará inevitavelmente mais freqüente no Brasil face a um cenário de mudanças climáticas. Deixar de monitorar o ambiente marinho poderá representar, assim, um custo certamente maior que o próprio programa de monitoramento, considerado hoje demasiadamente caro pelo Estado ou pelos empreendedores. Nesta categoria, deve-se também considerar a necessidade de atualização da cartografia náutica (Exman, 2008), como condição para a realização de vários estudos de engenharia costeira, e a compatibilização cartográfica (datum vertical e horizontal) entre os mapas do IBGE e as cartas náuticas (DHN) com vista à construção de um Modelo Digital de Terreno (MDT) para a zona costeira.

4. EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

De forma generalizada ocorre erosão ao longo de todo o litoral, um fenômeno que se intensificará na ocorrência de uma elevação do nível do mar, de aumento de freqüência ou intensidade de tempestades e de mudanças no clima de ondas. Áreas mais significativamente comprometidas estão em geral restritas a segmentos bem definidos e muitas vezes resultam da intervenção humana no balanço de sedimentos após a construção de estruturas rígidas, que teriam como finalidade proteger a própria costa ou instalações portuárias. Tais construções geralmente desencadearam ou intensificaram o processo erosivo resultando na construção de novas

estruturas de retenção ou proteção como espigões e muros. Os exemplos mais críticos destas intervenções são encontrados na orla das Regiões Metropolitanas de Fortaleza – a oeste de Mucuripe – e de Recife – a norte de Olinda (Figuras 14 e 15).

Figura 14. Espigões em Olinda



Foto: C.F. Neves, novembro de 1995

Figura 15: Erosão de praia ao Norte de Olinda



Foto: C.F. Neves, novembro de 1995

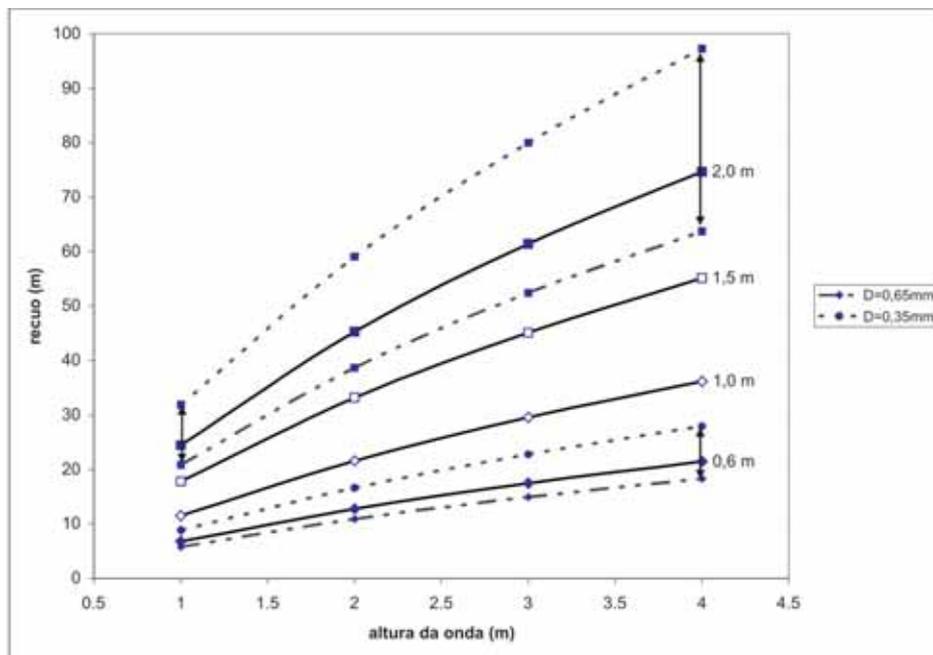
Outros exemplos de segmentos críticos localizam-se na vizinhança de desembocaduras fluviais (por exemplo, Rios São Francisco, Paraíba do Sul, Itapemirim, Jequitinhonha), em parte como resultado da própria morfodinâmica, mas também como resultado de modificações naturais ou induzidas pelo homem no regime de vazão fluvial e na variação do aporte de sedimentos (por exemplo, COSTA, 1995). Essa foi a explicação para os processos erosivos da costa da Califórnia nas décadas de 1950 e 1960, que começam a ser percebidos ao longo da costa brasileira a partir da década de 1990.

Problemas de “avanço do mar” em praias oceânicas sempre surgem, e tenderão a se intensificar, devido à localização de construções que freqüentemente interceptam o perfil de tempestade, dentro do que se convencionou chamar de “parte emersa do perfil dinâmico da praia”. De fato, para uma praia em equilíbrio, seu perfil varia entre condições de máximo recuo, decorrente de ressacas ou ondas de tempestade, e de máximo avanço, quando as ondas de bom tempo alimentam de areia o perfil da praia. O posicionamento de arruamentos e benfeitorias muitas vezes não considera as condições extremas do “perfil de tempestade”, e as construções são planejadas em posição demasiadamente avançada em direção ao mar, tomando como referência o “perfil de bom tempo”. O problema já foi devidamente reconhecido e normas foram elaboradas fixando a largura de uma faixa de não edificação. O gráfico da Figura 16 indica a ordem de magnitude do recuo da linha de costa para diferentes condições de nível do mar e de altura de onda. Entretanto, as normas nem sempre são respeitadas, além de ser difícil remover as construções já existentes. Em muitos países, com tradição mais longa em engenharia costeira, tais procedimentos normativos são severamente fiscalizados e respeitados, inclusive estabelecem-se prêmios diferenciados de seguro contra danos causados pelas inundações de furacões, em função da distância à linha de base.

A ausência de monitoramentos de longo termo da mobilidade da linha de costa, do clima de ondas e do nível do mar torna difícil a distinção entre eventos e tendências. Classificações contraditórias, entre risco elevado e moderado, para o mesmo segmento costeiro, são típicas de interpretações sem apoio em informações mais amplas e confiáveis.

Considerando que, no conjunto, a linha de costa não se apresenta submetida a riscos iminentes de grande amplitude, há, no entanto, aspectos

Figura 16. Estimativa do recuo da linha de praia para três tamanhos de grãos (diâmetro mediano 0,35, 0,50 e 0,65mm) e diferentes valores de elevação do nível do mar (0,6 a 2,0m) em função das alturas de onda. As linhas cheias correspondem a diâmetro mediano igual a 0,50mm



a serem levados em conta. Grandes áreas, especialmente na Região Nordeste, apresentam déficit sedimentar devido à transferência de sedimentos do estirâncio⁸ para o campo de dunas, por ação eólica. Cordões litorâneos ao longo das Regiões Sudeste e Sul recuaram durante as oscilações transgressivas do Holoceno e apresentam atualmente características transgressivas com transposição de ondas e erosão localizada. A declividade da antepraia e plataforma continental interna nas Regiões Norte e Nordeste é muito baixa resultando em amplos recuos da linha de costa no caso de uma elevação do nível do mar (MUEHE, 2001 e 2003). Neste cenário, a exposição de recifes de arenito de praia defronte a longos trechos do litoral do Nordeste paradoxalmente reduz a proteção que essas formações fornecem à praia: em decorrência do aumento da profundidade da água, aumenta a altura das ondas que atingem a face da praia, levando a um reajuste do perfil da praia.

⁸ Região da face da praia que fica exposta em maré baixa e submersa em maré alta, e é varrida intermitentemente pelas ondas.

As falésias sedimentares das Regiões Norte, Nordeste e parte do Sudeste representam uma certa proteção à erosão pois, apesar do aumento da taxa de retrogradação em adaptação a um nível do mar mais elevado, esta taxa continuará a ser muito lenta já que parte do déficit sedimentar é coberto pela incorporação dos sedimentos ao perfil da antepraia, liberados pelo processo erosivo. No entanto, os episódios de desmoronamento, quando ocorrem, se dão de mo abrupto.

Tendências recentes sobre variações do nível do mar para diferentes locais ao longo do litoral brasileiro não são conhecidas. Um registro de 42 anos de duração para o porto de Recife indicou, para o período de 1946 a 1988, uma elevação de 5,6 mm/ano (HARARI e CAMARGO, 1994 *in* NEVES e MUEHE, 1995). Para a estação maregráfica da Ilha Fiscal, a análise de um registro do período de 1965 a 1986 indicou forte elevação de 12,6 mm/ano (SILVA, 1992), embora análises subseqüentes de dados mais recentes feitas pelo mesmo autor mostraram uma tendência de declínio. Uma elevação do nível do mar, a partir do início da década de 1970, foi também relatada para o litoral de São Paulo (Cananéia) por Mesquita e Harari (1983 *in* MUEHE e NEVES, 1995). Essas medições, para serem utilizáveis em estudos prospectivos de impactos de mudanças climáticas, necessitam ser referenciadas geodesicamente.

Outra variável a ser considerada é a mudança dos ventos e suas conseqüências sobre o oceano. Registros de altura de ondas são raros e descontínuos. Somente em anos mais recentes vem sendo instalada uma rede de medição. Um aumento na intensidade das tempestades foi inferido por Neves Filho (1992) a partir da constatação de um aumento nos desvios entre a altura das marés previstas e valores medidos de nível do mar na Ilha Fiscal, interior da Baía de Guanabara, e Cananéia, São Paulo, no período de 1965 e 1986. Isto poderia explicar a erosão nos cordões litorâneos do litoral do Rio de Janeiro, mas seria desejável um estudo comparativo do avanço de frentes frias e de ciclones extra-tropicais no Atlântico Sul. Não se pode esquecer, porém, que tais sistemas meteorológicos produzem ondas e, dependendo de sua localização e movimentação sobre o oceano, resultam em diferentes padrões de ondulação a atingir a costa. Portanto, mudanças climáticas meteorológicas causam mudanças de clima de ondas, que por sua vez provocarão mudanças na forma e posição das praias. Este nível de detalhe ainda não foi possível inferir a partir dos modelos numéricos do IPCC, nem

a partir das escassas e intermitentes medições de ondas ao longo da costa brasileira.

Concluindo, apesar de algumas interpretações contraditórias para a atual mobilidade da linha de costa, assim como a dificuldade de identificar tendências confiáveis para o clima de ondas e elevação do nível do mar, uma fragilidade potencial da linha de costa pode ser identificada. Desse modo, a única maneira de reduzir futuros problemas devido à erosão costeira, é a firme implementação de programas de gerenciamento costeiro em todos os municípios litorâneos de forma a conduzir e controlar a urbanização, estabelecer zonas de não edificação juntamente com o monitoramento de segmentos costeiros assim como a expansão e manutenção de redes para medições contínuas e de longa duração de marés e ondas. Caberá aos Estados, implementar programas de monitoramento de ondas, de nível do mar e parâmetros meteorológico-marinhos, e finalmente, em cooperação com a União, sistemas de controle geodésico da costa e dos recursos hídricos, com especial destaque para medições hidro-sedimentológicas nos estuários.

5. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

As respostas aos impactos na zona costeira em consequência de mudanças climáticas, excluindo aqueles que seriam comuns às áreas continentais (agricultura, clima etc.) são discutidos neste Capítulo. Foram considerados os seguintes impactos:

- erosão e progradação costeira;
- danos a obras de proteção costeira;
- prejuízos estruturais ou operacionais a portos e terminais;
- danos a obras de urbanização de cidades litorâneas;
- danos estruturais ou prejuízos operacionais a obras de saneamento;
- exposição de dutos enterrados ou danos estruturais a dutos expostos;
- intrusão salina em estuários;
- intrusão salina em aquíferos;
- evolução dos manguezais;
- danos a recifes de coral.

Coloca-se o desafio de escolher entre possíveis respostas, seja no sentido de antecipar os danos e tomar medidas de proteção necessárias, seja no sentido de abandonar a estrutura e se acomodar a uma nova situação. Utiliza-se a nomenclatura do IPCC (1994) que classifica as respostas como “recuo”, “acomodação” e “proteção”.

5.1 EROSIÃO E PROGRADAÇÃO

Ao se considerar as mudanças climáticas e seus impactos sobre a zona costeira, deve-se ampliar bastante o horizonte dos fenômenos considerados, como foi visto na seção 2. As imagens de destruição causada pelo mar em decorrência da erosão são auto-explicativas da força do ambiente e dos problemas sociais e econômicos que o acompanham. Menos divulgados, porém, são os problemas de deposição indesejada de sedimentos em portos, marinas e praias, cujos impactos econômicos são invisíveis à população mas que trazem igualmente custos à sociedade na forma de obras de dragagem ou perdas de ecossistemas naturais.

No caso de erosão, a Tabela 2 apresenta algumas possíveis medidas de mitigação, resumindo os impactos esperados. Para todas elas, porém, é necessário conhecer o clima de ondas, as variações do nível do mar (maré astronômica e meteorológica) e as características granulométricas da praia a ser protegida.

No caso de progradação, é necessário avaliar os benefícios da ocupação da praia acrescida ou dos bancos de areia que se formam em baías, lagunas e estuários, bem como determinar se o fenômeno é transitório ou tendência permanente. Neste caso, o “recuo” significaria “nenhuma ação”, eventualmente comprometendo a sobrevivência de ecossistemas complexos (manguezais, brejos salinos, lagunas), com efeitos sobre a cadeia trófica. A ocupação de praias e o avanço da urbanização sobre as novas áreas conquistadas ao mar seria um exemplo de “adaptação”, mas correria o risco de, se fosse transitória a progradação, em outros cenários de nível relativo do mar ou de clima de ondas, o litoral retornasse a situações anteriores, destruindo a ocupação mais recente. Esses ciclos podem levar algumas décadas, enquanto que a ocupação ou urbanização produz-se em alguns (poucos) anos. Este é o caso dos pontais próximos a embocaduras fluviais. A resposta de “proteção” seria aquela que procuraria manter o sistema na situação presente, ou seja, seriam necessárias obras de dragagem. Neste caso,

onde seria despejado o material? Por si só isto já constitui um problema ambiental de importante magnitude.

Tabela 2. Respostas possíveis à erosão costeira

	Tipo	Custo	Impacto
Recuo	Abandono das casas e benfeitorias	nulo	• deterioração urbana
Acomodação	Reconstrução periódica das benfeitorias	baixo, permanente	• deterioração urbana
Proteção	Engordamento de praias	moderado	• benéfico ao aproveitamento turístico • benéfico para alguns organismos marinhos • identificação de área de empréstimo
	Fixação da costa com enrocamento	moderado	• impacto visual muito negativo • dificuldade de acesso para banhistas • acúmulo de lixo favorece crescimento de insetos e ratos
	Construção de muros de proteção	moderado a alto	• impacto visual controlável • facilidade de acesso para banhistas
	Construção de quebra-mares ou estruturas no mar	alto	• impacto paisagístico controlável • qualidade e circulação da água a ser monitorada

5.2 DANOS A OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA

As obras de proteção costeira podem se classificar em função de seu posicionamento relativo à linha de costa (aderentes ou destacadas, paralelas ou perpendiculares), ou em função de seu funcionamento estrutural (rígidas ou flexíveis), ou ainda em função do material utilizado. Os parâmetros de dimensionamento de uma obra de proteção são: a faixa de variação do nível do mar (maré astronômica e meteorológica); da altura, do período e do ângulo de incidência da onda na arrebentação; da granulometria dos sedimentos; e da batimetria local.

Tomando como exemplo os quebra-mares construídos sobre os arrecifes ao norte de Olinda, elas são obras destacadas da costa e a eficiência

da proteção consiste exatamente na capacidade de impedir que as ondas ultrapassem as estruturas. Já em Fortaleza, utilizaram-se estruturas perpendiculares à costa (espigões), entre as quais foi efetuado o preenchimento com areia.

Num cenário de mudanças climáticas, outros fatores devem ser considerados, tais como a variação transiente do nível médio do mar (maré meteorológica) e as propriedades das ondas. Considerando que a existência de uma obra de proteção costeira pressupõe alguma utilização da orla, a resposta adequada seria a reconstrução (ou “proteção”), adaptando-a às novas condições oceanográficas e meteorológicas. Eventualmente, deveria ser efetuado estudo econômico para substituir a forma de proteção ou mesmo a remoção de obras que perderam sua funcionalidade. Por exemplo, em Miami Beach (EUA), o U.S. Army Corps of Engineers optou por um engordamento artificial, desta forma “soterrando” as estruturas rígidas (muros, espigões) existentes inicialmente para proteção das propriedades privadas (hotéis e residências). A nova praia que foi criada passou então a ser de uso público, enquanto que a praia original era de uso privativo dos proprietários do terreno fronteiro ao mar.

Um tipo importante de obras costeiras são os guia-correntes, estruturas construídas para fixação das embocaduras, lagunares e fluviais, ou de canais artificiais. Como em todas as demais obras costeiras, recomenda-se a “proteção” da obra, no sentido de manter o funcionamento hidráulico, sem deixar de monitorar o impacto nas praias adjacentes. Obras futuras, porém, necessitam ser cuidadosamente projetadas, levando em conta os regimes hídricos, de agitação marítima e de transporte de sedimentos, tanto presentes, quanto esperados em cenários de mudanças climáticas.

Em alguns casos, como na Barra do Furado (RJ), a construção dos guia-correntes interrompeu o transporte litorâneo de sedimentos de sul para norte, provocando severa erosão da praia a sotamar das estruturas, em direção ao Cabo de São Tomé, numa extensão de 10 km (Figura 17). Nesses casos, tais estruturas possuem um efeito secundário de fragilizar a praia adjacente, tornando o local mais vulnerável às mudanças climáticas. A solução é a transposição, por meios artificiais, dos sedimentos que foram retidos, de modo a garantir a continuidade do transporte litorâneo, embora este tipo de obra nunca tenha sido realizada no Brasil até o momento.

Figura 17. Barra do Furado



Fotos cedidas por Dieter Muehe e Enise Valentini

5.3 PREJUÍZOS ESTRUTURAIS OU OPERACIONAIS A PORTOS E TERMINAIS

As obras de abrigo portuário, por definição, têm por objetivo criar artificialmente uma região protegida das ondas de modo a garantir segurança às operações portuárias e às manobras dos navios. Elas podem ser enraizadas na linha de costa (molhes) ou destacadas da costa (quebra-mares); seguem-se exemplos de portos brasileiros localizados em mar aberto: Luís Correa (PI), Mucuripe e Pecém (CE), Recife e Suape (PE), Terminal Inácio Barbosa (SE), Ilhéus e Cumuruxatiba (BA), Portocel, Praia Mole, Tubarão e Ubu (ES), Barra do Açu (em construção), Imbetiba e Forno (RJ), Imbituba (SC). Nesse caso, pelos investimentos já realizados, a opção é a de “proteção” e duas ações se fazem possíveis: reforçar as estruturas com blocos maiores (enrocamento ou artificiais), elevar a cota de coroamento para evitar galgamento pelas ondas ou alterar a concepção do projeto utilizando, por exemplo, o modelo “quebra-mar de berma”, com blocos de menores dimensões e que se ajustam ao clima de ondas. Em alguns casos pode ser admissível o galgamento (ou seja, a transposição das ondas sobre a estrutura), sem prejuízo da operação portuária.

As estruturas portuárias de acostagem, como cais, piers, dolphins etc., também são afetadas pelo nível do mar, uma vez que, no interior do recinto portuário, espera-se que não exista onda. No Brasil, o porto de Suape é o único exemplo de porto que considerou, em seu projeto de expansão do cais e pátios no início da década de 1990, uma sobrelevação de 25 cm do nível relativo médio do mar. A adaptação das estruturas portuárias de acostagem para novas condições de nível do mar poderá ser obra de grande custo e a “acomodação” consistirá na redução das horas de operação de acordo com

as condições oceanográficas, o que representa custos. No caso das plataformas turísticas ou piers, a experiência tem mostrado que eles são abandonados, progressivamente destruídos pelo mar, trazendo riscos aos banhistas. No caso das ilhas artificiais e das plataformas fixas de petróleo, outros fatores econômicos entram em jogo, inclusive a vida útil das obras e a necessidade de “descomissionamento” (ou desmontagem) no caso de encerramento de atividades, de acordo com a legislação ambiental.

Mudanças meteorológicas (ocorrência de tornados, ou ventos mais fortes, mudanças na climatologia de ventos) teriam efeitos sobre as estruturas de manuseio de cargas e sobre as pilhas de acostagem. Neste caso, eventuais reforços estruturais ou mudanças de arranjo portuário não seriam obras vultosas; forças de vento sobre os navios atracados deveriam ser reavaliadas. O problema mais sério seria o posicionamento em planta do canal de acesso e da bacia de evolução, que depende da direção de incidência das ondas e dos ventos.

Quanto a variações do nível médio do mar e do grau de agitação marítima, merece investigação mais aprofundada a ação físico-química da água do mar sobre as estruturas de concreto, especialmente na região exposta intermitentemente à água do mar, respingos e ar. Entre as variáveis a serem incluídas no monitoramento, as propriedades químicas da água do mar, especialmente a presença de sulfatos, e a resposta do concreto a longo prazo são exemplos a se considerar como efeitos das mudanças climáticas.

5.4 DANOS A OBRAS DE URBANIZAÇÃO DE CIDADES LITORÂNEAS

As regiões costeiras urbanas, especialmente nas capitais dos Estados, foram densamente ocupadas e transformadas, a tal ponto que é difícil reconhecer as feições originais. A cidade do Rio de Janeiro é um exemplo interessante: praticamente toda a orla da baía de Guanabara foi aterrada; a praia de Copacabana é o maior engordamento artificial de praia já realizado no Brasil; as praias de Ipanema e Leblon também receberam alimentação artificial de areia além de terem sido urbanizadas na década de 1950 (com a construção de um muro e aterro para pistas de rolamento); ao longo dos 20 km de extensão da praia da Barra da Tijuca foi construída uma avenida litorânea sobre o cordão de dunas, que poderá ser ameaçada em episódios de ressaca e de elevação transiente do nível do mar, como já ocorre com a urbanização da praia da Macumba e no Pontal de Sernambetiba; ao longo da

orla da baía de Sepetiba as praias possuem muros, altamente refletivos para as pequenas ondas incidentes, com risco de solapamento e colapso; ainda na baixada de Sepetiba, localizam-se as áreas mais extensas com risco de inundação em caso de elevação do nível do mar, embora haja outras áreas na baixada de Jacarepaguá e próximo aos rios Pavuna e Meriti em igual nível de risco (MUEHE e NEVES, 2007).

A idéia prevalente de urbanização da orla em várias cidades costeiras no Brasil é a construção de uma avenida litorânea e de um parque (fins de lazer e contemplativos), que têm o propósito indiscutível de conter a expansão urbana em direção ao mar e garantir o acesso público à praia. Este estilo de ocupação da orla é vista por exemplo, em Balneário Camboriú, Santos, Rio de Janeiro, Vitória e Recife.

Como resultado da elevação de origem meteorológica e transitória do nível do mar, das ressacas ou da diminuição do aporte de sedimentos, ocorrem mudanças no perfil da praia, eventualmente afetando as estruturas e beneficiamentos urbanos costeiros. As prefeituras têm optado, na maioria das vezes, pela construção de obras rígidas de fixação (muros ou enrocamento), que freqüentemente dificultam o acesso dos banhistas à praia e diminui o valor paisagístico da região (por exemplo, Boa Viagem e Candeias (PE), Marataízes (ES), Matinhos (PR)). A alimentação artificial da praia (por exemplo, Copacabana (RJ), Camburi (ES), Camboriú (SC)) é uma solução mais atraente, tanto urbanisticamente quanto tecnicamente em termos de engenharia costeira, mas tem sido relativamente pouco usada.

