

CAPÍTULO 5

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Autores principais: Luiz Antonio Martinelli – USP; Jean Pierre Henry Balbaud Ometto – INPE; Gabriela Bielefeld Nardoto – UNB; Alexandre de Siqueira Pinto – UNB; Humberto Rocha – USP; Dora Maria Villela – UENF; Eduardo Arcoverde de Mattos - UFRJ.

Autores colaboradores: Donato Abe – IIE; Roberto Antonio Ferreira de Almeida – INPE; André Megali Amado – UFRN; Cimélio Bayer - UFRGS; Marcelo Correa Bernardes – UFF; Elisabete de Santis Braga – USP; Mercedes Maria da Cunha Bustamante – UnB; Edmo José Dias Campos – USP; Patrícia Pinheiro Beck Eichler - UFRN; Vinicius Fortes Farjalla – UFRJ; Corina SidagisGalli – IIE; Vera Lúcia de Moraes Huszar - UFRJ; Ivan Bergier- Embrapa CPAP; Sílvia Fernanda Mardegan – USP/INPE; Aldrin Martin Perez Marin – INSA; Guilherme Ruas Medeiros- IIE; Rômulo Simões Cezar Menezes – UFPE; Paulo Nobre – INPE; Álvaro Ramon Coelho Ovalle – UENF; Vanderlise Giongo Petrere - Embrapa Semiárido; Valério De Patta Pillar – UFRGS; Alex Enrich Prast- UFRJ; Carlos Alberto Quesada – INPA; Julio Carlos França Resende – CLDF; Carlos Eduardo de Rezende – UENF; Enrique Ortega Rodriguez – UNICAMP; Fábio Roland – UFJF; Cleber Ibraim Salimon – UFAC; Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio- UFPE; João dos Santos Vila da Silva – CNPTIA; Weber Landim de Souza – INT; Frederico Scherr Caldeira Takahashi – UnB; Carlos Gustavo Tornquist – UFRGS; José Galizia Tundisi – IIE; Marcos Djun Barbosa Watanabe–UNICAMP.

Autores revisores: Flavio Luizão – INPA; Regina Luizão – INPA.

ÍNDICE

SUMÁRIO EXECUTIVO	183
5.1 INTRODUÇÃO	184
5.2. BREVE DESCRIÇÃO DOS BIOMAS BRASILEIROS	186
5.2.1 AMAZÔNIA	186
5.2.2 MATA ATLÂNTICA	187
5.2.3 PANTANAL	188
5.2.4 CAATINGA	189
5.2.5 CERRADO	189
5.2.6 PAMPA	190
5.3 BASE CONCEITUAL	190
5.4 PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO E NITROGÊNIO NOS PRINCIPAIS BIOMAS BRASILEIROS	192
5.5. IMPACTOS POTENCIAIS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	194
5.5.1 AMAZÔNIA	195
5.5.2 MATA ATLÂNTICA	196
5.5.3 CERRADO	197
5.5.4 CAATINGA	198
5.5.5 PANTANAL	199
5.5.6 PAMPA	200
5.5.7 ÁGUAS INTERIORES	200
5.6 CONCLUSÕES	202
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	202

SUMÁRIO EXECUTIVO

No Brasil são esperadas mudanças profundas e variáveis no clima conforme a região do país, afetando tanto os ecossistemas aquáticos como os terrestres. Neste quesito, o país é um dos mais ricos do mundo, tendo seis biomas terrestres (Amazônia, Mata Atlântica, Pantanal, Pampa, Cerrado e Caatinga), que englobam alguns dos maiores rios do mundo – como os Rios Amazonas, Paraná e São Francisco, além de possuir uma costa com cerca de 8.000 km, contendo pelo menos sete grandes zonas estuárias e toda a plataforma continental. O foco principal deste capítulo será investigar como os principais processos biogeoquímicos seriam afetados pelas mudanças climáticas nos principais biomas e bacias brasileiras. Devido à falta de informações espaciais compatíveis com as escalas dos biomas brasileiros, as análises realizadas neste capítulo concentram-se nas regiões de cada bioma onde há informações disponíveis. Ao mesmo tempo em que esse tipo de limitação nos impede de fazer uma generalização para um determinado bioma, ela também serve como um alerta sobre a carência destas informações em escalas compatíveis com as grandes áreas de nossos biomas. Observa-se uma crítica carência de informações para determinados biomas – como o Pampa, o Pantanal e a Caatinga, contrastando com o volume maior de informações observado para a Amazônia e, secundariamente, o Cerrado. Somente recentemente estudos têm sido desenvolvidos na Mata Atlântica, mas ainda mostram-se concentrados em algumas poucas áreas. Os maiores estoques de carbono e nitrogênio do solo foram encontrados na Mata Atlântica, seguindo-se a Amazônia e o Cerrado. Quanto aos estoques de carbono e nitrogênio acima do solo, destacam-se a Mata Atlântica e, especialmente, a Amazônia como os biomas que possuem os maiores estoques. Interessantemente, somente na Amazônia e no Pantanal os estoques de carbono e nitrogênio são mais elevados na biomassa acima do solo em relação aos estoques do solo, divergindo dos outros biomas em que os maiores estoques se concentram efetivamente nos solos. O retorno de carbono ao solo via queda das folhas teve uma variação muito menos acentuada entre os biomas. Os sistemas florestais tendem a ter uma transferência ligeiramente maior em relação aos sistemas herbáceos-arbustivos, mas não tão mais elevado, se levarmos em consideração a maior biomassa acima do solo observada nos sistemas florestais. Por outro lado, a transferência de nitrogênio é significativamente maior nos sistemas florestados da Amazônia e Mata Atlântica em relação aos sistemas herbáceos-arbustivos como o Cerrado e a Caatinga. Apesar das grandes diferenças nos estoques de carbono do solo, as variações nos fluxos de CO_2 para a atmosfera não foram elevadas entre os biomas, principalmente se excluirmos a Amazônia, onde os fluxos de CO_2 foram claramente maiores. O fluxo de N_2O do solo para a atmosfera é também considerado uma perda de nitrogênio do sistema. Neste caso as diferenças são mais acentuadas entre os biomas, tendo a Amazônia os maiores fluxos, seguindo-se a Mata Atlântica; enquanto fluxos muito baixos foram detectados para o Cerrado. No caso da fixação biológica de nitrogênio (FBN), as maiores entradas estão associadas aos sistemas florestais da Amazônia e Mata Atlântica, seguindo-se o Cerrado e, finalmente, o Pantanal e a Caatinga, com uma quantidade de nitrogênio fixada anualmente significativamente menor que os três biomas citados acima. Quanto à deposição atmosférica de nitrogênio, os valores foram semelhantes entre biomas, sendo, na maioria dos casos, abaixo dos valores que entram via FBN e ligeiramente mais elevados em relação aos fluxos de N_2O para a atmosfera. A combinação de mudanças climáticas globais com alterações dramáticas na cobertura do solo, com desmatamento em larga escala, pode determinar alterações no regime climático local na região Amazônica e consequentemente na estrutura e composição da vegetação nativa presente. O processo de “savanização” da Floresta Amazônica, surgiu como importante alerta à uma possível alteração estrutural da cobertura vegetal da região. Entretanto, estudos recentes, utilizando uma compilação maior de modelos climáticos globais, não reproduzem as condições ambientais e de resposta da floresta para que este processo seja estabelecido. No entanto deve-se salientar que uma profunda mudança na estrutura e funcionamento dos ecossistemas Amazônicos acarretaria perdas significativas nos estoques de carbono tanto do solo como da vegetação. Além das perdas de carbono, haveria outras mudanças fisiológicas e fenológicas similares àquelas descritas mais adiante para o Cerrado brasileiro. Tais mudanças se refletiriam não somente no ciclo do carbono, mas também no ciclo do nitrogênio. A Mata Atlântica estoca quantidades apreciáveis de carbono e nitrogênio em seus solos, principalmente em maiores altitudes. Os aumentos previstos para a temperatura do ar na Região Sudeste do Brasil levariam a um aumento nos processos de respiração e decomposição, gerando um aumento nas perdas de carbono e nitrogênio para a atmosfera.

A pergunta que permanece por falta de informações é se essas perdas seriam compensadas por um aumento na produtividade primária líquida do sistema. Nos campos sulinos do Pampa, similarmente à Mata Atlântica, os solos detêm um apreciável estoque de carbono. Portanto, aumentos na temperatura previstos para o futuro aumentariam as emissões de CO₂ para a atmosfera. O balanço entre a vegetação lenhosa e a vegetação herbácea é um importante aspecto da estrutura e funcionamento do Cerrado. A vegetação lenhosa tem estoques de nutrientes mais recalcitrantes na forma de raízes profundas e caules, enquanto a vegetação herbácea é mais prontamente decomposta. Em áreas onde a duração da seca fosse maior, poderia haver, em tese, um aumento na incidência de fogo, que por sua vez, favoreceria o aparecimento de uma vegetação herbácea, implicando em mudanças importantes no funcionamento do Cerrado. A produtividade primária do Cerrado pode potencialmente ser reduzida frente às mudanças climáticas projetadas para este bioma. O aumento da temperatura provavelmente resultará em uma redução do processo fotossintético nas plantas do Cerrado, implicando em um possível decréscimo de sua biomassa. Adicionalmente, na estação seca o Cerrado passaria a ser uma fonte de carbono para a atmosfera. Portanto, um aumento na duração deste período implicaria também em uma redução na produtividade primária do Cerrado. O aumento na ocorrência de eventos de fogo resultaria, ainda, em uma diminuição nos estoques de biomassa. De forma geral, há uma grande incerteza em relação aos efeitos de alterações climáticas nos recursos hídricos do Brasil. As bacias hidrográficas mais importantes do país, segundo seus atributos hidrológicos e ecológicos são a do Amazonas, Tocantins-Araguaia, Paraná, Paraguai e São Francisco. Essas bacias cortam regiões que devem sofrer diferentes impactos relacionados às alterações de temperatura e precipitação (volume e frequência de chuvas), com efeitos distintos na disponibilidade de água ao uso humano assim como à manutenção de processos ecológicos. Regionalmente, o aumento de eventos extremos associados à frequência e volume de precipitação também é previsto. Os cenários apontam para a diminuição na pluviosidade nos meses de inverno em todo país, assim como no verão no leste da Amazônia e Nordeste. Da mesma forma a frequência de chuvas na Região Nordeste e no Leste da Amazônia (Estados do Pará, parte do Amazonas, Tocantins e Maranhão) deve diminuir, com aumento na frequência de dias secos consecutivos. Este cenário deverá impor um stress sério aos já escassos recursos hídricos da Região Nordeste. Em contraste, o país deve observar o aumento da frequência e da intensidade das chuvas intensas na região subtropical (Região Sul e parte do Sudeste) e no extremo oeste de Amazônia.