Em qualquer caso de proteção costeira, é preciso identificar: a ação dinâmica das ondas, sua sazonalidade, as variações do nível do mar, as características granulométricas da praia e áreas submersas adjacentes, a morfologia da plataforma continental interna adjacente (que determina o padrão de refração e difração das ondas), e as condições de projeto estrutural.

5.5 DANOS ESTRUTURAIS OU PREJUÍZOS OPERACIONAIS A OBRAS DE SANEAMENTO

Os emissários submarinos são dimensionados para levar, por gravidade, os esgotos domésticos para uma distância suficientemente afastada da costa. Caso eles não sejam enterrados, podem ficar sujeitos a esforços induzidos por ondas e correntes, à semelhança dos dutos para exploração de petróleo (item 5.6). Neste caso a resposta é o monitoramento estrutural permanente.

Outro aspecto, mais difícil de ser tratado, diz respeito às cotas do sistema de bombeamento ou de lançamento. No caso de elevação do nível do mar (maré meteorológica) pode ocorrer o afogamento do sistema, prejudicando o lançamento. A questão das propriedades físicas (temperatura, estratificação) da água do mar no ponto de lançamento, ou ainda das condições de insolação, constitui um problema que merece ser cuidado com muita atenção. Futuros emissários devem considerar a construção de estações de tratamento prévio antes do lançamento, considerando os elevados custos da extensão de um emissário em funcionamento.

5.6 EXPOSIÇÃO DE DUTOS ENTERRADOS OU DANOS ESTRUTURAIS A DUTOS EXPOSTOS

A exploração de petróleo e gás na plataforma continental exigiu a construção de dutos ligando os campos ao largo a instalações em terra. Em áreas mais profundas ou em baías, em geral essas estruturas repousam no fundo do mar e são expostas a correntes fracas. Problemas ocorrem se as correntes, induzidas por marés ou por ondas, tornam-se mais fortes, produzem vibrações ou transportam sedimentos que se acumulam junto à tubulação produzindo esforços adicionais. O segmento mais crítico, porém, é a travessia da zona de arrebenção no caso de dutos construídos em praias oceânicas expostas. Variações do perfil de praia em eventos de tempestade podem expor a tubulação à ação direta das ondas, deixá-la sem apoio estrutural ou colocá-la em vibração, eventualmente próximo de ressonância. Condições próximas de acidentes ocorreram em praias (por exemplo, Guamaré (RN), Cabiúnas e Barra do Furado (RJ)) e acidentes por fadiga chegaram a ocorrer na baía de Guanabara, em condições abrigadas de ondas mas sujeita a correntes de maré. O monitoramento permanente é a resposta recomendada no caso de mudanças climáticas, embora a previsão de cenários acoplada a modelos de comportamento estrutural seja possível. No cenário até 2100, deve-se porém considerar a outra possibilidade de esgotamento da vida útil da tubulação ou dos campos de petróleo, e neste caso a legislação ambiental prevê a retirada da estrutura. Portanto, uma outra resposta admissível seja a construção de uma nova tubulação e a retirada da antiga.

5.7 INTRUSÃO SALINA EM ESTUÁRIOS

O controle da intrusão salina ou da inundação de áreas costeiras é feito através de barragens e comportas, que são acionadas em resposta à

previsão de elevação do nível médio do mar (por exemplo, rio Tâmis, na Inglaterra, e Projeto Delta, na Holanda). São obras de grande vulto, cuja justificativa se fundamenta no valor do patrimônio a ser preservado. De fato, no mar do norte, os eventos de maré meteorológica podem provocar sobrelevação de 3 m no nível relativo médio do mar. No Brasil ainda não foram registrados eventos de tal magnitude.

Um levantamento detalhado dos aproveitamentos dos recursos hídricos em todos os ambientes estuarinos deveria ser iniciado, a partir dos rios federais, caracterizando-se as vazões fluviais (a montante), o nível do mar (a jusante) e o mapeamento das áreas inundáveis (prisma de maré). No caso das tomadas d'água para abastecimento e irrigação, poderiam ser construídas barragens localizadas (“proteção”) ou poderiam ser estabelecidos procedimentos de operação das bombas em função da vazão fluvial, do nível médio do mar e da propagação da maré (“acomodação”). No caso dos viveiros de carcinicultura e outras formas de aquíicultura, possivelmente as únicas respostas cabíveis seriam a adaptação da cota de coroamento dos diques e os cuidados ambientais nos momentos de despesca (“acomodação”).

5.8 INTRUSÃO SALINA EM AQUÍFEROS

Uma vez que ocorra a intrusão salina nos poços de captação, não existe outra medida a não ser o abandono do poço (“recuo”). O estabelecimento de procedimentos e quotas de captação de água insere-se no contexto mais amplo do gerenciamento integrado dos recursos hídricos e zona costeira.

5.9 EVOLUÇÃO DOS MANGUEZAIS

Enquanto que, no mundo, a área de manguezais foi reduzida em aproximadamente 20% no período entre 1980 e 2005, a mesma tendência não se observou no Brasil, onde a redução foi de apenas 5%. A pressão da urbanização, utilização da área para fazendas de aquíicultura, mudanças no aporte de água doce e de sedimentos continentais, variações no prisma de maré, mudanças de temperatura são os principais agentes impactantes sobre os manguezais (FAO, 2007). Cenários futuros de aquecimento levariam a supor que os manguezais pudessem povoar outras áreas, hoje cobertas por vegetação de brejo salino (como as lagunas em Santa Catarina e Rio Grande do Sul). A elevação do nível do mar, em princípio, favoreceria a expansão

dos manguezais para áreas mais altas, o que freqüentemente é impedido pela presença de ocupação humana. Assim, respostas de “proteção” possivelmente implicariam em remanejamento populacional, o que representa um custo social muitíssimo elevado, especialmente para populações que retiram subsistência daquele ambiente. A redução de áreas de manguezais também traria impacto sobre as aves, inclusive as migratórias, assim como para a ictiofauna local. Possivelmente a opção de “recuo” seria a de ação nula e abandonar o manguezal à sua própria sorte; a opção de “acomodação” seria a conjugação entre aqüicultura e reflorestamento em outras áreas; finalmente, a opção de “proteção” seria a de permitir a expansão ou a manutenção da área florestada, garantindo o equilíbrio halino, hídrico, térmico e sedimentológico do ambiente estuarino.

5.10 DANOS A RECIFES DE CORAIS

A criação de parques marinhos é uma estratégia para preservação e conservação dos recifes de corais, embora há que se controlar o acesso de barcos a esses ecossistemas. O aumento da vigilância sobre a Zona Econômica Exclusiva e Mar Territorial poderá impedir a presença de navios e lançamentos de poluentes. No entanto, o conhecimento científico sobre os recifes encontra-se no estágio “observacional”, de estabelecer relações de causa e efeito aos agentes naturais externos, sobre os quais o homem tem pouco controle. A resposta no momento é o “recuo”, limitando-se a acompanhar a evolução dos recifes.

5.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Tabela 3 resume o tipo de ações de mitigação para os diversos impactos considerados nesta seção. Os sinais (?) na tabela indicam situações para as quais as ações de mitigação são incertas ou de eficácia questionável.

Tabela 3. Opções de mitigação

	Recuo	Acomodação	Proteção
erosão e progradação costeira	☒	☒	☒
obras de proteção costeira	☒		☒
estrutura ou operação de portos			☒
urbanização de cidades		☒	☒
obras de saneamento		☒	☒
duto de petróleo ou outros fins			☒
intrusão salina em estuários	?	☒	☒
intrusão salina em aquíferos	☒		
manguezais	☒	☒	?
recifes de coral	☒	?	?

6. POSSÍVEL PLANO DE AÇÃO

Muitas vezes, pela idade da obra, os dados ambientais (regime de ondas, nível do mar, correntes, dados geomorfológicos) que foram utilizados para projeto não são mais disponíveis. Aliado à falta de monitoramento regular das condições marinhas (ondas, nível do mar, ventos), a avaliação de vulnerabilidade das praias e estruturas costeiras torna-se um enigma. Na hipótese de acontecer algum dano estrutural em consequência de uma ressaca, coloca-se em questão se as condições ocorridas foram excepcionais ou se houve degradação da estrutura. Essa é uma situação que se tornará inevitavelmente mais freqüente no Brasil face a um cenário de mudanças climáticas e uma questão relevante para as seguradoras. Deixar de monitorar o ambiente marinho poderá representar, assim, um custo certamente maior que o próprio programa de monitoramento, considerado hoje demasiadamente caro pelo Estado ou pelos empreendedores. Nesta categoria, deve-se também considerar a necessidade de atualização da cartografia náutica (EXMAN, 2008), como condição para a realização de vários estudos de engenharia costeira, e a compatibilização cartográfica (datum vertical e horizontal) entre os mapas terrestres (IBGE) e as cartas náuticas (DHN). Essa é a condição necessária em vistas a implantar um Modelo Digital de Terreno (MDT) para a zona costeira, ferramenta que se tornará indispensável em futuro próximo.

A Agência Federal Americana para Gestão de Emergências (Fema, 2006) estabeleceu um protocolo de ações, visando dar subsídios às empresas seguradoras quanto à ocorrência de danos ambientais costeiros. As recomendações são as seguintes:

1. monitoramento do nível médio do mar por um período mínimo de 20 anos e aprimoramento dos métodos estatísticos de previsão de extremos e estabelecimento de tendências;
2. avaliação do comportamento, estrutural e funcional, das obras costeiras, de modo a garantir proteção contra 99% das inundações anuais (nível de risco igual a 1%) e estabelecimento de normas para remoção das estruturas destruídas por eventos naturais;
3. desenvolvimento de métodos computacionais, experimentais em laboratório e observacionais para caracterizar a transformação das ondas de tempestade desde o oceano até a costa;
4. caracterização da forma das praias (perfil e em planta) antes e depois das tempestades (combinação de ondas severas e maré meteorológica) a partir de monitoramento topográfico e batimétrico permanente;
5. estabelecimento de modelos para cálculo de espriamento das ondas (*run up*) baseado nas características das ondas e nível do mar com nível de risco de excedência igual a 2% (anteriormente calculava-se com valores medianos, ou seja, excedência igual a 50%);
6. determinação da influência das ondas na formação do nível médio do mar (*wave set up*), especialmente quando associado a maré meteorológica;
7. aprimoramento dos métodos, numéricos e experimentais, para cálculo do galgamento das estruturas (*wave overtopping*) pelas ondas;
8. aperfeiçoamento dos métodos de previsão de ondas a partir de modelos de circulação atmosférica;
9. mapeamento das zonas de risco de erosão, assoreamento, inundação costeira e ação das ondas e das correntes;
10. mapeamento da evolução das dunas frontais, como formas naturais de conter a ação do mar.

Este conjunto de ações está muito distante de ser factível no Brasil e deve servir de alerta aos diversos órgãos governamentais no âmbito da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM).

Para o planejamento de qualquer ação futura, em primeiro lugar é imperativo que se estabeleça um programa de monitoramento ambiental de longo prazo, envolvendo parâmetros meteorológicos, oceanográficos, geodésicos e geomorfológicos. Tal programa pode ser conduzido de modo eficiente através de redes regionais, que envolvam tanto universidades quanto as empresas e os segmentos da sociedade que são beneficiados diretamente pelas medições. Estabelece-se assim uma cadeia de agentes e eventos: o usuário da informação participa diretamente da coleta, novas metodologias são investigadas, a inovação tecnológica é incentivada e a formação continuada de pessoas está assegurada.

Em segundo lugar deve-se reconhecer o papel dos municípios na ordenação do seu espaço territorial. Talvez visando apenas o recolhimento de taxas municipais ou o embelezamento da orla do município, é permitida a ocupação de áreas frágeis, ou morfologicamente instáveis, sem critérios básicos de engenharia costeira; enquanto estas obras são pagas com recursos municipais, as obras de proteção e de recuperação, mais vultosas, são pagas com recursos estaduais ou federais (por exemplo, obras de “engordamento” de praias em várias cidades litorâneas de porte médio ou grande). As ações do Programa de Gerenciamento Costeiro, em nível federal, dirigem-se necessariamente ao nível estadual, o que muitas vezes mostrou-se incapaz de atingir o nível municipal, como pode ser atestado por vários casos de erosão costeira, de destruição de ecossistemas e de ocupação desordenada da orla.

Isto remete a um terceiro nível de ações, onde o Estado deve incentivar não apenas a preservação ambiental através da criação de reservas ou parques, mas principalmente através da educação no seu sentido mais amplo, em vários níveis, inclusive a educação continuada de técnicos de nível superior. Manter um registro de atividades econômicas na zona costeira não é difícil; a novidade seria ter um registro das condições de projeto ou de operação dessas atividades (por exemplo, Banco de Documentos e de Dados e Informações Costeiras), de modo que, através do monitoramento ambiental permanente, se pudesse planejar antecipadamente as medidas necessárias para preservar, deslocar ou proteger as atividades em pauta.

Em âmbito federal há várias questões legais a serem resolvidas, as mais urgentes sendo a superposição de jurisdições e a incapacidade de colocar em prática as leis vigentes. Um exemplo característico é a legislação que estabelece os terrenos de marinha, cadastrados no Serviço de Patrimônio da União. Estes terrenos não estão demarcados em toda a faixa costeira e são definidos a partir da linha de preamar de 1831. Ora, como estabelecer a posição desta “linha” se, ainda hoje, cerca de 40% da costa brasileira é parcamente povoada? Este é o exemplo de uma legislação que carece de meios de ser implementada e, por falta de atualização, deixa-se de promover o benefício maior que é o de garantir o acesso público e o domínio da União sobre uma faixa de território a ser protegida.

Ações de coordenação entre as diversas esferas seriam desejáveis. Isto exigiria maior descentralização das ações municipais (por exemplo, através de agências ou secretarias de meio ambiente ou de gerenciamento costeiro), maior capacitação técnica nos órgãos ambientais para lidar com assuntos costeiros, um protocolo de comunicação mais ágil entre os atores interessados em aproveitamentos ou na preservação em regiões costeiras e continuidade de ações ao longo do tempo. Estabelecimento de verbas, orçamentárias ou oriundas de Fundos Setoriais, para programas de monitoramento ambiental, para construção e manutenção de bancos de dados e para educação em diversos níveis. Deveria ser analisada a experiência de programas educacionais de outros países com extensão territorial e de interesses marinhos semelhantes ao Brasil.

A comunicação entre programas de gestão de recursos hídricos (comitês de bacias hidrográficas) e os de gerenciamento costeiro, o que se entende como Gerenciamento Costeiro Integrado, deve ser estimulada. A participação dos municípios estuarinos nos comitês de bacias em geral é minoritária e, muitas vezes, desproporcional à importância que a região costeira representa para a bacia como um todo. Não se pode esquecer, também, que o estuário é um ambiente integrador de todas as ações que são tomadas na bacia hidrográfica e, portanto, um ambiente mais vulnerável.

Em quinto lugar coloca-se uma questão ética, técnica e financeira. Seria lícito investir verbas públicas, federais ou estaduais, em regiões que reconhecidamente sofrem processo progressivo de erosão? Isto evidentemente depende daquilo que se deseja preservar. Porém, em áreas ainda desabitadas, deveria ser desencorajada a ocupação territorial ou, pelo

menos, ordenada a partir de estabelecimentos de faixas de proteção costeira. Qualquer obra ou intervenção deveria ser projetada por corpo técnico formado especificamente em engenharia costeira, os estudos de impactos ambientais deveriam necessariamente incluir a vulnerabilidade da obra a mudanças climáticas de acordo com cenários estabelecidos regionalmente (por exemplo, pelos Planos Nacionais de Gerenciamento Costeiro) e o financiamento da obra poderia ser condicionado à satisfação dessas exigências.

Finalmente, chega-se à questão das ações mitigadoras: isto dependerá de cada caso. Recuar, acomodar a uma nova situação ou proteger o patrimônio dependerá dos recursos financeiros disponíveis pela sociedade, da organização dos diversos agentes e dos valores (não apenas financeiros) envolvidos. O que se tem verificado atualmente nas grandes capitais é a solução de proteger a linha de costa, embora, no passado, no caso de Fortaleza e Olinda, preferiu-se abandonar as casas. Nas pequenas comunidades costeiras, dependendo da severidade da ação erosiva do mar, pouco resta a fazer a não ser abandonar as propriedades (por exemplo, Pontal de Atafona, Macaé, Conceição da Barra). Em ambientes estuarinos, a questão da intrusão salina pode ser remediada através da construção de diques e comportas (obras vultosas) ou através da acomodação, substituindo-se a agricultura por formas de aqüicultura.

A situação é bastante complexa e, lamentavelmente, ainda é tênue a “mentalidade marítima” por parte dos órgãos fomentadores de pesquisa, das instituições responsáveis pela formação de recursos humanos e dos condutores de políticas públicas, quando se trata da valorização do mar para o progresso do país (por exemplo, VIDIGAL, 2006). Neste cenário, o desconhecimento sobre o nosso litoral amplifica os problemas eventuais advindos de mudanças climáticas na zona costeira e torna o país vulnerável a agentes externos, sejam eles naturais ou econômicos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se falar de impactos das mudanças climáticas nas zonas costeiras, é imprescindível que seja considerada uma cadeia de agentes naturais bem mais ampla do que apenas a elevação termo-eustática do nível do mar. Diferentes ambientes geomorfológicos apresentam (e apresentarão) comportamentos diversos, o que exige a implantação de monitoramentos locais, distribuídos ao longo da costa brasileira.

Os impactos previstos na zona costeira em consequência de mudanças climáticas, excluindo aqueles que seriam comuns às áreas continentais (agricultura, clima etc.) são os seguintes:

- erosão e progradação costeira;
- danos a obras de proteção costeira;
- prejuízos estruturais ou operacionais a portos e terminais;
- danos a obras de urbanização de cidades litorâneas;
- danos estruturais ou prejuízos operacionais a obras de saneamento;
- exposição de dutos enterrados ou danos estruturais a dutos expostos;
- intrusão salina em estuários;
- intrusão salina em aquíferos;
- evolução dos manguezais;
- danos a recifes de coral.

Além desses efeitos, devem ser consideradas as mudanças climáticas associadas à interação oceano-atmosfera e suas consequências sobre as diversas formas de ocupação da zona costeira e da Zona Econômica Exclusiva, inclusive as atividades de exploração mineral na plataforma e talude continentais, e sobre as rotas de navegação no Atlântico Sul, em face do aumento dos riscos para as embarcações.

Os modelos utilizados atualmente para a previsão de cenários permitem a visão de grandes áreas e aplicam-se a uma grade planetária. Por este motivo, eles são inadequados para a previsão de fenômenos em uma faixa tão estreita como a zona costeira (ou seja, uma região representada no mapa como uma linha em vez de uma superfície). O avanço da modelagem poderá ser no sentido de refinar os modelos atuais, o que exigirá computadores cada vez mais robustos, ou, alternativamente, adotar novas estratégias numéricas que permitam o acoplamento dos modelos atuais a regiões lineares extensas.

Prever respostas e antecipar cenários para a zona costeira é uma situação bastante complexa e, lamentavelmente, ainda é tênue a

“mentalidade marítima” por parte dos órgãos fomentadores de pesquisa, das instituições responsáveis pela formação de recursos humanos e dos condutores de políticas públicas, quando se trata da valorização do mar para o progresso do país (por exemplo, VIDIGAL, 2006). Nesse cenário, o desconhecimento sobre o nosso litoral amplifica os problemas eventuais advindos de mudanças climáticas na zona costeira e tornará o país vulnerável a agentes externos, sejam eles naturais ou econômicos.

No momento, a resposta mais recomendável aos efeitos das mudanças climáticas é o estabelecimento de uma estratégia de ações (Gerenciamento Costeiro Integrado) que inclua:

- a condução de monitoramento ambiental permanente (longo prazo);
- a proposição de ordenamentos municipais para ocupação urbana;
- a efetivação de políticas estaduais de gerenciamento costeiro;
- o direcionamento de esforços da ação federal: legislação, educação, monitoramento e coordenação de ações;
- a identificação de fontes de recursos e financiamentos, sua aplicação e as formas de controle;
- o planejamento prévio e a priorização de estudos para as formas clássicas de respostas (recuo, acomodação e proteção).

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, F.; WASHINGTON, D. C. An analytical synoptic-dynamic study about the severe weather event over the city of Rio de Janeiro on January 2, 1987. In: NEVES, C. F.; MAGOON, O. *Coastline of Brazil*. New York: ASCE, 1989.

ALLISON, M. A. *Mechanisms of coastal progradation and muddy strata formation adjacent to the Amazon river*. 1993. Tese (Doutorado)- State University of New York, 1993.

BANDEIRA, J. V. A influência do transporte litorâneo em instalações e obras costeiras relacionadas com a produção de petróleo e gás no litoral do Estado do Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p. 335-344.

BARROS, F. M. L.; MUEHE, D.; ROSO, R. H. Erosão e danos na orla costeira do município de Maricá, RJ. In: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2., 2003, Recife. *Anais...* Recife: [s.n.], 2003. Cd-Rom.

BRAGARD, A. S.; NEVES, C. F. A influência da transmissão de ondas sobre as praias do Recife. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p. 427-432.

CALLIARI, L. J.; SPERANSKI N, S.; BOUKAREVA, I. I. Stable focus of wave rays as a reason of local erosion at the Southern Brazilian coast. *Journal of Coastal Research*, n. 26, p. 19-23, 1998. Special issue. Proceedings of the International Coastal Symposium, Florida.

CARUSO JR.; F.; AWDZIEJ, J. *Mapa geológico da ilha de Santa Catarina: escala 1:100.000.* [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, 1993.

CARVALHO, J. L. B. *Modelagem e análise do lançamento de efluentes através de emissários submarinos.* 2003. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2003.

CASTRO, B. M.; LEE, T. N. Wind-Forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, n. C8, p. 16.045-16.056, 1995.

CASTRO, C. B. Corals of southern Bahia. In: HETZEL, B.; CASTRO, C. B. (Ed.). *Corals of southern Bahia.* Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1994. p. 161-176.

COIMBRA, A. M. et al. Dispersão dos sedimentos de superfície de fundo na plataforma continental interna do Estado de São Paulo - Santos à Ilha Grande. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980. *Anais...* [S.l.: s.n.], 1980. p. 557-568.

COSTA, G. *Caracterização histórica, geomorfológica e hidráulica do estuário do Rio Paraíba do Sul.* 1995. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1995.

COUTINHO, P. N. Coastal quaternary of Pernambuco, Brazil. In: INTERNATIONAL SEDIMENTOLOGICAL CONGRESS, 14., 1994. *Abstracts...* Recife: D-31, 1994.

DIAS, G. T. M. et al. Géomorphologie côtière de l'Amapá – Brésil: considerations sur la dynamique sédimentaire actuelle. In: PROST, M.-T. (Ed.). *Évolution des littoraux*

de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le Quaternaire. Caiena: [s.n.], 1992. p. 151-158.

DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. da S. P.; MARTIN, L. O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies litorâneas associadas às desembocaduras dos rios São Francisco (Al-Se), Jequitinhonha (Ba), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 13, n. 2, p. 98-105, 1983.

_____ et al. Geologia do quaternário costeiro do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 20, n. 1-4, p. 208-215, 1990.

_____. Regional assessment of long-term trends of coastal erosion in Northeastern Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, n. 3, p. 355-371, 1996.

_____. Episodes of severe erosion in the Jequitinhonha river strandplain caused by changes in river discharge and coastal wave climate. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., 2003, Recife. *Anais...* Recife: [s.n.], 2003. Cd-Rom.

ESTEVEVES, L. S. *Variabilidade espaço-temporal dos deslocamentos da linha de costa no Rio Grande do Sul*. 2004. Tese (Doutorado)- UFRGS, 2004.

_____. Rio Grande do Sul: variabilidade espaço-temporal. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 460-467.

_____ et al. Coastal development and human impacts along the Rio Grande do Sul beaches, Brazil. *Journal of Coastal Research*, n. 35, p. 548-556, 2003. Special Issue.

_____ et al. Long- and short-term coastal erosion in Southern Brazil. *International Coastal Symposium*, v. 1, p. 273-282, 2002.

EXMAN, F. Custo do seguro pode subir, diz Syndarma. *Gazeta Mercantil*, p. C4, 29 jan. 2008.

FANOS, A. M. et al. Erosion of Rosetta promontory: the Nile delta. In: COPEDEC IV, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 4., 1995, Rio de Janeiro. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. p. 470-485.

FEITOSA, R. C. *Modelagem da pluma do emissário submarino da Barra da Tijuca*: RJ com T_{90} variável. 2003. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2003.

_____. *Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variável: aplicações em emissários submarinos*. 2007. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2007.

FRANCO, A. S. *Marés: fundamentos, análise e previsão*. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1992.

FÚLFARO, V. J.; COIMBRA, A. M. As praias do litoral paulista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972. *Resumos...* [S.l.: s.n.], 1972. p. 253-255.

GABIOUX, M. *Influência da lama em suspensão sobre a propagação da maré na plataforma amazônica*. 2002. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2002.

GONCHOROSKY, J.; SALES, G.; OLIVEIRA, M. C. P. Environmental impact of the stranding of a freighter ship in the “Parque Nacional Marinho dos Abrolhos”, Bahia, Brazil. In: NEVES, C. F.; MAGOON, O. (Ed.). *Coastline of Brazil*. New York: ASCE, 1989.

GOSWAMI, B. N.; SENGUPTA, D. A note on the deficiency of NCEP/NCAR reanalysis surface winds over the equatorial Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. C4, p. 3124, 2003. Doi: 10.1029/2002JC001497.

GRÉ, J. C. *Diagnóstico ambiental oceânico e costeiro das regiões sul e sudeste do Brasil*. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1994. V. 2.

HARARI, J.; CAMARGO, P. Tides and mean sea level in Recife (PE): 8° 3.3'S 34° 51.9'W: 1946 to 1988. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 1994.

HERZ, R. *Manguezais do Brasil*. São Paulo: Laboratório de Sensoriamento Remoto, Departamento de Oceanografia Física, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 1991.

HOMSI, A. Wave climate in some zones off the Brazilian coast. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 16., 1978, Hamburg. *Proceedings...* [S.l.]: American Society of Civil Engineers, 1978. p.114-133.

_____. Estudos e desenvolvimentos costeiro-ambientais no INPH. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p.315-324.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Preparing to meet the coastal challenges of the 21st century. In: WORLD COAST CONFERENCE 1993, 1993, Noordwijk, Países Baixos. *Proceedings...* Noordwijk, Países Baixos, 1994. Conference report.

JONG, M. *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins*. [S.l.]: Delft University of Technology, 2004. (Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, n. 04-2).

_____; HOLTHUIJSEN, L. H.; BATTJES, J. A. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. C4, p. 3117, 2003. Doi:10.1029/2002JC001422.

KALIL, A. F. D. *Uma contribuição ao estudo do nível médio do mar no estado do Rio de Janeiro*. 1997. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1997.

KAY, R.; MAGOON, O. (Ed.). *Deltas of the world*. New York: American Society of Civil Engineers, 1993.

KIKUCHI, R. K. P. et al. Rapid assessment of the Abrolhos reefs, Eastern Brazil: (part 1: stony corals and algae). *Atoll Research Bulletin*, 2002.

KINEKE, G. G.; STERNBERG, D. A. Distribution of fluid muds on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*, n. 125, p. 193-233, 1995.

KOMAR, P. D. *Beach processes and sedimentation*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1976.

KOWSMANN, R. O.; COSTA, M. A. *Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes*. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1979. (Série Projeto REMAC, n. 8).

LEÃO, Z. M. A. N. The coral reefs of southern Bahia. In: HETZEL, B.; CASTRO, C. B. (Ed.). *Corals of southern Bahia*. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira, 1994. p. 151-159.

_____. The coral reefs of Bahia: morphology, distribution and the major environmental impacts. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, n. 3, p. 439-452, 1996.

_____ et al. First coral reefs assessment in the southern hemisphere applying the AGRRA rapid protocol (Caramuanas reef, Bahia, Brazil). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENTIFIC ASPECTS OF CORAL REEF ASSESSMENT, MONITORING AND RESTORATION, 1999, Florida, USA. *Abstracts...* [S.l.: s.n.], 1999. p. 122-123.

MAHIQUES, M. M. Características texturais dos sedimentos superficiais da região costeira de Ubatuba (SP). In: SIMPÓSIO SOBRE OCEANOGRAFIA – IOUSP, 1989, São Paulo. *Resumos...* São Paulo: Instituto Oceanográfico da USP, 1989. p. 54.

MAIA, L. P. *Estudo hidrológico-sedimentológico da praia do Meireles*. Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2002. 57 p. Technical report.

_____. Dune migration and aelian transport along Ceará (NE Brazil). Downscaling and upscaling aeolian induced processes. *Coastal Sediments*, p. 1220-1232, 1999.

MARTIN, L.; SUGUIO, K. Excursion route along the coastline between the town of Cananéia (State of São Paulo) and Guaratiba outlet (State of R. de Janeiro). In: 1978 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, 1978. *Proceedings...* São Paulo: [s.n.], 1978. Special publication n. 2.

_____; FLEXOR, J.-M. Le quaternaire marin du littoral brésilien entre Cananéia (SP) et Barra de Guaratiba (RJ). In: 1978 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, 1978. *Proceedings...* São Paulo: [s.n.], 1979. p. 296-331.

MELO, E.; ALVES, J. H. G. M. Nota sobre a chegada de ondulações longínquas à costa brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p. 362-269.

_____ et al. Instrumental confirmation of the arrival of North Atlantic swell to the Ceara coast. In: COPEDEC IV, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 4., 1996, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1996.

MENEZES, D. C. *Contribuições metodológicas para a análise de flutuações atmosféricas e oceanográficas de alta frequência na costa do Estado do Rio de Janeiro*. 2007. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2007.

MESQUITA, L. R.; HARARI, J. *Tides and tide gauges of Ubatuba and Cananéia*. São Paulo: Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 1983. V. 11. Relatório técnico.

MIRANDA, B. T. *Modelagem de circulação e transporte de contaminantes na região da baía de Aratu – BA, utilizando técnicas de aninhamento de modelos hidrodinâmicos*. 2000. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2000.

MORAES, J. O. et al. Ceará. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 131-154.

MUEHE, D. Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 2, n. 1, p. 35-44, 2001.

_____. Beach morphodynamic research in Brazil: evolution and applicability. *Journal of Coastal Research*, n. 35, p. 32-42, 2003. Special issue.

_____. *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

_____; CARUSO JR., F. Batimetria e algumas considerações sobre a evolução geológica da Lagoa da Conceição: ilha de Santa Catarina. *Geosul*, v. 7, n. 32, p. 44-47, 1989.

_____; FERNANDEZ, G. B. O efeito de tempestades como realimentador do estoque de sedimentos de dunas frontais submetidas a vento predominante da terra para o mar. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 7., 1999, Porto Seguro, Ba. *Anais...* [S.l.: s.n.], 1999. Cd-Rom.

_____; SAVI, D. C. Resposta morfodinâmica de um sistema praia-antepraia a oeste do cabo Frio exposto às tempestades de maio de 2001. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8., 2001, Mariluz. *Resumos...* [S.l.: s.n.], 2001. p. 63-64.

_____; NEVES, C. F. *Changing climate and the coast, Western Africa, the Americas, the Mediterranean basin, and the rest of Europe*. [S.l.: s.n.], 1990. V. 2. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Miami Conference on Adaptive Responses to Sea Level Rise and Other Impact of Global Climate Change.

_____. The implication of sea level rise on the Brazilian coast: a preliminary assessment. *Journal of Coastal Research*, n. 14, p. 54-78, 1995. Special issue.

_____. *Vulnerabilidades físicas da orla da Cidade do Rio de Janeiro: relatório temático nível C*. [S.l.]: Instituto Pereira Passos, 2007. (Relatório COPPETEC PENO, 7725).

NEVES, C. F.; MUEHE, D. Potential impact of sea-level rise on the metropolitan region of Recife, Brazil. *Journal of Coastal Research*, n. 14, p. 116-131, 1995. Special issue.

_____; FIALHO, G. O. M. Coastal management and sea-level rise in Recife, Brazil. In: SYMPOSIUM ON COASTAL AND OCEAN MANAGEMENT, COASTAL ZONE 91, 7., 1991. *Proceedings...* [S.l.]: American Society of Civil Engineers, 1991. V. 3, p. 2801-2815.

NEVES FILHO, S.C. *Variação da maré meteorológica no litoral Sudeste do Brasil: 1965-1986*. 1992. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1992.

NICHOLLS, R. J. et al. Coastal systems and low-lying areas. In: PARRY, M. L. (Ed.). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 315-356. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

NITTROUER, C. A. The geological record preserved in Amazon shelf sedimentation. *Continental Shelf Research*, v. 16, n. 5/6, p. 817-841, 1996.

OLIVEIRA, M. M. F. *Redes neurais artificiais na predição da maré meteorológica em Paranaguá – PR*. 2006. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2006.

_____ et al. Maré meteorológica utilizando redes neurais artificiais: uma aplicação para a baía de Paranaguá – PR: parte 1: dados na estação de superfície. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 220-231, 2006.

_____ et al. Maré meteorológica utilizando redes neurais artificiais: uma aplicação para a baía de Paranaguá – PR: parte 2: dados meteorológicos de reanálise do NCEP/NCAR. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 22, p. 53-62, 2007.

OLIVEIRA, P. A.; PAIVA JR., F. L. Instalações portuárias da marinha do Brasil: seus problemas e soluções correlacionados com a engenharia costeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p.325-334.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO - FAO. *The world's mangroves: 1980-2005*. Roma, 2007. (FAO Forestry Paper, n. 153).

PARENTE, C. E. *Uma nova técnica espectral para análise direcional de ondas*. 1999. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

PARRY, M. L. et al (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 976 p. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

PINHO, U. F. *Caracterização dos estados de mar na Bacia de Campos*. 2003. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2003.

PIRAZZOLI, P. A. Secular trends of relative sea level (RSL) changes indicated by tide-gauge record. *Journal of Coastal Research*, n. 1, p. 1-26, 1986. Special issue.

PORTO, M. Maia; TEIXEIRA, S. G. *Portos e meio ambiente*. São Paulo: Edições Aduaneiras, 2002.

REGO, V. S. *Refração-difração de ondas irregulares: aplicação à praia de Ipanema-Leblon*. 1992. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1992.

SILVA, G. N. *Variações do nível médio do mar: causas, conseqüências e metodologia de análise*. 1992. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1992.

SILVA, W. de S. et al. Erosão costeira nas falésias Tibau do Sul: litoral leste do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2., 2003, Recife. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2003. Cd-Rom.

SOLOMON, S. (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

SOUZA, C. R. G. Processos sedimentares na enseada de Caraguatatuba, litoral norte de São Paulo. In: CONGRESSO DA ABEQUA, 3., 1992. *Anais...* [S.l.: s.n.], 1992. p. 123-140.

SPERANSKI, N. S.; CALLIARI, L. J. Bathymetric lens and coastal erosion in southern Brazil. In: INTERNATIONAL COASTAL SYMPOSIUM 2000, 2000. *Program and abstracts...* [S.l.: s.n.], 2000. p. 81.

_____. Padrões de refração de ondas para a costa do Rio Grande do Sul e sua relação com a erosão costeira. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 446-454.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. Formações quaternárias marinhas do litoral paulista e sul fluminense. In: 1978 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, 1978, São Paulo. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1978. 55 p. (Special publication, n. 1).

TOLDO JR. et al. Rio grande do Sul: erosão e acresção da zona costeira. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 468-474.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. Considerações sobre o ambiente praial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, v. 19, n. 1, p. 3-12, 1992.

_____. Quaternary geological evolution of Rio Grande do Sul coastal plain, Southern Brazil. *Anais da Academia brasileira de Ciências*, v. 68, n. 3, p. 355-371, 1996.

TORRES, A. M.; EL-ROBRINI, M. Amapá. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 11-40.

TRICART, J. Problèmes geomorphologiques du littoral oriental du Brésil. *Cahiers de Oceanographie*, v. 11, p. 276-308, 1959.

_____. Problemas geomorfológicos do litoral oriental do Brasil. *Boletim Baiano de Geografia*, v. 1, n. 1, p. 5-39, 1960.

UAISSONE, A. R. J. *Influência das forçantes atmosféricas em mesoescala sobre o nível médio do mar em Piraquara, RJ*. 2004. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2004.

U.S. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY – FEMA. *Procedure Memorandum n. 37: protocol for Atlantic and Gulf Coast Coastal Flood Insurance Studies in FY05*. [S.l.], 2006.

VALENTINI, E. *Avaliação dos processos litorâneos e consequências para o gerenciamento costeiro no Ceará*. 1994. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1994.

_____; ROSMAN, P. C. C. Erosão costeira em Fortaleza. *Revista Brasileira de Engenharia: Cadernos de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 1, p. 373-381, 1993.

_____; CASSAR, J. C. M.; GUSMÃO, L. A. B. Man made erosion in the São Brás pocket beach and its restoration. In: COPEDEC IV, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 4., 1995, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: [s.n.], 1995.

VALLEGA, A. Urban waterfront facing integrated coastal management. *Ocean & Coastal Management*, n. 44, p. 379-410, 2001.

VIDIGAL, A. A. F. (Coord.). *Amazônia azul: o mar que nos pertence*. Rio de Janeiro: Ed. Record. 2006.

VILLWOCK, J. A. Geology of the coastal province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil: a synthesis. *Pesquisas*, n. 16, p. 5-49, 1984.

VIOLANTE-CARVALHO, N. *Investigações sobre o clima de ondas na bacia de Campos e correlação com situações meteorológicas associadas*. 1998. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1998.

VITAL, H. et al. Rio Grande do Norte. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p.155-172.

_____. Why does erosion occur on the Northeastern coast of Brazil?: the Caiçara do Norte beach example. *Journal of Coastal Research*, n. 35, p. 525-529, 2003. Special issue.

XAVIER, A.G. *Estudo da circulação hidrodinâmica e do transporte de contaminantes no estudo do rio Iguaçu: Baía de Guanabara*. 1996. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1996.

_____. *Circulação hidrodinâmica na baía de Todos os Santos (BA)*. 2002. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2002.

Resumo

O que é a zona costeira e qual sua importância? A zona costeira é legalmente definida como uma faixa marítima de 12 milhas náuticas de largura (mar territorial) e uma faixa terrestre com 50 km de largura. Nos municípios banhados pelo mar ou às margens de estuários, habitam aproximadamente 20% da população brasileira, concentrada principalmente na vizinhança das capitais de Estados. Portos, exploração de recursos minerais, turismo, aquíicultura e áreas de conservação ou de proteção ambiental, além de moradia, são as principais atividades econômicas ou tipos de ocupação da zona costeira.

A elevação do nível médio do mar seria a principal e único fator de impacto sobre a zona costeira? A combinação da expansão térmica e do aumento do volume dos mares pelo derretimento das geleiras localizadas nos continentes, resultaria num aumento do nível médio do mar da ordem de 50 cm até 2100. Sabe-se, porém, que fatores meteorológicos podem provocar elevações transientes bem maiores que os valores previstos pelo IPCC. Como a zona costeira é a interface entre continente, atmosfera e oceano, ela se torna vulnerável a mudanças nestes três grandes sistemas. O Capítulo 2 investiga os diversos agentes ambientais presentes na zona costeira: ventos, ondas, sedimentos, nível do mar, temperaturas do ar e do mar, e regime de precipitação. Entende-se que as mudanças do regime de ventos podem influir na formação das ondas, no transporte eólico de sedimentos, nas oscilações

transientes de nível relativo do mar (“maré meteorológica”); é necessário, portanto, que as investigações sejam feitas de forma multidisciplinar, em várias escalas geográficas e temporais.

Quais os impactos advindos das mudanças climáticas sobre a zona costeira? As ondas podem ter seu regime alterado para condições que ainda não foram estudadas pelo IPCC para o Oceano Atlântico Sul, potencialmente esculpindo novas feições morfológicas na costa ou atuando sobre estruturas de maneira diferente daquelas para as quais foram dimensionadas. Variações no transporte de sedimentos por ação das ondas podem erodir ou assorear locais antes estáveis. As variações do nível do mar por efeito meteorológico (por exemplo, devido à passagem de ciclones extratropicais com força de furacão) podem ser até três vezes maiores do que a elevação termo-eustática prevista pelo IPCC, embora hoje em dia já se observem variações da ordem de 90 cm no nível médio relativo do mar. Mudanças da temperatura do oceano costeiro podem influenciar a diluição e a circulação hidrodinâmica nas regiões vizinhas de emissários submarinos. Pode haver também mudanças no padrão de brisas marinhas e terrestres, bem como mudanças nas propriedades termohalinas de baías e áreas estuarinas com conseqüências para a fauna e flora. Finalmente, é indispensável entender as relações entre as bacias hidrográficas e as regiões costeiras, pois mudanças no regime pluvial interferem com o balanço de água doce e salgada nos estuários e com o aporte de sedimentos na zona costeira.

Quais as vulnerabilidades da zona costeira a mudanças climáticas? Os Capítulos 3 e 4 tratam separadamente os ambientes físicos e os tipos de obras usualmente encontradas. Investigam-se separadamente nove compartimentos geomorfológicos distintos, onde a erosão costeira tem sido observada ou onde o risco de prejuízo ambiental é mais acentuado. Alerta-se também para os impactos sobre manguezais e recifes de coral. Apresentam-se diversos tipos de estruturas (urbanização da orla, portos, obras de proteção costeira, sistemas de saneamento, dutos e emissários), caracterizando suas vulnerabilidades.

Quais as respostas recomendadas? O Capítulo 5 aborda as possíveis formas de resposta, de acordo com a nomenclatura do IPCC (“Recuo”, “Acomodação” e “Proteção”), analisando os sistemas naturais e diversos tipos de estruturas.

Qual a estratégia recomendada para enfrentar as mudanças climáticas? Em comparação aos impactos em outros países, bem mais vulneráveis, pode se desenvolver, nos governantes e tomadores de decisão, uma postura paradoxalmente indiferente ou de falsa segurança quanto às questões das mudanças climáticas na zona costeira. A estratégia recomendada baseia-se nos princípios de Gerenciamento Costeiro Integrado, que engloba aspectos de gestão de recursos hídricos,

gerenciamento costeiro, ordenamento espacial e planejamento energético e mineral. As ações propostas dividem-se nos seis aspectos listados a seguir e devem ser iniciadas no prazo mais curto possível: (A) a condução de monitoramento ambiental permanente (longo prazo); (B) a proposição de ordenamentos municipais para ocupação urbana; (C) a efetivação de políticas estaduais de Gerenciamento Costeiro Integrado; (D) o direcionamento de esforços da ação federal: legislação, educação, monitoramento e coordenação de ações; (E) a identificação de fontes de recursos e financiamentos, sua aplicação e as formas de controle; (F) o planejamento prévio e a priorização de estudos para as formas clássicas de respostas (Recuo, Acomodação e Proteção).

Palavras-chave

Zona costeira. Mudanças climáticas globais. Vulnerabilidade. Impactos. Estratégia.

Abstract

For a country with such a long coastline, it should be expected that the impacts on the coastal zone due to global climate changes be an issue of concern. In spite of its advertised beautiful beaches, the economical relevance of the ports for the international trade, and 10 cities with more than 1 million inhabitants on the coast, the population actually living on coastal counties remains around 20% of the total country population, which seems a surprisingly small figure. Large extensions of coastline remain virtually pristine or weakly occupied.

Very few actions on CZ management at local government level have been actually effective. Impacts due to climate changes on “production of commodities” are well perceived by the public opinion rather than on the “infrastructure and logistics”, in spite of the relevance of tourism and ports for Brazilian economy. If the impacts are exclusively restricted to a rise by an amount of 28 to 43 cm on mean sea level by year 2100, this might be perceived as negligible by local government and may result on a false impression of safety, by minimizing the actual impacts.

This work proposes an alternative approach, attempting to call attention upon the coastal environment as a network of physical agents and processes, which must be closely monitored in face of global climate changes.

The paper is divided into three sections. The first one (Chapter 2) describes the most important physical processes and environmental agents which are relevant to understanding the coastal environment, as well as to designing appropriate responses to mitigate the consequences of climate changes. These agents are: wind, waves, sediments, sea level, air and sea temperature, and precipitation.

The second section (Chapters 3 and 4) describes selected types of coastal environment, discussing their vulnerability to coastal erosion. In this section, different types of coastal structures are discussed

regarding their vulnerability to environmental changes, some of them already facing problems at current sea level.

Finally, the third section (Chapters 5 and 6) deals with responses, according to the following aspects:

- *establishment of long term environmental monitoring;*
- *proposal of municipal ordinances for urban settlements;*
- *effective integrated coastal zone management policies at State level;*
- *focusing of efforts at Federal level: legislative, educational, monitoring and coordinating;*
- *identification of financial resources and support, planned application and control mechanisms;*
- *advance planning and choice of priorities for studying mitigation responses (Retreat, Adaptation, Protection).*

Keywords

Coastal zone. Global climate changes. Vulnerability. Impacts. Strategies.

Os autores

CLAUDIO FREITAS NEVES é engenheiro civil e matemático, mestre em Engenharia Oceânica (UFRJ), e doutor pela Universidade da Florida (USA). É professor e pesquisador pela UFRJ na Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Engenharia Oceânica.

DIETER CARL ERNST HEINO MUEHE é mestre em Geografia (UFRJ) e doutor em Geografia pela Universidade de Kiel (Christian-Albrechts). Atualmente é professor e pesquisador do Instituto de Geociências (Universidade Federal do Rio de Janeiro).

1. INTRODUÇÃO

A divulgação do quarto relatório do Painel Internacional Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR4) em 2007 gerou muitas questões a serem discutidas e analisadas. Polêmicas à parte, a confirmação da provável contribuição da atividade humana para o aquecimento do planeta foi o aspecto mais relevante deste documento.

Entretanto, permanecem as incertezas quanto às reais conseqüências do aquecimento global, não se sabe ao certo qual seria a variação positiva da temperatura e nem como ocorreriam alterações no regime de chuvas, por exemplo. Esses aspectos dependem da capacidade de regulação das emissões de gases de efeito estufa, isto é, do volume de redução de gases a ser definido nas rodadas de negociação da ordem ambiental internacional sobre o clima, como a Convenção de Mudanças Climáticas e o Protocolo de Kyoto. Independente do rumo da política internacional sobre mudança climática é preciso promover políticas nacionais e locais para preparar a sociedade às transformações em curso.

Segundo o IPCC (2007), está prevista uma maior freqüência de ondas de calor em áreas urbanas, com maior intensidade e duração. Além disso, pode-se prever uma deterioração da qualidade do ar e o aumento de áreas de risco, em especial nas cidades tropicais, cada vez mais sujeitas às chuvas intensas que podem provocar escorregamentos de encostas e alagamentos.