5.1 INTRODUÇÃO

Após a publicação do quarto levantamento feito pelo Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) ficou claramente demonstrado que nosso planeta passa por mudanças ambientais e climáticas frutos das atividades humanas. Dentre elas, incluem-se um aumento crescente na concentração de CO₂ atmosférico e nas temperaturas. Adicionalmente, o aumento crescente na deposição de nitrogênio em várias partes do globo define o cenário que teremos à nossa frente nos próximos 100 anos.

O dióxido de carbono (CO₂) é o principal combustível utilizado pelas plantas que através de seus aparatos fotossintéticos transformam um gás inorgânico em moléculas orgânicas constituintes dos tecidos de organismos autotróficos. O processo de fotossíntese é limitado por uma série de fatores, incluindo o fornecimento de nitrogênio para os organismos autotróficos. O fornecimento de nitrogênio para os organismos é regulado por uma série de reações de oxi-redução que ocorrem tanto no ambiente terrestre como no ambiente aquático, que por sua vez, são mediadas por microorganismos em busca de energia ou aceptores finais de elétrons. Todos esses processos acima mencionados são influenciados significativamente pela temperatura. É amplamente conhecido que a temperatura limita não só o processo fotossintético, como inúmeras reações que ocorrem nos sistemas aquáticos e terrestres.

Ao desenvolver atividades que buscam prover alimentos, fibras e energia e através de diversos processos industriais, o homem vem, inadvertidamente, alterando a disponibilidade de dois elementos fundamentais à vida: carbono e nitrogênio, além de alterar um dos parâmetros mais importantes no funcionamento de sistemas aquáticos e terrestres: a temperatura do ar. Mudanças de temperatura afetam a

distribuição de energia em todo o globo, interferindo na distribuição de chuvas e, conseqüentemente, na disponibilidade de água.

Interessantemente, assim como os aspectos econômicos e sociais, essas mudanças seguem as tendências modernas de globalização e afetam, em maior ou menor grau, todo o planeta. Portanto, nunca se observou uma mudança tão profunda, abrangente e rápida como essas que estamos vivendo.

Intuitivamente, pode-se imaginar que um aumento nas quantidades de carbono e nitrogênio disponíveis e nas temperaturas levaria a um maior acúmulo de biomassa. No entanto, o crescimento de biomassa depende de um balanço entre a quantidade de carbono adquirida pelo processo fotossintético e a quantidade de carbono que é perdida pelos processos de respiração e decomposição. Um eventual ganho de carbono poderia ser anulado por um aumento nas perdas desse elemento. Por outro lado, as perdas poderiam ser mais elevadas que os ganhos, aumentando as emissões de CO₂ para a atmosfera.

Experimentos recentes têm demonstrado que todas essas hipóteses são plausíveis e dependem de vários fatores. Portanto, é esperado que as respostas às mudanças globais descritas acima sejam extremamente variáveis entre ecossistemas. Nota-se também que, sem um conhecimento prévio das características de cada sistema, não há como avaliarmos detalhadamente os efeitos das mudanças globais sobre os processos biogeoquímicos dos mesmos.

No Brasil, são esperadas mudanças profundas e variáveis no clima conforme a região do país (Marengo *et al.*, 2009), afetando tanto os ecossistemas aquáticos como os terrestres. Neste quesito, o país é um dos mais ricos do mundo, tendo seis biomas terrestres (Amazônica, Mata Atlântica, Pantanal, Pampa, Cerrado e Caatinga), Figura 5.1, que englobam alguns dos maiores rios do mundo (Figura 5.2) – como os Rios Amazonas, Paraná e São Francisco, além de possuir uma costa com cerca de 8.000 km, contendo pelo menos sete grandes zonas estuarinas e toda a plataforma continental.



Figura 5.1. Biomas brasileiros.

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Adaptado de Walker (2012).

Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtml>

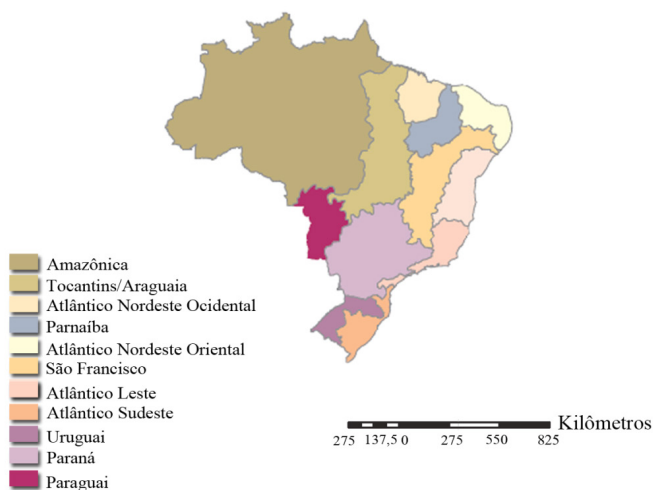
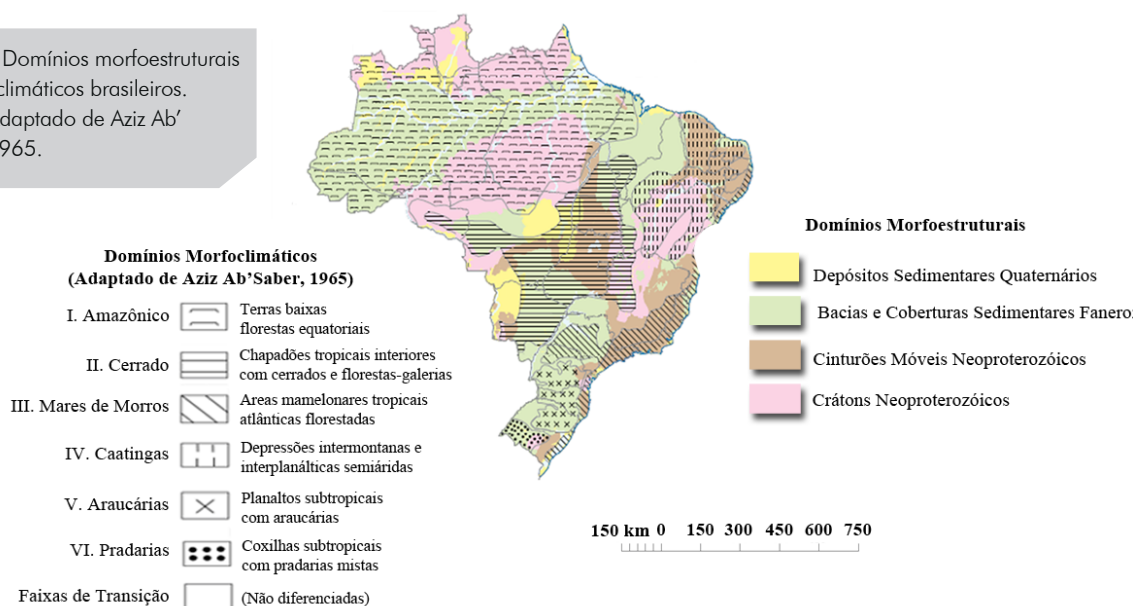


Figura 5.2. Divisão hidrográfica brasileira.

Fonte: adaptado de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2009).

Estes biomas têm características próprias e bem marcadas, tornando intuitiva sua divisão (Tabela 5.1). Por exemplo, quanto à vegetação, predominam as florestas com grande biomassa na Amazônia e na Mata Atlântica; já no Pampa, Cerrado e Caatinga há o predomínio de uma vegetação tipo savana; enquanto que o Pantanal mostra-se um misto dos dois. Para as variações de precipitação, temperatura e evaporação total relacionadas aos biomas brasileiros foi usado como base o livro “Normais Climatológicas do Brasil: 1961-1990” (INMET, 1992). Dois deles são considerados de clima tipicamente úmido: a Amazônia e a Mata Atlântica. Ainda dentro desta categoria, enquadra-se o Pantanal, cuja principal característica é a importante alteração na coluna da água, com inundação das planícies, sazonalmente. O Cerrado, por sua vez, é parcialmente limitado pela disponibilidade de água e no outro extremo encontra-se a Caatinga, significativamente limitada pela disponibilidade de água. Quanto à temperatura, a Amazônia e a Caatinga destacam-se pela exposição a temperaturas elevadas, contrapondo-se ao Pampa, bioma brasileiro exposto às menores temperaturas. Situados entre estes dois extremos, encontram-se o Cerrado e o Pantanal, ao passo que a Mata Atlântica, dada sua longa distribuição latitudinal, encontra-se exposta a uma variação considerável nas temperaturas (Figura 5.3).

Figura 5.3. Domínios morfoestruturais e morfoclimáticos brasileiros.
Fonte: Adaptado de Aziz Ab'Saber, 1965.