Não é possível aguardar certezas científicas para se adotarem medidas que atenuem os eventuais impactos gerados pelas mudanças climáticas. É fundamental organizar o país com base nos cenários elaborados até o

momento, que resultam de pesquisas compiladas por pesquisadores de todo o mundo. É hora de aplicar o princípio da precaução e propor medidas que possam atenuar as implicações causadas pelas mudanças globais que resultariam da elevação das temperaturas na Terra, entre outros impactos. Este artigo, ao sugerir ações para a adaptação às mudanças climáticas em cidades do Brasil, procura contribuir para que as emissões em áreas urbanas possam ser reduzidas e, também, para diminuir os impactos socioambientais graves, que resultem em perdas de vidas humanas e de bens materiais.

Para tal, o texto está dividido em três partes: 1) a urbanização brasileira, que apresenta uma síntese do peculiar processo de urbanização do país, marcado pela velocidade com que ocorreu, pela criação de vazios urbanos e pela concentração de riqueza em enclaves em meio à pobreza; 2) adaptação, vulnerabilidade e risco socioambiental em cidades brasileiras, que discute conceitos que são úteis para organizar as ações a serem implementadas no curto, médio e longo prazos no país; e, 3) situações de risco e adaptação em cidades brasileiras, que aborda os principais problemas socioambientais decorrentes das mudanças climáticas nas cidades do Brasil e sugestões para minimizá-los. Esse último item está dividido em três eixos de problemas relacionados às suas causas: aumento da temperatura; chuvas intensas; e elevação do nível do mar. Por fim, seguem as considerações finais, que sintetizam o trabalho.

É preciso alertar desde o início que o quadro social do país agrava os impactos socioambientais das mudanças climáticas nas cidades brasileiras. Séculos de segregação social pesam na hora de dimensionar ações para combater as alterações previstas pelos cientistas do IPCC. Parte expressiva da população brasileira que vive em áreas de risco estará mais sujeita aos problemas que as camadas mais abastadas e melhor situadas na estrutura social do Brasil. Por isso, combater a exclusão socioambiental é a primeira medida para evitar o pior: a perda de vidas humanas decorrentes do aumento de eventos extremos nas cidades brasileiras.

2. A URBANIZAÇÃO BRASILEIRA

O processo de urbanização no Brasil é singular, segundo demonstraram diversos autores, como os geógrafos Milton Santos (1990 e 1993) e Ana Fani Carlos (2001). Para o primeiro, esse processo é marcado pela aceleração e pelo ritmo intenso. A outra autora afirma que é produto da lógica

especulativa, que resultou em vazios urbanos, concentração de áreas nobres em meio à pobreza e na ocupação de sítios urbanos indevidos, que se tornaram áreas de risco ambiental, analisadas por autores como Yvette Veiret (2007) e Ulrich Beck (1986).

São nessas áreas de risco que se acomodam os mais pobres, que vivem em condições subumanas, conforme designa a ONU, morando em favelas à beira de córregos ou localizadas em encostas íngremes. Outros estão em ambientes degradados, sem manutenção e com elevada concentração populacional, dividindo serviços de água, como se caracterizam os cortiços. Em pior situação estão aqueles que não têm teto. São milhares de moradores de rua que vivem em brechas do sistema viário ou ocupam praças durante a noite, dentre outros lugares, em busca de abrigo.

A concentração populacional brasileira se distribui na forma de metrópoles, cidades grandes e médias. A urbanização do Brasil é um fenômeno recente se comparado ao que ocorreu em países centrais. A velocidade em que as cidades foram construídas, como, por exemplo, Maringá (PR), que atualmente chega a cerca de 320.000 habitantes¹, apesar de ter cerca de 60 anos de sua fundação, não pode ser justificativa para a exclusão social que encontramos nas áreas urbanas do Brasil. Ela decorre da produção do espaço urbano.

Como bem apontaram o economista Paul Singer (1977) e Milton Santos (1994), a economia política da cidade trata o solo urbano como uma mercadoria. A transformação de vastas porções de ambientes rurais em zonas urbanas atende a interesses de mercado, que vêem a terra urbana como fonte de lucro e de valorização de capital. Esse modelo explosivo de acumulação de renda é o maior responsável pela segregação socioespacial que se identifica nas cidades brasileiras.

Em outros países coube ao Estado induzir o crescimento urbano, segundo analisaram autores como o sociólogo Manuel Castells (1983) e o geógrafo Horacio Capel (2002 e 2003), entre outros. No Brasil, mesmo as poucas cidades planejadas ficaram à mercê de agentes urbanos, especuladores e empreendedores imobiliários, que muitas vezes driblaram planos diretores, como se verifica em Belo Horizonte ou em Goiânia. Em nosso país, a terra

¹ <<http://www.maringa.pr.gov.br>>, acessado em novembro de 2007.

urbana é definida quase que exclusivamente como uma mercadoria e muito excepcionalmente foi abordada segundo sua função social. A aprovação do Estatuto da Cidade, em 2001², pode alterar esse quadro desolador, mas pelo que se verifica até o momento, não é possível ser otimista. Esse importante instrumento de regulação da vida urbana carece de regulamentação, apesar de prever medidas interessantes como os estudos de impacto de vizinhança e a participação popular na gestão da cidade, ainda não ganhou capilaridade na sociedade brasileira.

A relação entre industrialização e urbanização é fundamental para explicar parte dos problemas ambientais urbanos. Se no início as cidades tinham funções voltadas ao comércio e à distribuição de mercadorias, a presença de indústrias alterou esse quadro. A cidade passou a desempenhar também a função de produtora de mercadorias.

Mas a indústria não é uma atividade econômica qualquer, ela exige uma série de serviços urbanos para poder instalar-se e operar, além de muita mão-de-obra, como foi o caso na Região Metropolitana de São Paulo, no século 20. Para receber uma instalação industrial são projetadas vias, integrados sistemas de distribuição de energia e construídos conjuntos habitacionais, inicialmente, pelas próprias indústrias para alojar trabalhadores. Eram as famosas vilas operárias, que restam como enclaves do patrimônio industrial nas mais antigas cidades industriais brasileiras.

Até a década de 1980, as principais áreas industriais do Brasil estavam em São Paulo e em seu entorno, definido aqui em um raio de cerca de 100 km que abrangia Sorocaba, Campinas, São José dos Campos e Cubatão. Além disso, existiam núcleos industriais dispersos por Minas Gerais, em Belo Horizonte e Ipatinga; pelo Rio Grande do Sul, como em Caxias do Sul e Porto Alegre; em Santa Catarina, no vale do Itajaí; outras no Estado do Rio de Janeiro, como em Barra Mansa; e algumas cidades isoladas no Nordeste, como em Recife e Paulista, em Pernambuco, ou mesmo em Salvador, na Bahia. Também merece destaque Manaus (AM), devido à instalação da Zona Franca, que motivou a presença de um importante pólo montador de bens de consumo eletrônicos desde 1967, que ainda se mantém. Manaus passou

² O Estatuto da Cidade foi criado pela Lei 10.257, de 10 de julho de 2001, entrou em vigor no dia 10 de outubro de 2001 e regulamentou os artigos 182 e 183 da Constituição Federal. Ele é produto de anos de lutas de movimentos sociais urbanos, que tiveram parte de suas reivindicações atendidas.

de cerca que 200.000 habitantes, em 1960, para cerca de 600.000 em 1980 e, em 2000, atingiu cerca de 1.400.000 habitantes³. Um crescimento populacional de cerca de sete vezes em menos de 40 anos não pode ocorrer sem resultar em dificuldades e impactos sociais, ambientais e econômicos graves.

O crescimento rápido das cidades encareceu o preço do solo urbano. Como as unidades fabris necessitam de vastas áreas, muitas cidades deixaram de ser opção para plantas industriais pelo custo alto do terreno.

Na década de 1990, a mudança do padrão produtivo e políticas de atração industrial alteraram o quadro da distribuição das indústrias no Brasil. Conhecida como guerra fiscal, resultou no crescimento industrial em Estados como Goiás, Ceará, Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e Paraná, e revigorou o setor secundário no país.

A oferta de incentivos fiscais naqueles Estados da Federação permitiu a presença de indústrias, mas com menor geração de emprego que a verificada na industrialização dos Estados de São Paulo e Minas Gerais. A inevitável atração populacional que a indústria gerou não foi compensada pela arrecadação de impostos. Como resultado, mais gente precisou utilizar serviços públicos sem que os municípios estivessem preparados para oferecê-los, como indicou o economista Marcio Pochmann (2003). O resultado é a reprodução de processos sociais que se verificaram em metrópoles, como a favelização e ocupação de áreas de risco nas novas cidades industriais do Brasil.

Paralelamente a esta segunda etapa da industrialização brasileira, ocorreu uma modernização conservadora no campo, para lembrar da expressão cunhada pelo sociólogo Renato Ortiz (1989). A introdução de máquinas agrícolas em áreas rurais, associada ao endividamento de pequenos agricultores, desempregou muitos trabalhadores que tinham sua ocupação na agricultura.

A migração acentuada não teve o destino clássico das décadas anteriores observada nas principais metrópoles do Brasil – São Paulo e Rio de Janeiro. O destino dos que perderam postos de trabalho no campo ou a

³ <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/default_censo_2000.shtm>, acessado em novembro de 2007.

terra passou a ser metrópoles regionais, como Fortaleza, Salvador e Recife. O inchaço urbano, com as conseqüências sociais conhecidas, se multiplicou pelo país. Favelas e cortiços não são mais uma exclusividade de São Paulo e Rio de Janeiro. Brasília Teimosa, em Recife, ou mesmo a favela do Dendê, em Fortaleza, passaram a ser tão conhecidas quanto Paraisópolis, que fica em São Paulo, ou a Rocinha, no Rio de Janeiro.

Os problemas socioambientais urbanos se multiplicaram pelo território nacional, e é nessa escala que ele deve ser dimensionado, embora sua resolução ocorra em escala local. Em outras palavras, não será possível atenuar impactos socioambientais e propor medidas para adaptação às mudanças climáticas apenas por meio de políticas públicas municipais. Será preciso um esforço conjunto, que mobilize diversos ministérios, como o de Meio Ambiente, o de Cidades e o de Saúde, entre outros, já que muitas das novas cidades industriais ou mesmo as metrópoles regionais que incharam nos últimos anos não têm recursos técnicos e econômicos para financiar as alterações necessárias para se adaptarem às mudanças climáticas.

Uma ação conjunta mobilizadora deve ser iniciada o mais rápido possível. Seria muito oportuno um Plano de Aceleração do Crescimento Sustentável (PACSUS), que deveria ter como foco a recuperação de áreas degradadas em cidades e a melhoria da qualidade de vida da população brasileira. O crescimento da atividade econômica deve ser diferente do que ocorreu até o século 20. É preciso estimular a revisão dos erros cometidos no passado e não sua reprodução. Simplesmente propor aumento da produção industrial de automóveis ou de outros bens de consumo não é mais suficiente para resolver os desafios do século 21.

É necessário gerar trabalho para consertar o que o modelo hegemônico do século passado degradou. Esta mudança de paradigma é incipiente e o país que a aplicar antes que os demais vai levar vantagem, já que essa será necessariamente desenvolvida e implementada por meio de conhecimento científico e tecnológico. Gerar tecnologia de recuperação ambiental é um desafio a pesquisadores, empresários e governos responsáveis. Além da necessidade de tecnologias que reduzam as emissões de gases de efeito estufa e as que permitem uma adaptação às mudanças climáticas globais, temas abordados a seguir.

3. ADAPTAÇÃO, VULNERABILIDADE E RISCO SOCIOAMBIENTAL EM CIDADES BRASILEIRAS

Palavras de Desmond Tutu (2007), ainda que expressas para a escala mundial, ajudam a refletir sobre a situação no Brasil. Para ele, “A adaptação se converteu em um eufemismo de injustiça social a nível mundial. Enquanto os cidadãos do mundo desenvolvido estão a salvo, os pobres, vulneráveis e famintos, estão expostos todos os dias de suas vidas à dura realidade das mudanças climáticas”.⁴

No Brasil também encontramos parcela da população que pode se adaptar muito bem às conseqüências das mudanças climáticas nas cidades. Mas a ampla maioria está sujeita a riscos e não tem condições de enfrentar os desafios que os cenários indicam. Adaptação, nos termos deste artigo, é definida como investimentos em infra-estrutura para a proteção da população e, também, como a capacitação das pessoas para que saibam atuar diante das situações de risco que devem surgir em maior quantidade nas cidades brasileiras.

O quadro social desigual do Brasil, mesmo que atenuado nos últimos anos, ainda está longe de uma situação de equilíbrio. Por isso é preciso aproveitar todas as oportunidades que surgem para resolução de problemas e implementar medidas socioambientais que corrijam paulatinamente as discrepâncias de renda e de acesso a serviços no país.

Cidadania é também expressão de qualidade de vida (RIBEIRO, 2002). O Brasil ainda não foi democratizado nesse aspecto. Mesmo com as reformas em curso, o acesso a ambientes adequados é restrito a parcela minoritária da população brasileira, certamente a que mais colabora para emissão de gases de efeito estufa em cidades. São os que utilizam o transporte individual, têm abrigo decente e que serão menos afetados pelas mudanças climáticas.

A mais difícil tarefa a ser negociada politicamente, tanto na escala nacional quanto na internacional⁵, é convencer quem usufrui as vantagens

⁴ Tutu, Desmond. No necesitamos un apartheid en la adaptación al cambio climático. IN: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. Madrid, 2007.

⁵ Para uma análise das negociações internacionais sobre mudanças climáticas ver Ribeiro (2002 e 2001).

que a sociedade de consumo e intensiva em recursos energéticos de base fóssil disponibiliza a mudar seus hábitos. O emprego de artifícios financeiros já conhecidos, como o aumento das taxas para o uso dos carros em cidades grandes, em especial, nas áreas centrais, pode ser lembrado como medida para alterar esse quadro. Também é preciso regulamentar o uso das motocicletas, cujas emissões são exageradas por falta de uma decisão federal, que precisa redefinir o volume de emissões dos motores de motocicletas para níveis mais condizentes com a realidade contemporânea.

Mesmo que as emissões caiam rapidamente, o que é muito pouco provável, os efeitos do aquecimento global serão sentidos pela população das cidades e metrópoles brasileiras por muito tempo. Eles resultam de gases de efeito estufa lançados no passado, em especial pelos países que se industrializaram inicialmente.

Não existe ainda consenso em relação aos efeitos do aquecimento global no Brasil, os modelos utilizados para simular o cenário para os próximos anos geram resultados em escala regional e nacional. Ainda não temos modelos consolidados que atestem o que realmente pode ocorrer no Brasil. Entretanto, já é possível encontrar bibliografia sobre alguns casos, como Nova Iorque (DEGAETANO, 1999), estudos preliminares comparativos de megacidades (MITCHELL, 1999) e análises mais gerais que podem ser úteis na elaboração de pesquisas futuras (ARNELL, 2004 e KOUSKY e SCHNEIDER, 2003).

Esses trabalhos indicam dificuldades para qualificar os impactos socioambientais em cidades brasileiras decorrentes das mudanças climáticas. Por isso é necessária uma revisão conceitual que auxilie a classificar os possíveis impactos. Seguem algumas definições de conceitos relacionados aos riscos socioambientais que podem ser utilizados para avaliar e propor medidas mitigadoras e de adaptação para enfrentar os problemas resultantes do aquecimento global em cidades do país. Eles foram extraídos da obra de Veiret (2007:24):

- Risco – Percepção de um perigo possível, mais ou menos previsível por um grupo social ou por um indivíduo que tenha sido exposto a ele;
- Incerteza – Possibilidade de ocorrer um acontecimento perigoso sem que se conheça a probabilidade;

- Indeterminação – Situação em que um acontecimento desconhecido poderia acontecer. É, por exemplo, a situação de um homem de negócios que investe em uma inovação tecnológica sem avaliar todas as implicações de sua decisão;
- Álea – Acontecimento possível; pode ser um processo natural, tecnológico, social, econômico e sua probabilidade de realização. O equivalente em inglês é *hazard*;
- Perigo – Termo empregado também para definir as conseqüências objetivas de uma álea sobre um indivíduo, um grupo de indivíduos, a organização do território ou sobre o meio ambiente. Fato potencial e objetivo;
- Alvo – Pessoas, bens, equipamentos, meio ambientes. Ameaçados pela álea e suscetíveis de sofrer danos e prejuízos;
- Vulnerabilidade – Impacto previsível de uma álea sobre os alvos. A vulnerabilidade pode ser humana, socioeconômica e ambiental;
- Crise – Ocorrência de um acontecimento cuja amplitude excede à capacidade de gestão espontânea da sociedade que sofre esse evento;
- Catástrofe (do grego *katastrophé*, devastação) – Definida em função da amplitude das perdas causadas às pessoas e aos bens. Não há necessariamente correlação entre importância de uma álea e a magnitude dos danos.

O resultado das alterações climáticas nas cidades brasileiras pode ser expresso em termos de incerteza e de indeterminação, nos termos definidos acima. Incerteza diante da falta de maior precisão do aumento da temperatura nos próximos cem anos. Outro aspecto que apresenta indefinição é a alteração do regime de chuvas. Não se pode dimensionar ao certo o volume das chuvas torrenciais e concentradas em determinados períodos, embora os modelos indiquem estes fatos como prováveis. Ou seja, ainda não se pode aferir a probabilidade da ocorrência das conseqüências das mudanças climáticas nas cidades brasileiras dado que vetores importantes, como o aumento da temperatura e a variação das chuvas, ainda não são conhecidos com precisão. Por isso, existe uma indeterminação quanto aos impactos socioambientais,

ou seja, as mudanças vão gerar acontecimentos em intensidade desconhecida, ainda que possam ser, de certo modo, estimados.

Apesar disso, não resta dúvida que as cidades brasileiras podem ser afetadas pelas áreas, ou seja, são locais onde ocorrerão acontecimentos relacionados às mudanças climáticas. Trata-se de identificar os perigos e os alvos que eles afetam, para se evitar crises e uma catástrofe. Por isso, as medidas devem ser tomadas com base no princípio da precaução, que ganha ainda maior relevância quando envolve o risco de vidas humanas. Ou seja, na dúvida quanto aos impactos socioambientais nas cidades brasileiras, é preciso agir para enfrentar problemas antigos que resultaram do processo rápido e particular de urbanização no Brasil e atacar, com determinação, principalmente, a má condição de moradia da maioria da população que vive em grandes cidades e metrópoles brasileiras.

O conceito de vulnerabilidade⁶ é fundamental nesse momento. É preciso reavaliá-lo frente às alterações derivadas do aquecimento global. Apesar de não existirem estudos conclusivos a respeito, isso não impede que se possam indicar alguns dos problemas que a população deve enfrentar e que vai exigir políticas públicas em escala nacional, estadual e regional.

O perigo, como aponta VEIRET (2007), deve ser dimensionado segundo o resultado do intenso processo de urbanização do Brasil. Como vimos no início deste texto, ele gerou áreas com elevada concentração de população de baixa renda, que acabou tendo como opção viver em situações de risco, como fundos de vale, várzeas de corpos d'água e encostas íngremes, ou, em cortiços, em imóveis degradados pela falta de manutenção. Cada uma dessas situações expõe de modo peculiar seus habitantes aos perigos resultantes do aquecimento global e geram situações de risco que demandam adaptação.

4. SITUAÇÕES DE RISCO E ADAPTAÇÃO EM CIDADES BRASILEIRAS

Existem diversas formas de riscos decorrentes das mudanças climáticas globais nas cidades brasileiras. Vamos organizá-los segundo três eixos de discussão: aumento da temperatura, chuvas intensas e elevação do nível do mar.

⁶ Esse conceito é foco de estudos de autores como Bohle, Downing e Watts (1994), Burton (1997), Veiret (2007) e November (2002).

4.1 AUMENTO DA TEMPERATURA

A elevação das temperaturas nas cidades, que devem ter dias e noites mais quentes em maior quantidade que o verificado até o momento, a confirmarem-se as previsões, repercute na qualidade de vida e exige uma revisão do uso das edificações, bem como seu redimensionamento. Outros aspectos a considerar são a poluição do ar e os efeitos da ilha de calor, estudados pela geógrafa Magda Lombardo (1985).

Entre as conseqüências das emissões na escala local, a poluição do ar é uma das mais graves. Essa gera um aumento de internações de doentes por problemas respiratórios em períodos de estiagem, em especial no inverno nas cidades das Regiões Sudeste e Sul, quando se verifica com maior frequência a chamada inversão térmica. A concentração de poluentes deixa os olhos irritados, acelera o desenvolvimento de tosse, gripe e resfriado. Esses são problemas graves porque afetam mais as pessoas dos extremos da pirâmide populacional: crianças até cinco anos e idosos.

A população costuma adotar soluções práticas para amenizar as dificuldades que a elevada concentração de poluentes gera como evitar ambientes fechados, dormir junto a um recipiente com água, não realizar atividade física ao ar livre depois das 10h00, entre outras. Porém, nenhuma delas implica em alterar o padrão que o sistema de transporte aplicado impôs: a predominância do uso do carro.

Já em relação à ilha de calor urbano, as metrópoles e grandes cidades brasileiras sofrem com essa situação, que agrava o quadro de saúde de hipertensos e pode aumentar o número de mortes. Uma solução para esse problema passa pela regulamentação das construções, uma atribuição municipal, por meio do Código de Obras e do Plano Diretor. Por isso é preciso um trabalho de sensibilização junto à população para que pressione prefeitos e vereadores para que revisem os gabaritos de novas obras e as adaptem às condições climáticas projetadas para o futuro.

O maior entrave às alterações no Código de Obras é o setor imobiliário que mantém, em geral, estreitas relações com o poder executivo, como bem demonstrou Santos (1990). Em sua obra, ele indicou como a pressão do setor da construção civil levou à adoção de soluções técnicas que privilegiaram as grandes obras e o adensamento populacional em áreas consideradas nobres em São Paulo.

Em muitas cidades e metrópoles, mantidas as edificações de dimensões reduzidas que temos hoje, vai aumentar a parte da população que instala um condicionador de ar em residências e no local de trabalho para obter conforto térmico interior. O aumento do uso de energia para esfriar ambientes urbanos também deve ser considerado.

Não será possível reduzir a temperatura de cada cômodo de cada edifício com a instalação de condicionadores de ar. Será preciso renovar edificações para permitir uma maior circulação de ar e o resfriamento dos ambientes interiores e, além disso, estabelecer normas para a construção civil que expressem claramente a necessidade de projetar ambientes mais amplos e com maior circulação de ar.

O aumento da temperatura vai afetar diretamente o conforto térmico das edificações. As absurdas torres de vidro, que podem ser indicadas a países de clima temperado mas são inadequadas para países tropicais, devem ser evitadas. Atualmente, elas são habitáveis graças a poderosos sistemas de refrigeração, que regulam a temperatura ambiente a cerca de 22 graus Celsius. Medidas, como as adotadas no município de São Paulo, que impôs aos investidores e construtores urbanos a instalação de aquecimento da água por meio do aproveitamento da energia solar, devem ser ampliadas em larga escala e podem também ser aplicadas para a geração da energia usada na edificação.

No médio prazo, porém, a construção de novos edifícios envidraçados deve ser desestimulada. Além de demandar mais energia para nutrir os sistemas de refrigeração, elas também lançam ao entorno o ar quente que retiram do interior dos prédios, contribuindo para a formação das ilhas de calor nas cidades brasileiras.

Outra consequência das mudanças climáticas será a maior frequência de chuvas de elevada intensidade. A explicação para isso seria a elevada temperatura da superfície da metrópole, que aumenta pelo aquecimento global mas também devido à presença de veículos que irradiam calor dos motores e dos sistemas de refrigeração que lançam para fora dos edifícios o ar quente que retiram de seu interior (LOMBARDO, 1985). Como resultado, as massas de ar frio se precipitam com mais intensidade e em pontos localizados, o que resulta em transtornos locais muito intensos, como alagamentos de vias, congestionamentos, perda de moradia de população de baixa renda, prejuízos

materiais e, o mais grave, mortes, em geral de moradores de áreas de risco⁷ que não têm outra alternativa para morarem senão a de ocupar a beira de rios ou encostas íngremes que acabam escorregando com a saturação do solo que presença intensa das águas pluviais.

Mais uma causa do aquecimento é a produção do espaço urbano, que no Brasil atende a demandas privadas e de acumulação sem qualquer sentido público⁸. Os prédios formam verdadeiras barragens à circulação dos ventos. Isso altera o fluxo natural e desvia as correntes de ar o que afeta a ocorrência e intensidade de chuvas (LOMBARDO, 1985).

Esses problemas indicam que será preciso atenuar a temperatura da superfície das cidades e metrópoles brasileiras. Para isso, é fundamental estimular o abandono dos veículos ou alterar rapidamente o padrão dos motores para que deixem de emitir calor, tarefa que vai levar tempo para ser cumprida. Além disso, regulamentar a retirada de calor de ambientes fechados e evitar a construção de novos edifícios que necessitem dessa alternativa técnica para serem habitáveis estão entre as medidas corretas a serem aplicadas. Também seria necessário barrar a construção de torres elevadas, que chegam a ultrapassar vinte andares em alguns casos, tanto para uso residencial quanto para instalação de escritórios. Nesse caso, uma alternativa é promover seminários junto a arquitetos e engenheiros para que discutam alternativas de projetos de prédios adequados aos padrões tropicais e que passassem a dispor de iluminação e circulação naturais, de acordo com a oferta de iluminação típica de países tropicais. Por fim, é urgente estimular a adoção de novas técnicas construtivas que se adaptem às temperaturas mais elevadas que devem afetar o país.

O plantio de árvores, medida que pode ser realizada em larga escala e rapidamente, pode atenuar a temperatura da superfície terrestre das áreas urbanas no Brasil. A consulta a especialistas é fundamental para indicarem o plantio de espécies originais de acordo com o tamanho das vias e calçadas do sistema viário. É comum encontrar árvores impróprias em calçadas que se rompem e dificultam caminhar, que dirá o seu uso por cadeirantes. As espécies podem ser combinadas de modo a oferecer um colorido natural no

⁷ Para uma análise dos riscos ambientais em áreas urbanas ver Garcia-Tornel (2001) e November (2002). Jacobi (1999), por sua vez, organizou uma obra na qual se encontram artigos que tratam do tema.

⁸ Para uma análise do caso de São Paulo, ver Santos (1994, 1993 e 1990) e Carlos (2001).

período de floração. Cidades com mais árvores reduzirão a temperatura da superfície, o que pode diminuir as chuvas de elevada intensidade que se registram nos últimos anos, além de ser muito mais aprazível de se viver.

Outro efeito do aquecimento global será a incidência em maior frequência das chamadas pragas urbanas. As temperaturas mais elevadas propiciarão a ocorrência em maior escala de insetos como cupins e pernilongos, entre outros, que afetam a qualidade de vida dos habitantes. Mesmo em nossos dias não é raro o relato de habitantes que têm suas casas invadidas por cupins, que destroem estruturas, telhados e móveis, algumas vezes a ponto de colocar em risco a habitabilidade do imóvel. Será preciso criar uma campanha de combate às pragas urbanas para evitar que se propaguem a ponto de gerarem dificuldades aos moradores das cidades brasileiras ou que se transformem em vetores de propagação de doenças.

4.2 CHUVAS INTENSAS

O aumento das chuvas intensas pode acarretar no agravamento de problemas já conhecidos dos brasileiros: alagamentos e escorregamentos de encostas.

Os que vivem em fundos de vale, em geral junto a córregos, ou mesmo em áreas de expansão natural dos corpos d'água são alvos potenciais de alagamentos. É fundamental promover políticas para retirar a população dessas áreas, tarefa complexa, já que em alguns municípios isso foi realizado sem eliminar o problema.

A clássica retirada da população não basta. Além disso, é preciso ocupar a área com serviços e equipamentos, ou mesmo mantê-las como áreas naturais, mas com muita fiscalização para evitar que após sua desocupação novas famílias a utilizem para morar, criando uma nova situação de risco aos ocupantes.

Cabe destacar aqui os parques lineares, projeto em implementação no município de São Paulo, que consiste na retirada da população e recuperação ambiental da área. A população é deslocada para outro local, em condomínios populares. Deve-se atentar que a nova localização deve propiciar aos moradores manter os vínculos com a área anterior, já que é nela que eles encontram trabalho e possuem vínculos culturais e afetivos.

Do ponto de vista ambiental, os parques lineares se caracterizam pela reintrodução de espécies que lá viviam. Além disso, eles recebem equipamentos que os tornam aprazíveis e utilizáveis como centros de lazer pela população do entorno. Outra vantagem ambiental é a recuperação da mata ciliar, que mantém a função de reter água e pode propiciar maior oferta hídrica para o município no médio prazo, além de evitar o escorregamento das margens dos corpos d'água e seu assoreamento, o que amplia sua capacidade natural de assimilar a água proveniente das chuvas. Esta é mais uma alternativa que pode ser aplicada em outras realidades do país.

Em relação à ocupação de encostas, a situação é mais grave. Metrôpoles como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Salvador e Recife, para citar alguns exemplos, apresentam elevada concentração populacional em vertentes com mais de 70 graus de declividade, o que é absolutamente inadequado. As edificações não obedecem a critérios técnicos e podem, muitas vezes, colocar em risco seus habitantes.

A autoconstrução agrava esse cenário difícil, dado que a obra avança de acordo com a disponibilidade financeira da família, que acaba vivendo permanentemente no improvisado e, pior, sujeita a queda de lajes e outras partes da habitação, que, exposta às intempéries, desgastam-se de modo precoce. O ciclo parece não ter fim: a falta de dinheiro não permite concluir a obra, que resulta em uma moradia inacabada, edificada sem critérios técnicos definidos nas normas e em um lugar de risco.

Um dos fatores de risco que deve aumentar com as mudanças climáticas é a erosão nas vertentes. Como as chuvas devem ser mais intensas em algumas regiões, a água terá mais velocidade e força para gerar sulcos e transportar sedimentos, causando e/ou acelerando processos erosivos. A erosão pode colocar em risco habitações, ou pior, ocorrer em meio a uma chuva forte, levando o que estiver na superfície, inclusive pessoas e suas moradias. Além disso, uma erosão mais intensa contribui ainda mais para o assoreamento dos corpos d'água, o que aumenta a possibilidade de alagamentos nos fundos de vale.

Para oferecer alternativa à população que vive em encostas íngremes cabe lembrar o projeto desenvolvido em Santos, no Estado de São Paulo, no início da década de 1990. Naquela ocasião foi realizado um mapeamento das áreas de risco em detalhe, salvo engano em escala de 1:5000, a ponto de

se localizarem as edificações em risco de cada encosta. A população foi esclarecida, por meio de uma comunicação direta, do perigo que sua moradia representava à sua vida, o que diminui muito a resistência à transferência para outro local. Além disso, por meio da defesa civil, foi realizado um intenso treinamento para desocupação dos morros em caso de chuvas fortes. O resultado foi expressivo: durante anos não foram registradas mortes em Santos por escorregamento das encostas da Serra do Mar.

Situação semelhante foi desenvolvida em Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro, no final dos anos 1990 e início do século 21. Porém, o abandono dessa estratégia, infelizmente, levou a várias mortes em Angra por ocasião de chuvas torrenciais em meados de 2000.

A desocupação das encostas não será realizada sem resistência. Apesar de necessária, é cara e demorada. Medidas paliativas, como oficinas junto à população para treinar a evacuação da área em caso de chuva forte, são facilmente executáveis e podem evitar a perda de vidas. Mas para enfrentar e resolver esse problema seria preciso retirar a população e oferecer alternativa de moradia, sem deixar de lado os vínculos sociais, culturais e de trabalho que os envolvidos desenvolveram onde vivem.

Uma possibilidade seria a transferência de diversas famílias para um mesmo conjunto, o que manteria ao menos as relações de vizinhança, laços culturais e afetivos. Além disso, seria preciso criar postos de trabalho nas novas áreas de modo a oferecer alternativa para geração de renda dos removidos.

Em relação aos cortiços, a situação é igualmente grave. A presença de muitas famílias em uma única edificação, em si, colabora para sua degradação, dada seu uso intenso e para além do que foi dimensionada. Pior que isso, em geral os cortiços são ilegais, ou seja, alguém aluga o imóvel e o subloca a outras famílias. Por isso, não é freqüente realizar manutenção nas casas, na maior parte das vezes antigas e grandes.

A má condição de conservação torna o imóvel uma área de risco. Chuvas intensas, associadas a ventos fortes, por exemplo, podem destelhar a casa. Além disso, ocorre a penetração da água na estrutura da casa, que pode danificá-la e acarretar no desmoronamento do edifício. Não são raros os casos de mortes e ferimentos graves de habitantes de cortiços pela queda

de elementos construtivos, como tetos, parte de lajes ou mesmo do telhado, após ou durante chuvas intensas.

Essa situação exigiria também a retirada das famílias. Devem ser enfrentados os mesmos problemas que nas encostas íngremes: realocar famílias sem representar perdas de laços culturais, afetivos e de trabalho. Porém, existe um aspecto que distingue os habitantes de cortiços dos que vivem em encostas. Em geral, eles estão no centro da cidade, ou em seu centro expandido, o que permite mais oferta de postos de trabalho a seus moradores. Por isso, pode-se esperar maior resistência à saída do que dos habitantes de morros em áreas periféricas.

Por fim, é importante lembrar que em muitas cidades do país ocorreu, de modo errado, a impermeabilização de corpos d'água e a ocupação de várzeas para instalação do sistema viário. As chuvas fortes devem agravar as já conhecidas enchentes em vias públicas, que geram prejuízos e perdas humanas todos os anos no país.

Nesse caso, a recomendação é radical: desocupar as áreas de várzea e avenidas instaladas em corpos d'água, tal qual já se verificam em cidades como Denver, nos Estados Unidos, e em algumas da Alemanha. Além disso, é fundamental ampliar as linhas de trens e de metrô de modo a oferecer alternativa para o transporte e desestimular o uso de carros.

O patrimônio edificado também será afetado pelas mudanças climáticas. Chuvas intensas e temperaturas mais elevadas vão exigir ainda maior atenção para a manutenção do patrimônio arquitetônico das cidades e metrópoles do Brasil.

A triste situação em que se encontra Ouro Preto (MG), patrimônio da humanidade, não pode se repetir e também não deve ser seguida como exemplo. A degradação dos edifícios históricos, aliada aos poucos recursos para sua conservação, resultou no abandono de quadras, com a conseqüente mudança do uso e retirada da população que vivia na área.

O mesmo se verificou no Pelourinho, em Salvador, cuja intervenção do governo estadual expulsou moradores e destinou a área para fins turísticos (ZANIRATO, 2004), deixando aquela área, também definida como patrimônio da humanidade pela Unesco, sem a presença da população que dava vida àquele lugar. Como resultado, houve uma redefinição do uso do

solo com a instalação de serviços comerciais, de alimentação e de hospedagem para turistas que visam conhecer o lugar.

Chuvas fortes podem afetar o patrimônio edificado tombado e, sem trocadilho, tombá-los. Como decorrência, tem-se um vácuo da memória dos brasileiros que representa o esquecimento do passado do país e a perda de referências históricas, de técnicas construtivas e de beleza. Outro aspecto a considerar é o fim de uma atividade econômica muito em voga e voltada a explorar o patrimônio cultural: o turismo, que perderia sua razão de ser.

4.3 ELEVÇÃO DO NÍVEL DO MAR

As cidades localizadas à beira-mar terão outros focos de vulnerabilidade. Elas devem merecer atenção especial para evitar mortes e prejuízos materiais relevantes.

Uma característica freqüentemente encontrada nas cidades costeiras é a intensa verticalização, que pode ser apreendida em Santos e São Vicente, para citar um aglomerado urbano importante no Estado de São Paulo, e em metrópoles regionais como Fortaleza e Recife, além do Rio de Janeiro, entre outras. Além disso, é comum o uso da orla para circulação de veículos, com vias expressas junto ao mar. O uso da costa terá que ser reavaliado à luz das mudanças climáticas.

A elevação do nível dos oceanos em cerca de 1 metro já seria suficiente para impedir a circulação de carros em grande parte das vias construídas em “aterros” da faixa de praia. Interiorizar as vias não é simples, já que implicaria em desapropriações onerosas em áreas com elevado preço. Será preciso rever o plano de circulação de veículos das cidades litorâneas e reformular o sistema viário. Esse problema deve ficar à cargo do Estado, que tradicionalmente gerencia o fluxo de veículos bem como o planejamento do trânsito.

A elevação do nível da água pode levar ao abandono de edifícios e ao deslocamento de população que vive junto à costa e de centros de serviços instalados em praias. Nesse caso, cabe perguntar quem vai pagar a conta. Ela será assumida somente pelos proprietários privados?

Já para a população de baixa renda, que, por exemplo, vive em palafitas, será necessária uma intervenção de governos estaduais, municipais e federal. A falta de recursos deste segmento social vai exigir uma ação governamental para sua transferência para locais adequados e sem risco.

Outra dificuldade a ser enfrentada pelas cidades costeiras será o destino do esgoto. Lamentavelmente em muitas situações, como no Guarujá, no Estado de São Paulo, o esgoto é coletado e transportado ao mar através de emissários submarinos sem qualquer tratamento prévio. Os cálculos de vazão desse material foram realizados para níveis do mar mais baixo que os projetados pelas mudanças climáticas. Será preciso redimensionar esses dutos, sob pena de ocorrer refluxo do material à cidade, que pode agravar ainda mais a ocorrência de doenças na população.

A presença de indústrias na costa brasileira terá que ser protegida. Centros industriais como Cubatão, em São Paulo, terão dificuldades em manter as unidades fabris com a elevação da água do mar.

A retirada de população ribeirinha pode vir a ser necessária caso não se contenha a água do mar que venha a ser elevar. No Brasil, não são raros os pescadores tradicionais que vivem da pesca e que também terão mais dificuldades para capturar os peixes. Muitos deles devem abandonar sua atividade tradicional e migrar para as áreas urbanas, agravando a demanda por serviços sociais.

Sistemas de contenção das águas do mar serão fundamentais para solucionar as dificuldades citadas acima. É de se registrar que muitos países pobres já possuem planos nacionais de adaptação às mudanças climáticas globais, como é o caso de São Tomé e Príncipe. Nesses casos, com muito enfoque na contenção das águas do mar, que podem servir como orientações para problemas comuns a serem enfrentados no Brasil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não resta dúvida que é “melhor prevenir que remediar”, para lembrar de uma expressão popular. Essa máxima deve ser aplicada às cidades brasileiras quando se analisam as projeções de aquecimento e de alteração no regime de chuvas.

O principal problema decorrente da acelerada urbanização que ocorreu no Brasil foi a concentração da riqueza. Disso resultaram áreas de risco socioambiental que afetaram sobremaneira a população de renda baixa, muito mais sujeita às implicações das mudanças climáticas que qualquer outro segmento.

Por isso, as sugestões centrais deste texto podem ser traduzidas na busca de alternativas para moradia da população de baixa renda do país. Somente com habitação segura, bem edificada e em local correto serão eliminados os efeitos mais perversos das mudanças climáticas no Brasil: a morte de pessoas pobres.

A retirada de população de áreas de risco é a principal recomendação deste trabalho. Cabe ao governo federal sugerir aos países ricos, em especial aos que emitiram mais gases de efeito estufa no passado, que destinem recursos para a construção de moradia popular. Além, é claro, destinar recursos a essa finalidade, assim como os demais níveis de governo.

Outras medidas também serão fundamentais, como as indicadas para atenuar a elevação da temperatura. Cidades mais arborizadas serão mais agradáveis para viver e amenizarão parcialmente o calor. Edifícios adequados às condições tropicais que encontramos em grande parte do território brasileiro é outra recomendação importante que será realizada apenas se houver uma nova regulamentação do Código de Obras, atualmente sob a égide do poder municipal.

Reformular o sistema viário e de coleta de esgotos, em especial nas cidades litorâneas, também será importante. A mudança do uso do solo das avenidas beira-mar e a devolução ao mar de áreas apropriadas por meio de “aterros” também são recomendações importantes. Do contrário, o mar poderá “retomar” seu território de modo “ríspido e sem aviso prévio”.

Outra importante recomendação é que não se deve criar mais uma estrutura burocrática destinada a tratar dos problemas decorrentes do aquecimento global. As dificuldades precisam ser analisadas diante da estrutura administrativa existente e devem envolver ações integradas de diversos ministérios, secretarias estaduais e municipais. Outro aspecto a considerar é a cooperação internacional, que deve ser buscada dentro dos parâmetros estabelecidos na Convenção sobre Mudanças Climáticas, no Fundo para os Países Menos Adiantados e no Fundo Especial de Mudança Climática. Essas e outras fontes podem indicar alternativas técnicas e apoio financeiro para implementar as medidas para adaptação às mudanças climáticas nas cidades brasileiras.

Outra recomendação é atentar à diversidade de sítios urbanos e escalas dos aglomerados urbanos brasileiros. Tal variedade de situações não permite

propor políticas rasas que possam ser aplicadas a todo o país. Cada caso terá que ser estudado considerando suas peculiaridades.

A busca de tecnologias que atenuem as alterações previstas é outro aspecto relevante e que também pode resultar em divisas ao país. Exportar conhecimento e alternativas técnicas para mitigar e adaptar a população e as cidades às mudanças climáticas é outra meta a ser alcançada. Recomenda-se a elaboração de editais de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias com estes fins.

Porém, como as técnicas não são neutras, elas têm de ser induzidas para a resolução de problemas socioambientais. Do contrário, perderemos mais uma chance de melhorar as condições de vida de parte expressiva da população do país, que ainda está alijada dos benefícios que o consumo de combustíveis fósseis geraram, mas que será a mais afetada pelas mudanças climáticas em nossas cidades.

Estamos diante de mais uma oportunidade para enfrentar problemas resultantes da urbanização desigual do Brasil. Com ou sem mudanças climáticas eles terão que ser solucionados.

REFERÊNCIAS

- ARNELL, Nigel W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socioeconomic scenarios. *Global Environmental Change*, n. 14, p. 31–52, 2004.
- BECK, Ulrich. *La sociedad del riesgo: hacia una nueva modernidad*. Barcelona: Paidós, 1986.
- BOHLE, Hans G.; DOWNING, Thomas E.; WATTS, Michael J. Climate change and social vulnerability: toward a sociology and geography of food insecurity. *Global Environmental Change*, v. 4, n. 1, p. 37-48, 1994.
- BURTON, Ian. Vulnerability and adaptive response in the context of climate and climate change. *Climatic Change*, n. 36, p.185–196, 1997.
- CAPEL, Horacio. *La morfología de las ciudades: sociedad, cultura y paisaje urbano*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 2002. V. I.
- _____. *La cosmópolis y la ciudad*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 2003.
- CARLOS, Ana Fani. *Espaço-tempo na metrópole*. São Paulo: Contexto, 2001.

- CASTELLS, Manuel. *A questão urbana*. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1982.
- DEGAETANO, Arthur T. A temporal comparison of drought impacts and responses in the New York city metropolitan area. *Climatic Change*, n. 42, p. 539–560, 1999.
- GARCÍA-TORNEL, Francisco Calvo. *Sociedades y territorios em riesgo*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 2001.
- JACOBI, Pedro. *Cidade e meio ambiente: percepções e práticas em São Paulo*. São Paulo: Annablume, 1999.
- KOUSKY, Carolyn; SCHNEIDER, Stephen H. Global climate policy: will cities lead the way?. *Climate Policy*, n. 3, p. 359–372, 2003.
- LOMBARDO, Magda A. *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo: HUCITEC, 1985.
- MITCHELL, James K. *Megacities and natural disasters: a comparative analysis*. *GeoJournal*, n. 49, 2, p. 137-142, 1999.
- NOVEMBER, Valérie. *Les territoires du risque*. Berna: Peter Lang, 2002.
- POCHMANN, Marcio; AMORIM, Ricardo (Org.). *Atlas da exclusão social no Brasil*. São Paulo: Cortez, 2003.
- ORTIZ, Renato. *A moderna tradição brasileira*. São Paulo: Brasiliense, 1989.
- RIBEIRO, Wagner Costa. Em busca da qualidade de vida. In: PINSKIE, Jaime; PINSKIE, Carla (Org.). *História da cidadania*. São Paulo: Contexto, 2003. p. 399-417.
- _____. Mudanças climáticas: realismo e multilateralismo. *Terra Livre*, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 75-84, 2002.
- _____. *A ordem ambiental internacional*. São Paulo: Contexto, 2001.
- SANTOS, Milton. *Por uma economia política da cidade*. São Paulo: HUCITEC, 1994.
- _____. *A urbanização brasileira*. São Paulo: HUCITEC, 1993.
- _____. *São Paulo: metrópole fragmentada corporativa*. São Paulo: Nóbél, 1990.
- SINGER, Paul. *Economia política da urbanização*. São Paulo: Brasiliense, 1977.

TUTU, Desmond. No necesitamos un apartheid en la adaptación al cambio climático. In: PROGRAMA de las Naciones Unidas para el Desarrollo: informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. Madrid: [s.n.], 2007.

VEIRET, Ivette. *Os riscos*. São Paulo: Contexto, 2007.

ZANIRATO, Silvia. A restauração do Largo do Pelourinho: edificações tão bonitas de ser ver, histórias não tão bonitas de se contar. *Revista de História*, Vitória, v. 16, p. 323-344, 2004.

Resumo

Evidências científicas, apresentadas no quarto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas de 2007, não deixam dúvidas que o planeta está aquecendo. Mais que isso, ele quase não deixa dúvidas que a ação humana é um dos fatores mais relevantes nesse processo.

Não foi por outra razão que ele obteve tamanha repercussão. A imprensa deu enorme visibilidade ao texto, o que despertou na sociedade mundial, e, até certo ponto, na brasileira, uma curiosidade sobre o tema.

Porém, o papel dos governos é antecipar aos eventos que possam colocar em risco parcelas relevantes da população do Brasil. Por isso, é fundamental elaborar políticas públicas capazes de atenuar os efeitos do aquecimento no território brasileiro. Para tal, é importante ter claro que as diferenças sociais com as quais convivemos podem ser, mais uma vez, fonte de agravamento das desigualdades. Segundo apontam os estudos do IPCC, a população carente é mais sujeita às ameaças da elevação da temperatura, o que pode acarretar em mortes, migração e novas formas de pressão social.

Este trabalho procura contribuir para a elaboração de políticas públicas que possam amenizar as conseqüências do aquecimento global no Brasil. As enormes diferenças de acesso à informação e aos meios de se preparar para as alterações provenientes do clima da sociedade brasileira não podem ser esquecidas. Ao contrário, elas devem ser o ponto de partida das ações governamentais na busca da diminuição de disparidades sociais no país.