Desta breve descrição acima, conclui-se que existem acentuadas variações ambientais, estruturais e de funcionamento entre os biomas brasileiros. Como visto anteriormente, as respostas dos sistemas às mudanças globais serão variáveis entre sistemas, sendo influenciadas pelas condições existentes anteriormente à pressão antrópica no meio. O foco principal deste capítulo será investigar como os principais processos biogeoquímicos seriam afetados pelas mudanças climáticas nos principais biomas e bacias brasileiras. Devido à falta de informações espaciais compatíveis com as escalas dos biomas brasileiros, as análises feitas neste capítulo concentram-se nas regiões de cada bioma onde informações encontram-se disponíveis. Ao mesmo tempo em que esse tipo de limitação nos impede de fazer uma generalização para um determinado bioma, também serve como um alerta sobre a carência de informações em escalas compatíveis com as grandes áreas de nossos biomas.

5.2. BREVE DESCRIÇÃO DOS BIOMAS BRASILEIROS

5.2.1 AMAZÔNIA

O bioma amazônico é composto por diversos ecossistemas abrangendo uma área total de aproximadamente 7 milhões de km², dos quais mais de 60% se encontram em território brasileiro. Estruturalmente é composto pela Cordilheira do Andes a oeste, pelo Escudo Brasileiro ao sul e pelo Escudo das Guianas ao norte e pela bacia de sedimentação ao centro, onde se encontram os grandes rios da região (Figura 5.1).

Quanto à precipitação, há uma tendência de declínio da região noroeste para a sudeste (e.g., Marengo *et al.*, 2001; Ferreira e Rickenbach, 2011). As maiores precipitações são encontradas ao pé da Cordilheira do Andes, atingindo até 8.000 mm por ano, enquanto que as menores precipitações são encontradas no Estado de Roraima (<1.200 mm) (Sombroek 2001). Além dos totais de precipitação, é importante notar que há uma variação acentuada também na sazonalidade das precipitações nessa região (e.g., Grimm, 2011). Por exemplo, algumas partes do sul e do oeste da Amazônia podem enfrentar períodos de até cinco meses com menos de 100 mm de chuva. A evapotranspiração média medida na Amazônia fica em torno de 3,4 mm/dia (aproximadamente 1240 mm/ano) e tende a ser um pouco maior na época seca nas regiões de Florestas Ombrófilas Densas e em áreas de florestas abertas e savanas (da Rocha *et al.*, 2009). Quanto à dinâmica climática da atmosfera, Nobre *et al.* (2009) demonstraram como a região Amazônica funciona como uma distribuidora de vapor d'água para a região sul do continente sul americano.

Ao longo da Bacia Amazônia há uma grande variedade de tipos de solo, predominando, de uma forma geral, solos altamente intemperizados, principalmente na porção central e leste da Bacia (Quesada *et al.*, 2010). Ainda que esta seja a predominância geral observada, em áreas menores, existe uma variedade maior nos tipos de solos associada a características geomorfológicas destas localidades (Quesada *et al.*, 2009; Richter e Babbar, 1991; Sanchez e Buol, 1975; Sanchez, 1976), acarretando uma grande variação nas propriedades químicas e físicas dos mesmos (Quesada *et al.*, 2010). Enquanto que os solos mais intemperizados e inférteis encontram-se associados aos Escudos Brasileiro e das Guianas e ao longo das paleovárzeas localizadas ao longo dos principais rios da região (Quesada *et al.*, 2009; 2010; Richter e Babar, 1991; Irion, 1978; Sombroek, 1966), solos ligeiramente mais férteis geralmente ocupam níveis pedogênicos intermediários que ocorrem exclusivamente nas vizinhanças dos Escudos ou próximos às calhas dos Rios Juruá, Purus e Madeira (Quesada *et al.* 2009, 2010a). Os solos pedologicamente menos desenvolvidos e mais férteis encontram-se próximos aos Andes e ao longo das várzeas dos rios que neles se originam (rios de "água branca"), especialmente ao longo dos Rios Solimões e Amazonas.

Esta acentuada variabilidade na fertilidade dos solos da Amazônia implica na estratégia de sobrevivência da vegetação nestes diferentes substratos. Por exemplo, plantas crescendo em solos inférteis desenvolveram mecanismos eficientes para manter um nível adequado de suprimentos de nutrientes, principalmente, via ciclagem interna, em oposição ao suprimento direto desses nutrientes via solo (Stark, 1971; Starke Jordan, 1978; Jordan e Herrera, 1981; Jordan, 1989).