Para contextualizar a dimensão do problema nas cidades brasileiras, o texto inicia com uma apresentação da urbanização no Brasil. Depois, trata de algumas fontes de emissão de gases estufa em cidades e metrópoles do país. Além disso, sugere medidas para atenuar os impactos do aquecimento global à população. Conceitos de adaptação, vulnerabilidade e risco socioambiental são destacados para que possam orientar a elaboração de alternativas para enfrentar as dificuldades

decorrentes da elevação da temperatura planetária. Por fim, aborda algumas situações de risco e formas de adaptação em cidades brasileiras em três eixos de problemas: aumento da temperatura; chuvas intensas; e elevação do nível do mar. Para encerrar, têm-se as considerações finais, que sintetizam o texto.

Palavras-chave

Mudanças climáticas, vulnerabilidade, Brasil, cidade, adaptação.

Abstract

Scientific evidences presented in the fourth report of the Intergovernmental Panel of Climate Change of 2007 are the proof that the planet is getting warmer. The document stated that human action is one of the process' key factors and that is why the report had so much repercussion. The press has given great importance to the text, which made the global society, and, to some extent, Brazilians, curious about the subject.

However, the role of governments is to anticipate events that may endanger a segment of the Brazilian population. It is crucial to develop public policies, which can mitigate the effects that the warming can have on the Brazilian territory. For that, it is important to clearly understand that social differences with which we live with can, once again, worsen inequalities. IPCC studies indicate that the poor are more subject to threats brought by temperature elevation, which can lead to death, migration and new forms of social pressure.

This paper seeks to contribute to the elaboration of public policies that can alleviate the consequences of global warming in Brazil. The huge differences in access to information and the means to prepare for changes in the Brazilian society cannot be forgotten. Instead, they should be the point of departure of government actions seeking to reduce the social disparities in the country.

To contextualize the scale of the problem in Brazilian cities, the text starts with a presentation of urbanization in Brazil. Then, presents some of the sources of greenhouse gases emission in cities and metropolis of the country. Moreover, suggests measures to mitigate global warming impacts on the population. Concepts of adaptation, social vulnerability and risk are emphasized to provide guidance to the development of alternatives to deal with the difficulties brought by the elevation of the planetary temperature. Finally, expands on some high-risk situations and how to adapt in Brazilian cities in three axes of problems: increased temperature, heavy rains and sea level rise. To close, the final considerations, which summarize the text.

Keywords

Climate change, vulnerability, Brazil, city, adaptation.

O autor

WAGNER COSTA RIBEIRO é geógrafo e professor associado do Departamento de Geografia e do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (Procam/USP), onde coordena o Grupo de Estudos em Ciências Ambientais do Instituto de Estudos Avançados. Foi presidente do Procam e editor da revista Terra Livre. Realizou estudos de pós-doutorado na Universidade de Barcelona e foi professor visitante na Universidade de Sevilla (Espanha).

INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade aos efeitos do clima pode ser definida como “conjunto de características de uma pessoa ou grupo que determina a sua capacidade de antecipar, sobreviver, resistir e recuperar-se dos impactos dos fatores climáticos de perigo” (BLAIKIE et al., 1994). O IPCC a define como “o grau de suscetibilidade de indivíduos ou sistemas ou de incapacidade de resposta aos efeitos adversos da mudança climática, incluindo-se a variabilidade climática e os eventos extremos” (IPCC, 2001).

Os possíveis impactos na saúde das populações humanas, decorrentes de processos conseqüentes à mudança climática global, têm sido objeto de atenção não apenas por instituições acadêmicas e governos nacionais, mas também por órgãos e programas intergovernamentais, específicos do setor saúde. Entre esses, devem ser destacados, inicialmente, a comissão de saúde do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) que, a partir do seu segundo relatório de avaliação (1996), incluindo o recente relatório lançado em 2007 (quarto relatório de avaliação) tem procurado reunir conhecimentos sobre as inter-relações entre clima e saúde, tanto nos relatórios gerais produzidos a cada cinco anos, como em relatórios especiais, como foi o caso daquele que tratou de transferência de tecnologias. (McMICHAEL; CONFALONIERI; GITHEKO et al, 1999). Paralelamente ao processo de avaliação desse Grupo II do IPCC (Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade), a Organização Mundial da Saúde (OMS) também tem procurado atualizar as evidências disponíveis sobre impactos do clima na saúde humana, o que resultou na publicação de dois volumes sobre o tema, sendo um em 1996 e outro em 2003 (WHO, 1996; McMICHAEL et al., 2003). Ainda a OMS,

por meio de seu Escritório Regional para a Europa publicou, em 2003, um volume tratando dos “Métodos para a Avaliação da Vulnerabilidade da Saúde Humana e a adaptação da Saúde Pública às Mudanças Climáticas” (WHO, 2003).

Um dos aspectos mais importantes no estudo das relações entre clima e saúde humana diz respeito à análise da vulnerabilidade sócio-ambiental da população. A aplicação do conceito de vulnerabilidade é fundamental para o mapeamento das populações sob maior risco de serem atingidas e, conseqüentemente, a tomada de decisão acerca de medidas de adaptação ou proteção da população contra os efeitos deletérios do clima na saúde.

Poucos países, até hoje, elaboraram estudos de impactos de mudança climática incluindo um componente específico de saúde. Entre esses podemos citar os EUA (PATZ et al., 2000; USGCRP, 2000; 2001), Reino Unido (UK-DH, 2001), Japão (ANDO et al., 1998), Bolívia (BOLÍVIA, 2000), Antígua e Barbuda (O’MARDE & MICHAEL, 2000), Nova Zelândia (WOODWARD et al., 2001), Austrália (McMICHAEL, 2002); Portugal (CASEMIRO et al., 2002).; Canadá (RIEDEL, 2004); Alemanha (ZEBISCH et al., 2005); Finlândia (RASSI & RYTKONEN, 2005); Espanha (MORENO, 2005); Japão (KOIKE, 2006) e Holanda (BRESSER, 2006).

Este trabalho apresenta o texto atualizado daquele que foi publicado em 2005, no “Caderno NAE Mudança do Clima”. A necessidade de atualização se deve a produção de novos conhecimentos sobre o tema, no período decorrido entre 2005 e 2007. Os resultados apresentados têm como referência três processos independentes que vieram a ampliar a perspectiva sobre mudanças climáticas no mundo e no Brasil e sua importância para a saúde pública, sendo eles:

- O Quarto relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC AR4, 2007);
- A conclusão do projeto “Análise da Vulnerabilidade da População Brasileira aos Efeitos da Mudança Climática sobre a Saúde”, executado pela Fiocruz, com financiamento do MCT (2006);
- A conclusão da 1ª etapa do projeto do CPTEC sobre Modelagem de Cenários Regionais de Clima para o Brasil (2007).

Esse último (MARENGO et al., 2007) diz respeito à construção de cenários regionalizados de clima futuro, importantes para estudos de avaliação de impactos das mudanças climáticas no Brasil. Os trabalhos foram conduzidos nos âmbitos de diferentes projetos coordenados pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (Inpe/Ministério da Ciência e Tecnologia) e tiveram como produtos principais Modelos Climáticos Regionais, de alta resolução de (50 km, na horizontal), para o período 2071-2100. Foram projetadas – com graus variáveis de confiabilidade – anomalias de temperatura e precipitação (relativas às médias históricas de 1961-1990) para as diversas regiões do país, de acordo com dois cenários básicos do IPCC: A2 (altas emissões de gases produtores do efeito estufa) e B2 (baixas emissões).

Baseando-se em médias de diferentes modelos de circulação geral da atmosfera (GCM) todos os modelos, regionalizados para o Brasil, apontaram para um aquecimento que tende a se intensificar até 2080, em graus variáveis, para todas as regiões do país. As incertezas foram maiores em relação às projeções de chuvas, especialmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Em relação à precipitação, a região que apresentou maior confiança nas projeções de clima futuro (2071-2100) foi a Nordeste, principalmente para o pico da estação chuvosa (março a maio). Os cenários apontaram para chuvas mais fracas nesse período e uma tendência de extensão da deficiência hídrica por praticamente todo o ano, nessa região. Da mesma forma, foi projetado um aumento na temperatura e redução de chuvas para a Região Amazônica, embora com menor grau de confiança.

Nos Capítulos III e IV deste texto serão analisados brevemente os documentos 1 e 2, separadamente e, posteriormente, reunidos os resultados dos mesmos, e aplicados à situação da saúde pública no Brasil.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

Os possíveis impactos da mudança climática na saúde coletiva – uma preocupação recente da ciência – trouxeram um aspecto novo para a pesquisa nas disciplinas da saúde pública, especialmente para a epidemiologia, que tem, como seu objeto, o estudo dos determinantes e da distribuição dos agravos à saúde nas populações humanas. Os esforços têm se concentrado no desenvolvimento de novas abordagens metodológicas para a avaliação dos impactos do clima na saúde.

O Quarto Relatório do IPCC (CONFALONIERI e MENNE, 2007) apontou a existência de duas abordagens principais, no estudo das relações entre o clima e a saúde humana:

- a) Estudos empíricos;
- b) Modelagem preditiva.

Os “estudos empíricos” podem ser dos seguintes tipos:

- 1) Estudos espaciais onde o clima é uma variável explicativa na distribuição da doença ou de seu vetor;
- 2) Estudos temporais que avaliam os efeitos na saúde da variabilidade climática, em escala interanual ou decadal, ou mudanças de curto prazo (diárias, semanais) na temperatura e precipitação;
- 3) Análises dos impactos na saúde dos eventos extremos isolados;
- 4) Estudos experimentais de laboratório e campo sobre a biologia de vetores e de patógenos e sua regulação pelo tempo e clima;
- 5) Estudos de intervenção que investigam a eficácia de medidas de saúde pública para proteger a população dos riscos climáticos.

O grande desafio para a realização dos estudos empíricos é a necessidade de se analisar, nos estudos temporais, longas séries de dados, tanto epidemiológicos quanto climáticos, raramente disponíveis em países em desenvolvimento. Nos estudos populacionais de observação, em geral (ou seja, os não experimentais) há também a necessidade de se separar o que são os efeitos das variáveis não climáticas sobre a saúde, frequentemente confundidos com os efeitos dos fatores climáticos.

A “modelagem preditiva” é a representação quantitativa das relações entre as variáveis de um sistema complexo, que é posteriormente avaliada de acordo com a consistência com os dados empíricos observados. Pode ser de dois tipos básicos (ROGERS e RANDOLPH, 2006):

- *Modelos biológicos*, que descrevem, no caso das doenças infecciosas, alguns aspectos do processo de transmissão e como eles seriam afetados pela mudança climática. A única endemia sensível ao clima para qual esse tipo de modelo foi desenvolvido é a malária. Entretanto, a malária é uma doença complexa, de modelagem difícil, e todos os modelos publicados tem parametrização limitada dos fatores que influenciam a sua distribuição/transmissão.

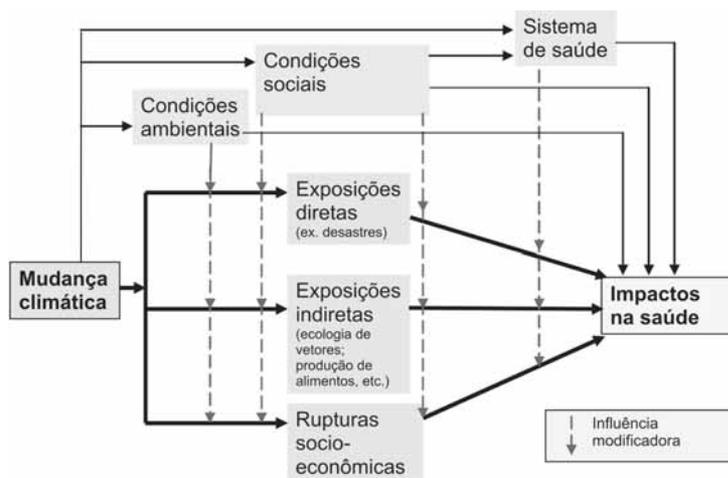
- *Modelos estatísticos*, que procuram ajustar a distribuição atual da doença com as variáveis climáticas conhecidas, dentro de um arcabouço estatístico, no qual são feitas interpolações ou extrapolações dos resultados, para se explorar os possíveis impactos futuros do clima. Apesar das inadequações dessa abordagem, por não representar a dinâmica dos processos de transmissão, esse tipo de modelo pode ser útil quando os conhecimentos dos ciclos biológicos são incompletos.

O QUARTO RELATÓRIO DO IPCC

O Quarto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC AR4) constituiu-se de três Grupos de Trabalho: GT I (Ciência do Clima); GT II (Adaptação, Impactos e Vulnerabilidade) e GT III (Mitigação). No Grupo II, o capítulo 8 trata do tema “Saúde Humana” (CONFALONIERI e MENNE, 2007).

Este capítulo, elaborado por uma equipe de oito pesquisadores de diferentes nacionalidades, analisou, comparou e sintetizou os resultados de cerca de 530 trabalhos científicos e relatórios de pesquisa. O texto apresenta, além de outras informações, os mecanismos por meio dos quais a mudança climática global está afetando ou poderá afetar a saúde das populações humanas. Estes mecanismos estão ilustrados na Figura 1.

Figura 1. Diagrama esquemático dos mecanismos através dos quais a mudança climática afeta a saúde, segundo o IPCC



Em resumo, o que mostra a Figura é que são três os principais mecanismos:

- Influências diretas dos fatores físicos do clima sobre a fisiologia e integridade do corpo humano (ondas de calor afetando o sistema circulatório, traumas e afogamentos em tempestades e inundações, etc.);
- Transformações ambientais induzidas pelo clima, afetando determinantes da saúde humana (por exemplo, queda na produção agrícola, afetando o estado nutricional; aumento de população de vetores de agentes infecciosas que aumentam o risco destas doenças, etc.);
- Efeitos indiretos por meio de rupturas sociais geralmente determinadas por desastres climáticos (secas prolongadas, causando migrações de refugiados, etc.).

Esses efeitos são modulados por meio tanto de fatores naturais (características ambientais) como fatores sociais, tais como a eficiência do sistema de saúde e de ações institucionais (linhas verticais do diagrama).

O IPCC, no seu AR4, reconheceu apenas os seguintes efeitos, já observados, do clima global alterado sobre a saúde humana e seus fatores de risco:

- Aumento da morbidade e mortalidade por ondas de calor, em especial o evento de 2003 no verão Europeu, que vitimou fatalmente cerca de 32.000 pessoas, a maioria, idosos;
- Redistribuição espacial da encefalite transmitida por carrapatos, com extensão de sua distribuição para as latitudes mais altas, na Escandinávia, e para maiores altitudes nas montanhas da Europa Central;
- Aumento da concentração de pólen alergênico na atmosfera, com conseqüente aumento do risco de alergias respiratórias, em função da antecipação da primavera, no hemisfério norte.

O registro desses efeitos, observados, basicamente, no Hemisfério Norte, especialmente na Europa, reflete um maior investimento em pesquisas

nesta área e não uma distribuição desigual dos impactos do clima, em nível global.

Como efeitos futuros (projetados), o comitê de saúde do IPCC - AR4 reconheceu os seguintes impactos:

- Alterações na distribuição espacial e intensidade da transmissão de doenças infecciosas endêmicas, especialmente aquelas transmitidas por vetores, tais como a malária, a dengue, as leishmanioses, a febre do Oeste do Nilo, etc;
- Risco aumentado de diarreia, especialmente em crianças, em função da piora no acesso a água de boa qualidade, principalmente nas regiões tropicais secas;
- Agravamento no estado nutricional de crianças, com prejuízo para seu desenvolvimento, em áreas já afetadas por insegurança alimentar e que venham a sofrer com períodos prolongados de seca (países em desenvolvimento);
- Aumento no risco de doenças cardiorrespiratórias por causa do aumento na concentração de poluentes da troposfera (especialmente o ozônio), influenciados pela temperatura aumentada;
- Incremento no risco de agravos em grupos populacionais considerados como mais vulneráveis, tais como: crianças; idosos; populações indígenas e comunidades tradicionais; comunidades pobres de zonas urbanas; populações costeiras e populações que dependem diretamente dos recursos naturais afetados pela variação climática.

O capítulo sobre a saúde do AR4 não identificou vulnerabilidades específicas para países ou regiões, pois esta função coube aos autores dos capítulos “regionais” (por exemplo, América Latina). Entretanto, alguns cenários produzidos em nível global, para a ocorrência de doenças tropicais em função das mudanças climáticas mencionam, como era de se esperar, as situações dos diferentes continentes e regiões. Foram analisados, no AR4, basicamente dois trabalhos mais recentes, sendo um sobre cenários de malária (VAN LIESHOUT et al., 2004) e outro para a febre da dengue (HALES et al., 2001).

Embora esses trabalhos tenham procurado produzir informações confiáveis e úteis para os países, falharam em considerar as peculiaridades da dinâmica regional das doenças tropicais estudadas. Assim é que, no trabalho de Van Lieshout e colaboradores, projeta-se “um aumento da malária em áreas em torno do limite sul de distribuição na América do Sul”, afirmativa essa feita desconhecendo-se os antecedentes históricos da distribuição da doença no Brasil (ver discussão na seção “Vulnerabilidades e Adaptação”). Também afirmam esses autores sobre uma “... diminuição na estação (= período) de transmissão na Amazônia e na América Central...”, premissa essa equivocada, já que não há períodos específicos de transmissão de malária na Amazônia (a doença ocorre o ano inteiro, embora com variações estacionais). Da mesma forma, o modelo produzido para cenários globais da dengue (HALES et al, loc cit.) não utilizou dados atualizados de distribuição geográfica para o Brasil, prevendo sua expansão para áreas em que já ocorria.

ESTUDO DE VULNERABILIDADE NO BRASIL

Em 2005 foi concluído, pela Fiocruz, um estudo financiado pelo Programa de Mudança Global do Clima (Ministério da Ciência e Tecnologia), com o objetivo de se construir um indicador sintético de vulnerabilidade da população brasileira aos impactos do clima na saúde (CONFALONIERI et al., 2005a; 2007). O trabalho adotou como modelo conceitual aquele apresentado em artigo anterior (CONFALONIERI, 2005b). Foi um estudo de vulnerabilidade para o período em que foi executado (1996-2001) e não uma modelagem de cenários. A construção de índice composto de vulnerabilidade baseou-se em três componentes principais: componente socioeconômico; componente epidemiológico e componente climático.

O componente socioeconômico utilizou indicadores produzidos pelo IBGE, relativos à renda familiar, nível de educação, qualidade da moradia, densidade urbana, acesso a planos de saúde, indicadores de saneamento, mortalidade infantil e esperança de vida ao nascer.

O segundo componente (epidemiológico) foi relativo a sete doenças infecciosas endêmicas sensíveis às variações do clima: malária, febre do dengue, leishmanioses tegumentar e visceral, cólera, leptospirose e síndrome da hantavirose pulmonar. Foram utilizadas séries de dados para o período

1996-2001, relativos à incidência, letalidade, custos hospitalares e tecnologias para o controle dessas doenças.

Para o componente climático utilizaram-se séries históricas de precipitação pluviométrica, alcançando 42 anos de dados. Foram verificados os eventos extremos, de muita ou pouca chuva, para cada unidade da Federação.

Para cada componente foram agrupados esses indicadores, obtendo-se um índice sintético, variando entre 0 e 1. Assim, o índice sintético de uma dimensão é a média aritmética simples de seus indicadores padronizados. Em uma etapa posterior, atribuiu-se um peso a cada índice sintético, por componente, para o cálculo do índice geral de vulnerabilidade.

Na Tabela 1, a seguir, estão discriminados os valores finais de Índice de Vulnerabilidade Geral (IVG), para cada Estado brasileiro. Quanto mais próximo de 1 for o valor final obtido, maior o grau de vulnerabilidade.

Tabela 1. Classificação dos Estados segundo o IVG

	VALOR	UF
Maior vulnerabilidade 	$0,1 < \text{IVG} \leq 0,2$	RS, MS, DF, PR, RO, SC, AM, GO, AC
	$0,2 < \text{IVG} \leq 0,3$	MG, SP, AP, RJ, MT, ES, RR, PA, TO
	$0,3 < \text{IVG} \leq 0,4$	RN, PB, SE
	$0,4 < \text{IVG} \leq 0,5$	PI, CE, PE, BA, MA
	$0,5 < \text{IVG} \leq 0,7$	AL

Nas figuras 2 e 3 a seguir, os IVGs estão representados graficamente no mapa do Brasil, os valores finais para cada Estado (Figura 3), bem como os diferentes, graus em cada Estado, dos três componentes do IVG (Figura 2).

Figura 2. Mapa dos IVSE, IVE e IVC nos Estados do Brasil (sendo: IVSE – Índice de vulnerabilidade socioeconômica; IVE – Índice de vulnerabilidade epidemiológica; IVC – Índice de vulnerabilidade climática)



Figura 3. Índice de Vulnerabilidade Geral



As conclusões gerais desse estudo, segundo Confalonieri et al. (2005; 2007), foram:

- A metodologia utilizada se revelou adequada para uma caracterização inicial da vulnerabilidade brasileira aos efeitos potenciais da mudança do clima, na saúde;
- Os índices foram construídos para “ordenar” as unidades federadas, ou seja, com o objetivo de se medir o grau de vulnerabilidade relativo, entre os estados;
- A Região Nordeste apresentou-se como a mais vulnerável, segundo os dados do período de estudo;
- Unidade geográfica escolhida foi o Estado, mas a metodologia pode ser aplicada em municípios ou regiões;
- Essa metodologia pode ser ampliada com a inclusão de outros elementos importantes, como a questão alimentar, o ciclo hidrológico, a disponibilidade de água e níveis de poluição atmosférica em grandes zonas urbanas.

O Caso da Região Nordeste

Em relação às perspectivas de impacto das mudanças climáticas na saúde da população do Brasil, merece atenção especial a situação da Região Nordeste. Isto se deve aos seguintes fatores:

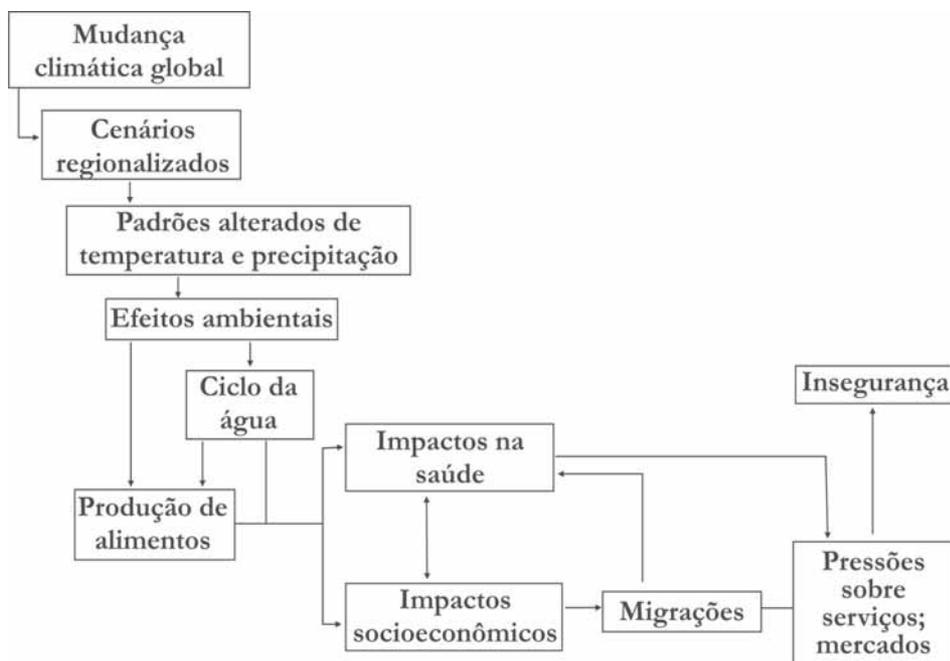
- Os cenários regionalizados de clima apontam para, nas próximas décadas, um aumento de temperatura e diminuição de chuvas na região (MARENGO et al, 2007);
- O Índice de Mudança Climática (CCI) aponta, igualmente, para a Região Nordeste, juntamente com a Região Norte, como as que tendem a ter seu clima mais alterado (BAETTIG et al., 2007);
- O estudo de vulnerabilidade feito pela Fiocruz apontou os Estados da Região Nordeste como os mais vulneráveis aos impactos do clima na saúde (CONFALONIERI et al., 2005; 2007);

- A predominância, na região, de um clima semi-árido, sujeito a secas periódicas e uma população apresentando baixos indicadores socioeconômicos, constituindo-se esta a área seca (*drylands*) com a maior densidade populacional humana, em todo o mundo.