Segundo a classificação de Veloso *et al.* (1991), o tipo de vegetação predominante na Amazônia é a Floresta Ombrófila Densa, vegetação típica de clima úmido. O segundo tipo de vegetação mais comum é a Floresta Ombrófila Aberta, que enfrenta algum nível de déficit hídrico durante a estação seca. Estas florestas podem ser dominadas igualmente por bambus, como aquelas localizadas na região oeste da Amazônia, ou por palmeiras, como aquelas localizadas na região sul do bioma. Outros três tipos vegetacionais cobrem menores extensões, mas apresentam igualmente representativa biodiversidade. Primeiramente, observamos as Florestas Semi-Decíduas, que também se localizam na região sul da Amazônia e enfrentam períodos de seca mais prolongados. Em seguida, as campinas e campinaranas, que são vegetações que crescem sobre Espodosolos extremamente ácidos e pobres em nutrientes e ocorrem predominantemente na bacia do Rio Negro. Por fim, encontramos as savanas relictas, que ocupam pequenas áreas distribuídas por várias regiões da Amazônia.

5.2.2 MATA ATLÂNTICA

A Mata Atlântica, segundo informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004), se estende desde o Cabo de São Roque, no Estado do Rio Grande do Norte, até o município de Osório, no Estado do Rio Grande do Sul. Sua área de cobertura original era de aproximadamente 1,3 milhões de km². Atualmente há 12,5% de remanescentes sua cobertura original. Esta floresta é composta por dois grandes tipos de vegetação: a Floresta Ombrófila Densa ou Floresta Atlântica Pluvial

Florestas da Serra do Mar e da Serra da Paranapiacaba, no Estado de São Paulo) e Floresta Estacional Semidecidual (localizada no interior do país). A Floresta Atlântica Pluvial compreende, em maior parte, as baixas e médias elevações (1000 m) da parte oeste da cadeia de montanhas que segue ao longo da linha costeira do Brasil. Na região de ocorrência destas florestas, predominam temperaturas mensais médias de pelo menos 18 °C e elevada precipitação (acima de 2000 mm anuais), a qual é bem distribuída ao longo do ano (períodos menores que quatro meses com níveis mensais de precipitação abaixo de 100 mm).

A Floresta Ombrófila Densa da Mata Atlântica encontra-se subdividida em quatro faciações (Velloso *et al.*, 1991), as quais são ordenadas segundo a hierarquia topográfica e refletem em fisionomias e composições diferenciadas de acordo com as variações das faixas altimétricas e latitudinais. Essa divisão em faciações altitudinais não é somente importante em termos fisionômicos, mas também em termos de funcionamento. Assim, tem-se: 1) Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas – 5 a 50 m de altitude sobre o solo de restinga; 2) Floresta Ombrófila Densa Submontana – no sopé da Serra do Mar, com altitude variando entre 50 e 500 m; 3) Floresta Ombrófila Densa Montana – 500 a 1.200 m; 4) Floresta Ombrófila Densa Altimontana – no topo da Serra do Mar, acima dos limites estabelecidos para a formação Montana, onde a vegetação praticamente deixa de ser arbórea, pois predominam os campos de altitude.

5.2.3 PANTANAL

O Pantanal é uma planície de inundação e está localizado entre os paralelos 15° e 20°S e meridianos 55° e 59°W. Possui uma área de deposição de sedimentos arenosos derivados dos planaltos localizados a leste, formando enormes leques aluviais e ambientes lacustres e fluviais. Estes sedimentos são carregados principalmente pelo Rio Paraguai e seus afluentes (Alho, 2011), Figura 5.2. O relevo é plano e a altitude varia predominantemente entre 100 e 150 m. Em termos geomorfológicos esta bacia pode ser subdividida em sete classes: 1) Planície inundável do Rio Paraguai e Pantanal propriamente dito, 2) Depressão Cuiabana, 3) Depressão do Alto Guaporé-Cuiabá, 4) Depressão do Miranda, 5) Serra da Bodoquena, 6) Platô do Alto Paraguai (onde se localizam as cidades de Corumbá e Ladário) e 7) Platô da bacia do Rio Paraná (Mercante *et al.*, 2011).

As chuvas anuais médias variam de 800 a 1600 mm concentrando-se preferencialmente no verão austral. A planície pantaneira é marcada por um déficit hídrico acentuado, onde usualmente a evapotranspiração é maior que a precipitação. A complexidade do regime hidrológico do Rio Paraguai está relacionada à baixa declividade dos terrenos que integram as planícies e pantanais mato-grossenses e também à extensão da área que permanece periodicamente inundada com grande volume de água (Gonçalves *et al.*, 2011).

A flora da planície inundável, com aproximadamente 2.000 espécies, é um encontro de elementos de ampla distribuição e de províncias fitogeográficas mais ou menos vizinhas, tais como o Cerrado, Florestas Estacionais, Chaco, Amazônia e Mata Atlântica. O grupo mais numeroso de espécies é formado por aquelas de ampla distribuição, enquanto que o segundo maior contingente é proveniente do Cerrado. As plantas endêmicas são raras, observando-se somente sete. A vegetação da planície sedimentar é um mosaico de vegetações aquáticas, campos inundáveis, florestas ripárias, savanas (cerrados), cerrado, floresta decidual, e uma grande parte de savanas e florestas pioneiras monodominantes (Pott *et al.*, 2011).