Esse conjunto de características aponta para a Região Nordeste como uma prioridade, no Brasil, para ações visando a avaliação cuidadosa das vulnerabilidades setoriais aos impactos do clima, inclusive para o setor de saúde.

O diagrama a seguir (Figura 4) mostra um provável encadeamento de eventos para a Região Nordeste, na vigência de um cenário climático altamente desfavorável, com redução das chuvas sazonais, acompanhada de aumentos de temperatura.

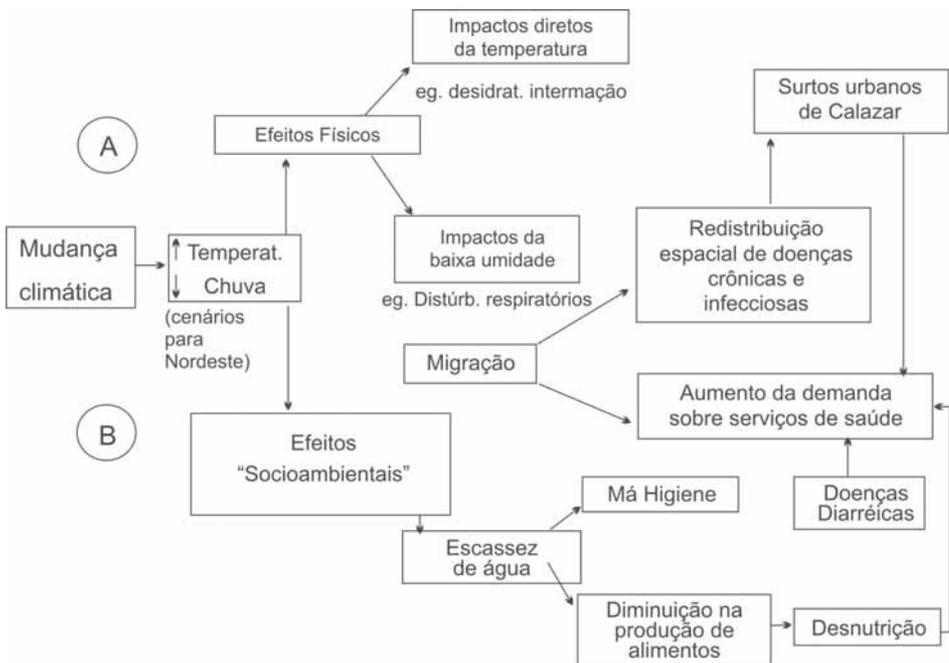
Figura 4. Encadeamento de eventos decorrentes da seca, para a Região Nordeste



Há cerca de 20 milhões de habitantes no semi-árido brasileiro (Ministério da Integração Nacional, 2005), onde a agricultura de subsistência ainda é uma importante atividade econômica. Na ausência de chuvas sazonais – como ocorre nos períodos de seca – essas populações têm, historicamente, migrado do meio rural para as áreas urbanas, em busca de assistência governamental. Assim, o fator mudança demográfica pode se constituir em um dos elementos intermediadores principais entre os fenômenos climáticos extremos (neste caso, a seca) e seus efeitos na economia e na saúde. O deslocamento – intra ou inter-regional – de “refugiados ambientais” significa grandes mudanças na economia regional e aumento da insegurança pública nos pontos de destino dos migrantes, em função do aumento na demanda sobre serviços públicos em geral, incluindo os do sistema de saúde (SUS).

Sob o ponto de vista específico da saúde pública, os possíveis impactos desse complexo processo climático-econômico-demográfico, estão representados na figura 5.

Figura 5. Impactos deste complexo processo climático-econômico-demográfico.



Aplicando-se o conhecimento dos efeitos diretos e indiretos do clima sobre a saúde à situação projetada para a região, temos uma condição de maior complexidade associada aos mecanismos “sócio-ambientais” sobre a saúde (“B”) Em “A” estão os relativamente restritos efeitos diretos do clima. O fator crítico é a escassez hídrica, capaz de afetar o quadro epidemiológico das doenças ligadas à má higiene (por exemplo, diarreias infecciosas infantis), bem como agravar situações de insegurança alimentar que geram desnutrição. Um efeito importante da situação de insegurança alimentar é o desencadeamento de fluxos migratórios – geralmente no sentido rural-urbano – capazes de redistribuir espacialmente tanto doenças crônicas como infecciosas. Os gráficos abaixo (Figuras 6 e 7) mostram registros de aumentos epidêmicos de leishmaniose visceral (calazar) em capitais nordestinas, nos inícios das décadas de 80 e 90, quando a região foi afetada por secas prolongadas. Os fluxos migratórios de pessoas infectadas vindas das zonas rurais endêmicas resultaram na instalação de ciclos peri-urbanos de transmissão da doença (CONFALONIERI, 2003).

Figura 6. Número de casos de Leishmaniose visceral no Estado do Maranhão.

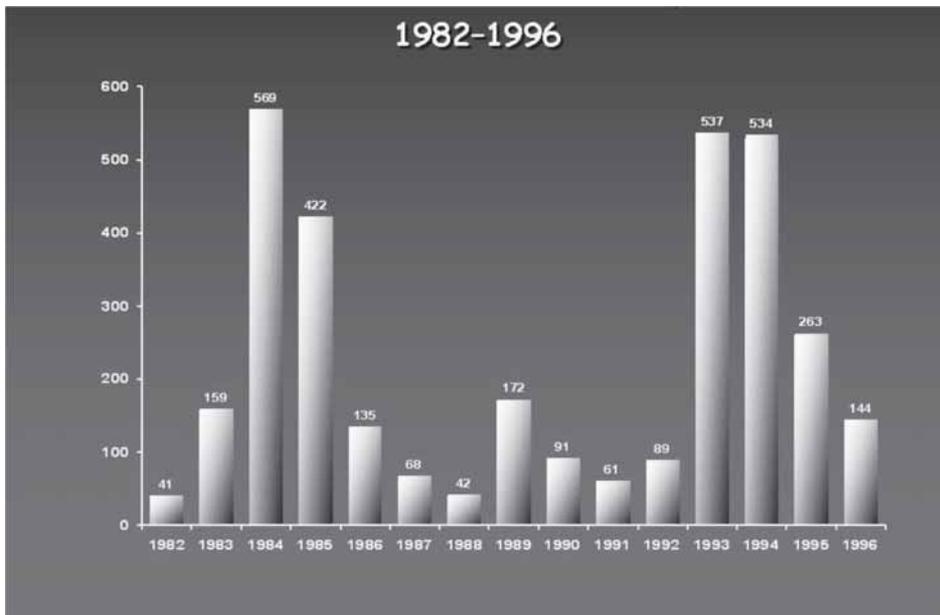
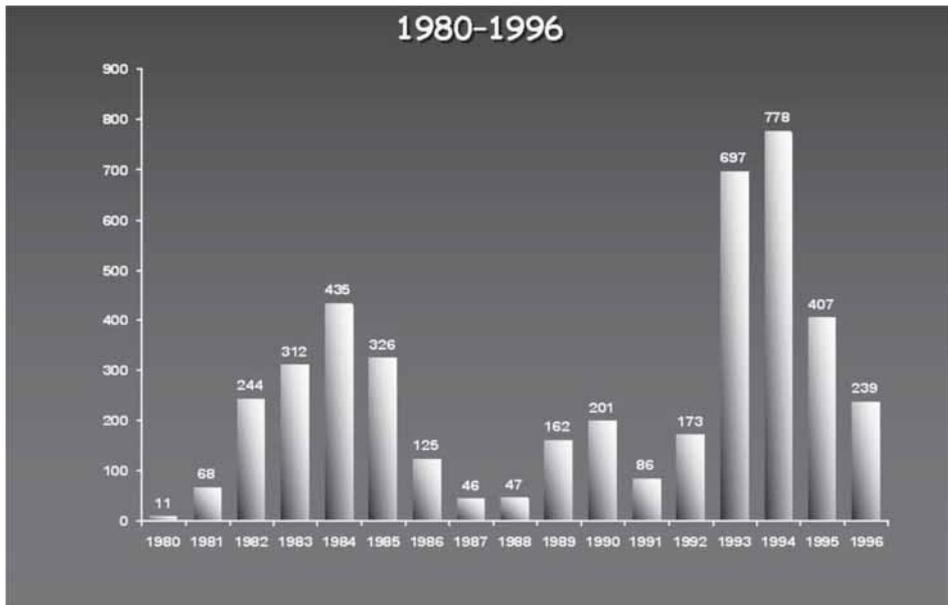


Figura 7. Número de casos de Leishmaniose visceral no Estado do Piauí



VULNERABILIDADES E ADAPTAÇÃO

A atual situação brasileira, frente à ameaça das mudanças climáticas, caracteriza-se, sob o ponto de vista da saúde pública, pelos seguintes aspectos, resumidamente:

- Melhor conhecimento de cenários futuros de clima para o país, com indicação das áreas que, com maior grau de certeza, deverão sofrer as alterações de maior intensidade; como as anomalias extremas de temperatura e precipitação;
- Persistência de situação estrutural de vulnerabilidade, na qual operam diferentes determinantes de um perfil desfavorável de saúde-doença (ex.: expansão da dengue);
- Pouco envolvimento, por parte de Executivo Federal, dos setores do sistema de saúde responsáveis pelos programas de controle de agravos nas discussões sobre um plano nacional de adaptação aos impactos da mudança climática.

O ano de 2007 caracterizou-se pela ampla divulgação do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC, que resultou em grande repercussão internacional e no Brasil. Aqui, os órgãos públicos da administração federal, estadual e municipal tomaram iniciativas de discussão das implantações das estratégias de adaptação à mudança climática global em seus respectivos âmbitos. Em nível federal, destacam-se duas iniciativas importantes:

- A formação de uma rede de pesquisa sobre o tema “Mudanças Ambientais Globais”, com ênfase na questão climática. A sua coordenação ficou no âmbito do Ministério da Ciência e Tecnologia e a Fiocruz ficou como a referência institucional para as questões de saúde;
- Discussões, principalmente no âmbito do Ministério do Meio Ambiente, para a elaboração de um Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas, de caráter interministerial.

A primeira iniciativa visa organizar e integrar os esforços de pesquisa nesta área temática no país, para melhor direcionamento dos recursos de apoio. Os produtos de pesquisas das instituições da rede deveriam, em princípio, subsidiar a elaboração do plano de atividades e iniciativas governamentais para adaptação.

Em nível municipal, alguns governos promoveram recentemente atividades e eventos sobre as perspectivas locais de impactos da mudança do clima e incluíram o tema saúde. Este foi o caso do órgão de planejamento urbano do município do Rio de Janeiro (Instituto de Urbanismo Pereira Passos <www.rio.rj.gov/ipp>) que buscou apoio no setor acadêmico para esse fim, no seminário “Rio: próximos 100 anos”, realizado em outubro de 2007. Todas essas iniciativas demonstram preocupação do poder público em discutir estratégias para o enfrentamento dos riscos e transformações trazidas pela mudança do clima em larga escala.

Com relação especificamente ao setor saúde, não se observou um envolvimento desejável por parte do poder público na discussão de um plano nacional de adaptação às mudanças climáticas. Dois motivos principais podem estar colaborando para isto:

- A enorme carga que representa, para o Ministério da Saúde, e também para as Secretarias Estaduais e Municipais de Saúde, a gestão e financiamento do sistema de atenção à saúde do país (SUS);

- A falta de conhecimentos e *expertise* sobre o tema, por parte de seus técnicos.

A esse respeito, ainda há muita desinformação que aparece também na imprensa como, por exemplo, a respeito da mudança climática global como “desencadeadora de doenças novas”. Mais adiante este aspecto será melhor discutido.

Alguns países vizinhos do Brasil já estão mobilizando os recursos intersetoriais e de saúde para planos de adaptação à mudança do clima. Como exemplos, temos a Colômbia e a Bolívia. Na Colômbia está em elaboração um plano de proteção às mudanças climáticas que envolve três elementos principais: disponibilidade de água, proteção de alguns ecossistemas ameaçados e implantação de sistemas de alerta precoce para surtos de dengue e malária (G. POVEDA, 2007, comunicação pessoal). Na Bolívia foram feitas estimativas de impacto da mudança climática em doenças infecciosas endêmicas, bem como se desenvolvem trabalhos intersetoriais de estratégias adaptativas, em nível local, com participação comunitária (BOLÍVIA, 2000; PARDO et al., 2007).

No Brasil, com os conhecimentos existentes sobre os processos e perfis de saúde de doença e sua distribuição no espaço geográfico, associados com os cenários recém produzidos para o clima para as próximas décadas, podemos destacar os seguintes pontos na discussão sobre estratégias de adaptação:

- a) A preocupação principal deve ser o atual quadro de agravos (acidentes por tempestades, deslizamentos de terra e inundações, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas; doenças infecciosas endêmicas, como a malária, dengue e leptospirose etc) na população, capazes de serem afetados pelas mudanças nos parâmetros do clima. Situações de risco conhecidas podem se agravar por meio de diferentes mecanismos;
- b) Atenção especial deve ser dada às doenças infecciosas endêmicas, especialmente à malária (na Região Amazônica), à febre da dengue, às leishmanioses, à leptospirose e às diarreias infecciosas infantis.

O clima modificado pode alterar a dinâmica da transmissão desses processos, bem como a sua distribuição geográfica. Para que ocorra uma

intensificação e/ou expansão da distribuição é necessária, sob o ponto de vista estritamente climático, a combinação de condições ótimas, tanto de temperatura como de umidade. A ocorrência de apenas um destes parâmetros, isoladamente, não é o suficiente.

Com relação especificamente à malária, há a percepção equivocada de que a endemia viria a se tornar endêmica em áreas fora da Amazônia, por causa do aquecimento. Isso não deve ser esperado já que a doença ocorreu em quase todo o país – inclusive na Região Sul – até há cerca de 60 anos passados. Sua erradicação fora da Amazônia se deu por uma conjugação de esforços de vigilância e controle (tratamento precoce de doentes; combate aos mosquitos vetores) e mudança no uso da terra (desmatamento; urbanização, etc.), que eliminaram a maior parte dos criadouros. Em outras palavras, não há, atualmente, uma limitação climática para a ocorrência da malária, na maior parte do país (excetuando-se períodos de inverno na Região Sul e partes da Sudeste).

Com relação à situação da malária na Região Amazônica, os cenários futuros para a doença, considerando-se apenas os fatores ambientais, dependerão do que vier a acontecer, por influência do clima, tanto com a floresta como, principalmente, com o seu ciclo hidrológico.

A febre da dengue, a outra endemia de ampla distribuição no país e sensível ao clima, sofre influência sazonal. O resultado disto é a sua maior incidência, atualmente, nos períodos de verão. Isto se dá em virtude da persistência de temperaturas e umidade favoráveis bem como a maior exposição da população nesta época do ano. A direção em que ocorrerão as possíveis modificações na epidemiologia da dengue no Brasil vai depender do que acontecer, em nível regional ou sub-regional, com a mudança do clima. Os cenários previstos para a região nordeste, por exemplo, não seriam favoráveis, sob ponto de vista ambiental, ao ciclo da dengue, pois o aumento de temperatura acompanhar-se-ia da redução da umidade e desfavorece o seu desenvolvimento.

- c) Uma questão igualmente relevante para o planejamento e implementação de estratégias de adaptação aos impactos do clima, diz respeito aos aspectos de vulnerabilidade de populações urbanas, principalmente daquelas marginalizadas. Essas são vulneráveis a três riscos principais:

- Deslizamentos de encostas habitadas, durante episódios de chuvas fortes;
- Risco de epidemias de leptospirose, em áreas alagáveis mal servidas por coletas de lixo, durante inundações;
- Exposição a poluentes atmosféricos, como o ozônio, cujas concentrações podem aumentar por efeito de temperaturas mais elevadas.

Historicamente são conhecidos, em várias cidades brasileiras, impactos de chuvas fortes seguidas ou não de inundações, na morbidade e na mortalidade da população humana. Na cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, um levantamento feito para o período 1966-1996 foi capaz de identificar pelo menos, 527 vítimas fatais de acidentes causados por chuvas e inundações.

Da mesma forma, nessa cidade têm ocorrido surtos importantes de leptospirose. Foram relatados 4.643 casos no período 1975-2006, tendo ocorrido em 1996 uma grande epidemia na baixada de Jacarepaguá com 1.797 casos confirmados (CONFALONIERI & MARINHO, 2007). Essa foi uma das maiores epidemias desta doença de que se tem notícia em todo o mundo. Problemas similares são encontrados em outras grandes cidades do país, como resultado de precária infra-estrutura de saneamento e do uso inadequado do solo urbano.

- d) Sob o ponto de vista das vulnerabilidades regionais, deve ser enfatizada, conforme já mencionado, a situação da Região Nordeste do país. Historicamente afetada por secas periódicas, com graves conseqüências econômicas, encontra-se sob risco de uma agravamento de uma situação de aridez, se vierem a ser confirmados os cenários de aumento de temperatura e redução das chuvas sazonais. Faz-se necessária uma estimativa dos possíveis desdobramentos de natureza demográfica, social, econômica e sanitária em face da provável inviabilização da agricultura de subsistência. Isso deve ser avaliado especialmente nas áreas do sertão nordestino que serão afetadas de forma mais severa, segundo os modelos de mudança climática. Sob a perspectiva da saúde pública, pode se tornar de enorme importância, além da piora da situação alimentar, a redistribuição espacial de doenças endêmicas presentes na região. Entre essas se destacam a dengue, o calazar, o esquistossomose e a

doença de Chagas, sendo que apenas esta última se encontra sob controle. Há que se considerar também, os problemas sanitários decorrentes da escassez e má qualidade da água para consumo doméstico, bastante conhecido pelas autoridades sanitárias. Constatou-se em anos de secas severas, associadas ao fenômeno *El Niño*, um aumento significativo das taxas de mortalidade infantil por doenças diarréicas. Embora muitas das estratégias de adaptação fora do setor saúde (agricultura, recursos hídricos, etc.) sejam extremamente importantes para a saúde pública, devem ser pensadas também ações setoriais específicas para redução da vulnerabilidade da população frente aos efeitos do clima extremo. Para essa região, duas estratégias são de relevância mais imediata:

- Melhoria da eficácia dos programas de controle das citadas endemias;
- Aumento da capacidade de atendimento da demanda espontânea na rede do SUS, para todos os agravos, em virtude de fluxos migratórios no sentido rural-urbano;
- Ainda sob o aspecto da vulnerabilidade regional e de acordo com cenários climáticos, devemos pensar em duas situações particulares;
- Redução de chuvas e aumento da temperatura média na Região Amazônica;
- Aumento na frequência de eventos extremos de chuva nas Regiões Sul e Sudeste.

Na Amazônia os possíveis impactos de uma redução de chuvas e aumento de temperatura estão relacionados a quatro aspectos principais:

- Piora na situação de acesso a água de boa qualidade;
- Redução na abundância de itens de subsistência extrativista (exemplo, pescado);
- Aumento da inalação de partículas em fumaça de incêndios florestais;
- Alterações nos ciclos das doenças transmissíveis endêmicas (malária; leishmanioses etc).

A dimensão dos esperados impactos ambientais e na saúde pode ser ilustrada tomando-se como exemplo o episódio de seca na Amazônia central brasileira, ocorrida no ano de 2005. Pequenas comunidades ribeirinhas ficaram isoladas, sem água suficiente e sem possibilidade de pesca em função da secagem de igarapés de acesso (CONFALONIERI & MENNE, 2007; BANCO MUNDIAL, 2005). Esse pode vir a se tornar um quadro comum no cenário de “ressecamento” amazônico, nas próximas décadas.

No que tange à possibilidade da maior ocorrência de eventos extremos de chuva nas Regiões Sul e Sudeste, conforme apontam os modelos, a situação de maior risco resultaria da exposição a tempestades e inundações. Historicamente, nessas regiões, foram registrados eventos de chuva forte e alagamentos com vítimas fatais em diversas ocasiões. Um dos episódios de maior impacto foram as tempestades e inundações associadas ao fenômeno El Niño de 1982-1983 que causaram mais de uma centena de mortes por acidentes nos Estados de Santa Catarina e Paraná. Fatores que colaboram, nestas regiões, para uma maior vulnerabilidade da população a esses eventos foram:

- Alta densidade populacional;
- Relevo acentuado de zonas urbanas;
- Ocupação de áreas de risco por habitações;
- Ausência de um sistema de alerta precoce eficaz.

Uma outra situação de perigo associada globalmente à mudança climática diz respeito ao aumento do nível médio do mar, estimado para atingir até 80 centímetros no final do século 21. Os impactos costeiros resultantes decorrerão principalmente da salinização do solo, com perda de áreas cultiváveis e deterioração de reservatórios de água potável. Pode haver também, devido à erosão, danos à infra-estrutura de saneamento, eletricidade, etc. Os possíveis efeitos na saúde seriam indiretos, por meio dos processos anteriormente citados. O aumento do nível do mar, quando comparado com os outros riscos oriundos de fenômenos climáticos extremos, reveste-se de menor importância para a saúde. As razões para isto são, além dos efeitos indiretos, a instalação lenta do processo, permitindo a implementação de estratégias adaptativas. Além disso, estudos apontam para uma baixa vulnerabilidade física da maior parte do litoral brasileiro a este fenômeno. (MAGRIN; GARCIA et al., 2007).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

1. Os fatores estruturais que determinam a vulnerabilidade do país e da população aos efeitos das mudanças climáticas globais na saúde persistem e só poderão ser reduzidos através de políticas públicas a médio e longo prazos. Essas políticas devem atender aos seguintes aspectos:

- Educação e acesso à informação;
- Geração de emprego e renda;
- Melhoria da habitação;
- Sistema de saúde e controle de endemias;
- Uso adequado do solo urbano;
- Segurança alimentar;
- Saneamento básico adequado.

2. É necessária uma atualização e ampliação do estudo anterior de vulnerabilidade (CONFALONIERI et al, 2005;2007), por meio da incorporação de dados e informações de outros setores que sejam de relevância direta como determinantes do estado de saúde da população. É preciso entender, como prioridades, como a mudança do clima afetará a segurança alimentar e a disponibilidade de água para consumo humano.

3. É igualmente importante a extensão dos estudos de modelagem climática regional para a produção de cenários de clima para períodos não tão distantes no tempo. Há condições de se realizar uma melhor integração de cenários de clima com projeções demográficas, socioeconômicas e ambientais para o período de 2020 a 2050, do que possível com os cenários existentes do final do século 21.