As paisagens vegetais marcantes no Pantanal são: 1) os Carandazais, localizados em zonas de inundação mais frequentes e sendo formados excepcionalmente por palmeiras *Copernicia alba*; 2) os Paratudais, também localizados em áreas de inundação e formados predominantemente pelo ipê amarelo, *Tabebuia alba*; e 3) Regiões de Cordilheiras, sendo estas mais elevadas em relação às vazantes e baías e salinas, usualmente possuindo plantas de Cerrado e palmeiras das espécies *Acrocomia aculeata* e *Attalea phalerata*. As espécies de plantas aquáticas são muito diversificadas (em torno de 50 espécies) e cerca de 1% da produção líquida do ecossistema na planície é sazonalmente exportada na forma de ilhas

flutuantes de biomassa vegetal aquática (conhecidas por camalotes) pelo Rio Paraguai em direção à foz da bacia do Prata (Bergier *et al.*, 2012).

5.2.4 CAATINGA

O bioma Caatinga, localizado no Nordeste brasileiro, cobre uma área aproximada de 1 milhão de km², e representa a maior parte da região semi-árida do país. A maior parte deste bioma se encontra em uma região onde a precipitação anual é inferior a 1.000 mm. Além da escassez, a marcada variabilidade espacial e temporal é outra característica das chuvas desta região (Reddy, 1983). Em algumas regiões, 20% da precipitação anual ocorrem em um único dia e 60% em um único mês (Sampaio, 1995). As temperaturas médias anuais são elevadas, variando de 23 a 27 °C e a umidade relativa geralmente menor que 50%. Como consequência, a evapotranspiração potencial é alta, resultando em déficit hídrico durante 7 a 11 meses por ano (Freitas *et al.*, 2012).

A altitude média encontra-se próxima a 400-500 m acima do nível do mar, alcançando o nível do mar em Estados como Rio Grande do Norte e Ceará, e cerca de 1.000 m de altitude, em alguns platôs. Cerca de 37% da área é composta por vertentes com inclinações entre 4 e 12% e 20%, além de haver vertentes com inclinações maiores que 12%. A Caatinga pode ser dividida em três áreas geologicamente distintas em função do material de origem: (1) áreas sobre o escudo cristalino; (2) áreas sobre o escudo cristalino cobertas com material arenoso; e (3) áreas de depósitos sedimentares (Jacomine, 1996). Quase 70% da área é coberta por quatro tipos de solos dominantes, a saber: os Latossolos e os Litosolos cobrem, cada tipo, 20% da área; já os Argissolos cobrem 15%; enquanto que os Luvisolos cobrem 13%. Mais de 80% da área tem algum tipo de limitação em termos pedológicos, merecendo destaque a baixa fertilidade e a baixa profundidade, a drenagem dificultada e concentrações excessivas de sódio trocável (Silva, 2000).

5.2.5 CERRADO

O Cerrado é definido como uma savana sazonal úmida, com precipitação média anual que varia de 800 a 1.800 mm conforme a região, sendo que 90% da precipitação ocorre na estação chuvosa entre outubro e abril. Ainda que a média anual de temperatura fique entre 20 e 26 °C no bioma, há uma acentuada variação nas temperaturas devido às diferenças em altitude, que chegam a mais de 1.000 m (Eiten, 1972). Por exemplo, a temperatura mínima na parte sul do Cerrado, no Estado de São Paulo, alcança -4 °C, enquanto que a temperatura mínima na porção norte do bioma, no Estado do Piauí, alcança 14 °C.

Essa grande amplitude nas temperaturas, aliada a diferenças na precipitação e altitude, determinam diferenças acentuadas na composição das espécies do Cerrado (Castro, 1994; Ratter *et al.*, 2003). A paisagem do Cerrado é composta por um mosaico de vegetação, indo de campos de gramíneas até formações florestais, havendo tipos intermediários de vegetação. As vegetações mais gramíneas e abertas são os campos limpos e campos sujos; tornando-se a presença de arbustos e árvores mais frequentes no cerrado *sensu stricto* e no cerradão (Ribeiro e Walter, 1998).

Dentre as savanas tropicais, o Cerrado se destaca pela sua grande diversidade de plantas, com cerca de 12.000 espécies de angiospermas (Mendonça *et al.*, 2008). Na porção herbácea do Cerrado, há o predomínio da família Leguminosae, com cerca de 780 espécies, seguida pelas famílias Asteraceae (560 espécies), Poaceae (500 espécies) e Orchidaceae (495 espécies) (Filgueiras, 2002).

O principal tipo de solo do Cerrado são os Latossolos, que cobrem cerca de 45% da região, sendo seguidos pelos Neossolos quartzonórficos, que cobrem aproximadamente 15% de sua extensão (Reatto *et al.*, 1998). Estes são solos geralmente ácidos, com alta concentração de alumínio e baixa concentração de nutrientes.