4. Como parte dos novos estudos de cenários para as próximas décadas devem ser contempladas avaliações para os ecossistemas naturais. Além de sua relevância para a conservação da diversidade biológica, esses sistemas albergam grande número de espécies vetoras e reservatórios de agentes infecciosos e parasitários humanos. Muitas das doenças tropicais endêmicas no país tem esta natureza “focal”, que poderá vir a ser radicalmente alterada em situações climáticas futuras.

5. Diferentes estudos convergem no sentido de apontar as Regiões Norte e Nordeste como as que deverão sofrer os maiores impactos da mudança do sistema climático, nas esferas ambiental, socioeconômica e de saúde. Embora uma abrangência nacional seja desejável para um plano de adaptação às mudanças climáticas, este deve conter estratégias claramente definidas para atender às necessidades dessas duas regiões.

6. Considerando-se o conjunto atual de evidências pode-se afirmar que as seguintes medidas gerais de adaptação estariam adequadas para o setor saúde:

- Aperfeiçoamento dos programas de controle daquelas doenças infecciosas de ampla dispersão no país com altos níveis de endemicidade e sensíveis ao clima, especialmente a malária e a dengue;
- Redução dos condicionantes gerais da vulnerabilidade social da população sob risco de sofrerem agravos à saúde (doenças infecciosas e acidentes, principalmente), por meio de políticas econômicas, educacionais e de habitação;
- Criação de sistemas de alerta precoce conjugando-se a previsão de eventos climáticos extremos com mapas de vulnerabilidade e planos de contingência que envolva assistência de saúde, em caráter especial.

7. Deve ser buscada uma maior participação do Ministério da Saúde nos esforços para a elaboração, em nível federal, de um Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas.

8. Para o setor saúde não deve ser esperado o surgimento de “doenças novas” e sim a exacerbação de situações e agravos conhecidos. As ações adaptativas específicas do setor saúde devem privilegiar a redução da incidência das doenças infecciosas endêmicas, e a redução da exposição de populações urbanas aos riscos climáticos, pelo desenvolvimento de sistemas de alerta precoce para eventos extremos.

9. O momento para o desenvolvimento de estudos visando subsidiar os processos de adaptação à mudança do clima é extremamente favorável pela recente sensibilização e mobilização de setores da sociedade mundial e brasileira (governo, empresas, imprensa, academia) em torno do tema. Para

isto contribuiu de forma fundamental o Quarto Relatório do IPCC e suas conclusões, para cuja validação social contribuiu o Prêmio Nobel da Paz recebido em 2007.

REFERÊNCIAS

BAETTIG, M.; WILD, M.; IMBODEN, D. M. A climate change index: where climate change may be most prominent in the 21st century. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007.

BANCO MUNDIAL. *Drought in the Amazon: scientific and social aspects: report of a World Bank Seminar*, December 12, 2005. Brasília, 2005.

BOLÍVIA. Viceministerio de medio Ambiente, Recursos Naturales y Desarrollo Forestal. Programa Nacional de Cambio Climático. *Vulnerabilidad y adaptacion de la salud humana ante los efectos del cambio climático em Bolivia*. La Paz, 2000. 111 p.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. *Nova delimitação do semi-árido brasileiro*. Brasília, 2005.

BRESSER, A. *The effect of climate change in the Netherlands*. [S.l.]: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2006. 112 p.

CONFALONIERI, U. E. C. Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil. *Terra Livre*, São Paulo, v. 19-I, n. 20, p. 193-204, 2003.

_____. Mudanças climáticas e saúde humana. In: POPPE, M. K; LA ROVERE, E. L (Coord.). *Mudança do clima*. Brasília: [s.n.], 2005b. p. 166-171. (Cadernos NAE, n. 3).

_____; MARINHO, D. P. *Mudança climática global e saúde: perspectivas para o Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Instituto Pereira Passos, 2007. 19 p.

_____; RODRIGUEZ, R. R. *Integrating data for the assessment of national vulnerabilities to the health impacts of climate changes: a novel methodological approach and a case study from Brazil*. [S.l.: s.n.], 2007. Climatic change. No prelo.

_____ et al. *Análise da vulnerabilidade da população brasileira aos impactos sanitários das mudanças climáticas: resultados obtidos: PPA/Programa de Mudanças Climáticas*. Brasília: MCT, 2005. 201 p. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/50785.html>>. Acesso em: 2008.

_____. Human health. In: PARRY, M. L. et al (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, United Kingdom:

Cambridge University Press, 2007. 976 p. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

HALES, S. et al. Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: an empirical model. *Lancet*, n. 360, p. 830-834, 2001.

HASSI, J. et al. Impacts of cold climate on human heat balance, performance and health in circumpolar areas. *International Journal Circumpolar Health*, n. 64, p. 459-67, 2005.

KOIKE, I. *State of the art findings of global warming: contributions of the japanese researchers and perspective in 2006: the second report of the global warming initiative, climate change study group*, Ministry of Environment, Japan, Tokyo. [S.l.: s.n.], 2006. p.165-173.

MAGRIN, G. et al. Latin America. In: PARRY, M. L. et al (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. p. 581-615. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

MARENGO, J. A. et al. *Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI*. Brasília: MMA, 2007. 54 p.

MCMICHAEL, A. J. et al. Human health. In: SPECIAL report on methodological and technological issues in technology transfer, Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, Working Group II. [S.l.]: Cambridge Press, 2007. Cap. 14, p. 329-347.

MORENO, J. *A preliminary assessment of the impacts in Spain due to the effects of climate change: ECCE project final report*. Madrid: Universidad de Castilla-La Mancha, 2005.

PARDO, I. A.; CÁRDENAS, M. A.; EFFEN, M. A. *El cambio climático Bolivia: análisis, síntesis de impactos y adaptaciones*. La Paz: Ministério de Planificación y Desarrollo, 2007.

RIEDEL, D. Human health and well-being: climate change: impacts and adaptation: a canadian perspective. In: LEMMEN, D.; WARREN, F. (Ed.). *Climate change impacts and adaptation directorate*. Ottawa: Natural Resources Canada, 2004. Cap. 9, p. 151-171.

ROGERS, D. J; RANDOLPH, S. E. Climate change and vector-borne diseases. *Advances in Parasitology*, n. 62, p. 345-381, 2006.

VAN LIESHAUT, M. et al. Climate change and malaria: analysis of the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, n. 14, p. 87-99, 2004.

ZEBISCH, M., T. et al. *Climate change in Germany: vulnerability and adaptation of climate sensitive sectors*. Dessau: Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), 2005. 205 p.

Resumo

A partir de atualizações recentes nos conhecimentos do processo de mudança climática global e seus possíveis impactos, representados pelo Quarto Relatório de Avaliação do IPCC e pelo estudo de vulnerabilidade da saúde, realizado no Brasil, são discutidas as possíveis implicações da mudança climática para o Brasil, no que diz respeito aos impactos na saúde da população. São destacadas as formas por meio das quais os fenômenos climáticos e meteorológicos podem afetar a saúde; quais as projeções globais para os impactos setoriais nas próximas décadas e como se abordam cientificamente estas situações. É feita uma rápida avaliação das principais vulnerabilidades brasileiras, representadas por problemas estruturais de ordem sócio-ambiental, institucional e epidemiológica. Ressalta-se a vulnerabilidade da região Nordeste do Brasil aos impactos do clima na saúde, pela sua situação de semi-aridez, por mostrarem os modelos uma tendência à redução de chuvas e aumento de temperatura, nas próximas décadas, e por apresentar baixos indicadores sociais e um alto nível de morbi-mortalidade por agravos sensíveis às variações do clima. Para o setor saúde, no Brasil, não deve ser esperado o surgimento de “doenças novas” e sim a exacerbação de situações e agravos conhecidos. As ações adaptativas específicas do setor saúde devem privilegiar a redução da incidência das doenças infecciosas endêmicas (principalmente da malária e da febre da dengue), e a redução da exposição de populações urbanas aos riscos climáticos, decorrentes de tempestades e inundações, pelo desenvolvimento de sistemas de alerta precoce para eventos extremos.

Palavras-chave

Mudança climática global. Saúde. População. Vulnerabilidade. Clima.

Abstract

From recent publications that update the knowledge of the process of global climate change and its impacts – the IPCC Fourth Assessment Report and the recent Brazilian study on vulnerability to the health impacts of climate – the possible implications for population health of climate change in Brazil are discussed. The different ways through which a changing climate may affect health are emphasized, as well as the global projections for the health impacts in the coming decades and the scientific approach to the problem. It briefly reviews the main factors determining the Brazilian vulnerability to the impacts of climate, especially the structural socioeconomic, environmental, institutional and sanitary problems. It stresses the vulnerability of the Brazilian northeastern region due to its semi-arid climate, to the projected reduction of precipitation and the increase in temperature of the region, and also due to its poor socioeconomic and health indicators, mainly the high incidence of infectious diseases sensitive to climate. For the health sector in Brazil climate change may exacerbate existing chronic situations rather than bring new problems. The adaptive actions for health should prioritize the reduction of endemic diseases (especially malaria and dengue) and the reduction of urban population exposure to climatic risks resultant to storms and floods, though the development of early warning systems.

Keywords

Global climate change. Health. Population. Vulnerability. Climate.

O autor

ULISSES EUGENIO CAVALCANTI CONFALONIERI é médico e veterinário, e doutor em Parasitologia (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro/Universidade da Califórnia, Berkeley/USA). Atualmente é pesquisador titular do Centro de Pesquisas René Rachou, Fiocruz (MG). Coordena atualmente o Projeto de Mudanças Ambientais Globais e Saúde do Programa Earth System Science Partnership (International Council for Science, Paris).

Apêndice

Recomendações para iniciativas de C,T&I

Este apêndice apresenta as principais recomendações para iniciativas de ciência, tecnologia e inovação referentes a vulnerabilidades à mudança do clima, a riscos e impactos dela decorrentes, e a adaptação a essas mudanças. Essas recomendações foram extraídas dos artigos apresentados nesta Revista e adaptadas pelos respectivos autores, oferecendo uma indicação preliminar para subsidiar a formulação de políticas e estratégias para C, T & I no Brasil.

CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA PARA A AMÉRICA DO SUL

- Desenvolvimento e implementação de um modelo brasileiro de mudanças climáticas globais, de classe mundial, para uso em geração de cenários climáticos globais para o Século 21, utilizando a capacidade de supercomputação a ser instalada no Brasil em 2009 (supercomputador com velocidade de pico acima de 150 TFlop/s);
- Aperfeiçoamento dos modelos de previsão regional de alta resolução, incluindo, entre outros: 1) a representação dos processos físicos como nuvens, precipitação, aerossóis e interação da vegetação e clima; 2) o conhecimento do papel dos regimes de perturbação, referente à frequência e intensidade de eventos extremos como, por exemplo, seca, fogo, epidemia de insetos, inundações, tempestades de vento; 3) os potenciais efeitos no regime de águas, enfatizando as interações entre vegetação e atmosfera, incluindo os efeitos de fertilização por CO₂ em florestas tropicais sazonais e savanas; e, 4) as probabilidades de perdas agrícolas associadas à mudança do clima;

- Realização de 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;
- Implementação de um sistema brasileiro observacional para monitorar os efeitos das mudanças climáticas nos vários setores e sistemas (agricultura, recursos hídricos, zonas costeiras, saúde humana, energias renováveis, ecossistemas e biodiversidade, megacidades) e prever os eventos extremos (sistema de alerta precoce);
- Consolidação da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima).

FLORESTAS

- Desenvolvimento de pesquisas sobre os potenciais impactos da mudança do clima nas diversas formações florestais, por tipo de bioma, assim como na identificação das vulnerabilidades desses sistemas;
- Incentivo a pesquisas na área florestal produtiva, de forma a identificar vulnerabilidades deste setor à mudança do clima, sob diferentes cenários de mudança do clima;
- Ampliação da quantidade e qualidade de dados e informações necessárias para os estudos de impacto, adaptação e vulnerabilidade à mudança do clima, e promoção do 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;
- Definição de abordagens para identificar e avaliar medidas e estratégias de adaptação, incluindo como tornar as florestas mais resilientes aos impactos da mudança do clima;
- Desenvolvimento de cenários de mitigação que incluam políticas e medidas explícitas para reduzir emissões por desmatamento e emissões por degradação de florestas, incluindo os aspectos sociais, econômicos e tecnológicos associados a essa redução de emissões.

AGROPECUÁRIA E SOLOS AGRÍCOLAS

- Estabelecimento e implantação de sólidos programas de P&D sobre avaliação de impactos da mudança do clima na agricultura e possíveis medidas de mitigação e adaptação, incluindo-se estudos de vulnerabilidade;
- Extensão rural com vistas à conscientização de produtores rurais sobre potenciais impactos de mudança do clima, e à orientação sobre medidas de adaptação;
- Adoção de incentivos para a manutenção e ampliação de áreas florestadas, além do aumento da fiscalização sobre o uso do solo sob termos legais;
- Desenvolvimento e adoção de tecnologias de gerenciamento de uso das terras e de melhoramento vegetal, especialmente no sentido de gerar variedades cada vez mais tolerantes aos estresses climáticos, e elevar a produtividade de espécies com potencial energético que não sejam de natureza alimentar;
- Incentivo a sistemas de produção mistos (por exemplo, sistema integrado de lavoura-pecuária-floresta), com potencial para recuperar a produtividade de áreas degradadas, e proteger e interligar fragmentos de vegetação nativa por meio de corredores florestais e sistemas integrados agroflorestais e silvipastoris;
- Elaboração de modelos para estímulo a projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) com vistas ao desenvolvimento sustentável e mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

BIODIVERSIDADE

- Implementação de programas de inventários da diversidade biológica, visando cobrir as lacunas de conhecimento biogeográfico e taxonômico;

- Implementação de programas de apoio à taxonomia, modernização de coleções biológicas e desenvolvimento de sistemas integrados de informação sobre biodiversidade;
- Definição de políticas e estratégias voltadas à preservação permanente de arquivos digitais e a disseminação livre e aberta de dados biológicos de interesse público;
- Consolidação da infra-estrutura compartilhada de dados biológicos (catálogos de espécies e dados primários de espécimes depositados em coleções científicas) de forma integrada à infra-estrutura de dados ambientais visando facilitar o desenvolvimento de análises consistentes de modelagem do nicho ecológico de espécies;
- Desenvolvimento de ferramentas computacionais, integradas à infra-estrutura compartilhada de dados, visando facilitar o desenvolvimento de cenários de impacto e vulnerabilidade de espécies biológicas às mudanças climáticas;
- Definição de indicadores de degradação ambiental para os diferentes ecossistemas brasileiros;
- Definição de indicadores do declínio de espécies, populações e comunidades (exemplo: espécies criticamente ameaçadas como anfíbios e polinizadores);
- Definição de metodologias para a elaboração de mapas de impacto e de vulnerabilidade para os principais biomas brasileiros;
- Revisão das prioridades de implantação de áreas de conservação biológica e estabelecimento de corredores ecológicos, levando-se em conta o impacto das mudanças climáticas na biodiversidade (espécies, populações e comunidades);
- Desenvolvimento de bancos de dados e ferramentas computacionais de apoio à decisão, voltados à análise, síntese e visualização dinâmica de dados, para subsidiar a adoção de medidas de prevenção e mitigação do impacto das mudanças climáticas sobre a biodiversidade;

- Desenvolvimento de sistemática de valoração dos serviços ambientais prestados por áreas naturais, com a estruturação de mecanismos financeiros voltados à remuneração dos serviços ambientais visando à contenção do desmatamento e mitigação do impacto das mudanças climáticas.

SEMI-ÁRIDO

- Definição, em nível de estados no semi-árido e no governo federal, de programa de conscientização ambiental sobre mudanças climáticas e seus impactos, com ênfase no semi-árido, que é a região com menor IDH e com maior vulnerabilidade à variabilidade climática e, possivelmente, a mudanças climáticas;
- Desenvolvimento de pesquisa aplicada dirigida à avaliação dos impactos e ao mapeamento de riscos de mudanças de clima, e à identificação de populações vulneráveis, para estabelecer medidas de adaptação;
- Implementação de programa de conscientização ambiental sobre mudanças climáticas e seus impactos, vulnerabilidades, estratégias de adaptação e medidas de mitigação;
- Realização de estudos de vulnerabilidade do semi-árido a mudanças do uso da terra, a alterações do clima, ao aumento populacional e ao conflito pelo uso de recursos naturais, incluindo mapa de riscos e vulnerabilidade, integrando as diferentes vulnerabilidades setoriais (saúde, agricultura, transportes, recursos hídricos, biodiversidade, elevação do nível do mar, entre outras), contando com uma maior integração entre o Inpe e universidades e centros de pesquisa dos estados do Nordeste, o que poderia ajudar a criar soluções para enfrentar os impactos da mudança de clima.

ENERGIA E RECURSOS HÍDRICOS

- Desenvolvimento de estratégias para a integração – no âmbito de planejamento e operação da geração hidrelétrica, e de planos de recursos hídricos – dos aspectos ligados às mudanças climáticas, para reduzir a vulnerabilidade da oferta de energia e água;

- Realização de estudos de previsão e avaliação da vulnerabilidade climática da geração de energia elétrica no Brasil, com destaque para a avaliação das vazões afluentes nos reservatórios hidrelétricos por meio da previsão climática e hidrológica, fundamentais na definição de cenários nos quais os riscos hidrológicos e, portanto, energéticos poderiam ser conhecidos antecipadamente;
- Realização de estudos para reduzir a vulnerabilidade da geração no sistema elétrico a partir da integração entre fontes de energia e empreendimentos de diversas escalas;
- Estabelecimento de estratégias para estimular uma maior integração continental e regional entre bacias hidrográficas e sistemas elétricos;
- Garantir o livre e gratuito acesso aos dados históricos de chuva produzidos por órgãos públicos;
- Elaborar mapas de vulnerabilidade climática por bacia hidrográfica, destacando aspectos vinculados à geração hidrelétrica e ao sistema elétrico.

ZONAS COSTEIRAS

- Implementação de um programa de monitoramento ambiental permanente e de longo prazo, envolvendo parâmetros meteorológicos, oceanográficos, geodésicos e geomorfológicos;
- Atualização da cartografia náutica, como condição para a realização de estudos de engenharia costeira, e a compatibilização cartográfica (datum vertical e horizontal) entre os mapas do IBGE e as cartas náuticas (DHN) com vista à construção de um Modelo Digital de Terreno (MDT) para a zona costeira, incluindo áreas emersas e submersas;
- Atualização da cartografia terrestre da faixa costeira entre 0 m e 20 m de altitude, com resolução vertical de 1 m, ou maior, e datum vertical compatível com o das cartas náuticas, englobando toda a largura das planícies costeiras a partir da linha de costa, com a implantação de marcos geodésicos na faixa litorânea;

- Elaboração de diretrizes e de normas técnicas para obras costeiras e marítimas, que incorporem os possíveis impactos de mudança global do clima sobre obras e construções;
- Atualização das estruturas de fomento, de suporte à formação de pessoal especializado e de incentivo à inovação tecnológica que contemplem as áreas de engenharia e de geociências dedicadas aos ambientes costeiro e marinho;
- Preservação e recuperação do acervo técnico sobre obras de engenharia costeira e portuária, incluindo informações cartográficas, desenhos técnicos, imagens e relatórios;
- Elaboração de estudos de risco para zonas costeiras, contemplando aspectos ambientais, técnicos, de engenharia e socioeconômicos.

ZONAS URBANAS

- Mapeamento das áreas de risco de alagamentos e de escorregamentos de encostas nas cidades;
- Identificação de alternativas para moradia da população de baixa renda em áreas de risco;
- Reformulação do sistema viário e de coleta de esgotos, em especial nas cidades litorâneas;
- Regulamentação das construções, por meio do Código de Obras e do Plano Diretor, adaptando-se aos efeitos das mudanças do clima (aumento da temperatura, chuvas intensas e elevação do nível do mar).

SAÚDE HUMANA

- Atualização e ampliação dos estudos disponíveis, por meio da incorporação de dados e informações de outros setores que sejam de relevância direta, como determinantes do estado de saúde da população (qualidade/disponibilidade de água; segurança alimentar etc.);

- Extensão dos estudos de modelagem climática regional para a produção de cenários de clima para períodos não tão distantes no tempo, visando à compatibilização com cenários socioeconômico e de saúde;
- Criação de sistemas de alerta precoce conjugando a previsão de eventos climáticos extremos com mapas de vulnerabilidade e planos de contingência que envolva assistência de saúde, em caráter especial;
- Aperfeiçoamento dos programas de controle de doenças infecciosas de ampla dispersão no país, com altos níveis de endemicidade e sensíveis ao clima, especialmente a malária e a dengue;
- Pesquisas operacionais visando o desenvolvimento e aplicação de métodos de análise da vulnerabilidade da população aos efeitos adversos do clima sobre a saúde.

REVISTA PARCERIAS ESTRATÉGICAS

A revista *Parcerias Estratégicas* publica artigos, resultados de pesquisas científicas, documentos, ensaios, resenhas e textos históricos nos seguintes eixos temáticos: ciência, tecnologia e inovação (C,T&I); cooperação internacional; avaliação, indicadores e acompanhamento dos programas estratégicos; interação universidade-empresa; estudos prospectivos e visão do futuro; desenvolvimento regional; tecnologia da informação e comunicação; financiamento à pesquisa; resgate da história da ciência e tecnologia nacional.

NORMAS EDITORIAIS

Parcerias Estratégicas tem a preocupação de publicar artigos que sejam relevantes aos objetivos propostos pela linha editorial estabelecida, portanto, aceita trabalhos que não sejam inéditos ou restritos a autores brasileiros, desde que sejam obras recentes e observadas as seguintes recomendações:

- 1) Os artigos devem ser enviados completos em arquivo digital, formatados em espaço 1,5 e fonte *Garamond* 12, contendo de 15 a 25 páginas (30 mil a 50 mil caracteres) numeradas. Deve-se juntar ao final do trabalho um resumo e palavras-chave em português e inglês (cerca de 120 palavras), que permita uma visão do tema em questão. Evitar utilizar marcações desnecessárias no texto como grifo negrito, itálico, etc. As citações constantes do artigo devem estar entre parênteses, indicando o sobrenome do autor e ano da publicação (ex: Carvalho, 2005). As referências bibliográficas devem ser listadas em ordem alfabética, observando as normas da ABNT. Figuras e imagens são publicadas em preto e branco (portanto devem vir originalmente em PB), em 300dpi no formato JPG, e acompanhadas de legenda e da fonte e/ou autoria.
- 2) Todos os autores devem ser identificados com o nome completo, formação acadêmica e titulação máxima, cargo atual, vinculação institucional e endereço eletrônico (em até três linhas).
- 3) As resenhas de publicações recentes devem ter de 5 a 8 páginas (até 15 mil caracteres).
- 4) Todos os artigos serão submetidos a parecer de consultores especializados, que fundamentarão a decisão final do Conselho Editorial sobre sua publicação. Os textos enviados espontaneamente estão sujeitos à análise prévia de adequação pela editoria da revista.
- 5) Os colaboradores podem enviar seus trabalhos para: editoria@cgee.org.br.

MAIORES INFORMAÇÕES:

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

SCN Qd. 2 Bloco A, Corporate Financial Center, sala 1102

70712-900, Brasília – DF

Tel.: 61 – 3424.9666

<http://www.cgee.org.br>



editoração **cg**ee