5.2.6 PAMPA

Os campos sulinos são compostos sobretudo por gramíneas e estão incluídos principalmente no bioma Pampa, localizados ao sul e ao oeste do Estado do Rio Grande do Sul e também de forma descontínua na Mata Atlântica localizada nos platôs elevados do sul do Brasil.

Em algumas regiões, predominam os campos de gramíneas que formam a matriz principal da região; enquanto em outras regiões, tanto no Pampa como na Mata Atlântica, esses campos formam mosaicos associados a fragmentos isolados de florestas, localmente, denominado capões, e florestas ripárias. Estas florestas são de diferentes tamanhos e áreas e contém elementos de florestas decíduas, semi-decíduas, ou de florestas úmidas com a ocorrência de *Araucaria angustifolia*.

O clima na região do Pampa é considerado como de transição entre os clima sub-tropical, ao norte, e o clima temperado, ao sul. A época mais chuvosa coincide com o verão, diminuindo no período de inverno, entre os meses de abril e setembro. No entanto, a estação seca não é pronunciada. A precipitação média anual varia de 1200 a 1600 mm, com temperaturas médias anuais variando de 13 a 17 °C.

No bioma Pampa, com os limites definidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2004), predominam Neossolos, Argissolos e Planossolos. De maneira geral, estas classes de solos, nas condições em que ocorrem neste bioma, são de média a alta fertilidade, acidez moderada, apresentando textura média a arenosa no horizonte superficial, característica que determina limitada capacidade de armazenagem de água. Também são encontrados, na região noroeste do Pampa, os Latossolos – solos com textura argilosa, ácidos e naturalmente pobres em nutrientes, porém com maior capacidade de armazenagem de água. Ao oeste do Pampa no Estado do Rio Grande do Sul, na fronteira com Argentina, há a ocorrência limitada de Chernossolos com caráter carbonático, bastante similares aos solos do Pampa argentino.

5.3 BASE CONCEITUAL

A base conceitual nesta análise será a ecologia de ecossistemas, a qual, de acordo com Chapin *et al.* (2002) investiga as interações entre organismos e o ambiente em um sistema integrado. Esta definição implica que há uma ligação inerente entre os sistemas físicos e bióticos de um ecossistema. Os seres humanos, como parte do sistema biótico, dependem do sistema físico, sobre o qual exercem uma influência significativa. Neste sentido, a ecologia de ecossistemas aborda fatores que regulam reservatórios e fluxos de energia e material fluindo entre o sistema biótico e físico, dos quais o ser humano participa intrinsecamente e, diretamente, os altera.

Uma maneira útil de se abordar as interações descritas acima é por meio dos cinco fatores de estado que interferem na formação dos solos definidos por Jenny (1941). Estes fatores são: o clima regional e global, o tempo, o material de origem e a topografia (Figura 5.4). Mais recentemente, Chapin *et al.* (2002) adaptaram este conceito para a ecologia de ecossistemas. De acordo com esses autores, além dos fatores de estado definidos por Jenny (1941), há ainda fatores interativos que atuam em escalas locais e que interferem nos processos dos ecossistemas, regulando a dimensão de seus reservatórios. Estes quatro fatores são: o clima local, o tipo de solo, os grupos funcionais de plantas e animais e perturbações naturais e antrópicas (Figura 5.4).

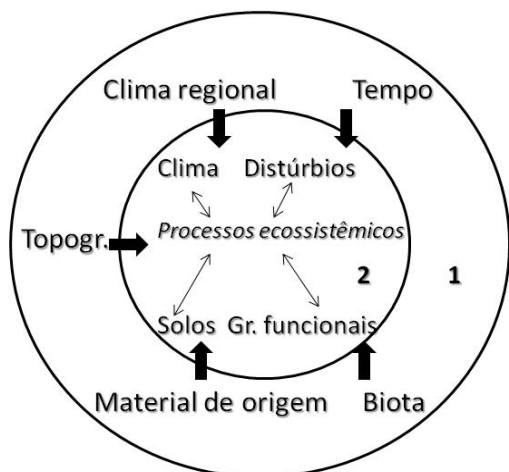


Figura 5.4. Fatores de estado e fatores interativos que interferem nos processos ocorridos em nível de ecossistemas. Fonte: adaptado de Chapin *et al.* (2002).

1 – Fatores de Estado 2 – Fatores Interativos

Apesar da utilidade da base conceitual descrita acima, é também importante o estabelecimento de uma equação que relacione os processos básicos do ecossistema com a atmosfera, que é o loci das mudanças climáticas. Para o carbono, dois processos básicos regulam a troca deste elemento com a atmosfera: a fotossíntese e a respiração. A produtividade líquida do ecossistema, definida por Schulze *et al.* (2000) e modificada por Randerson *et al.* (2002), interliga elegantemente a atmosfera com a biosfera através da seguinte equação, simplificada para nosso propósito:

$$NBP = GPP - R_{\text{auto}} - R_{\text{hetero}} - L_{\text{fogo}} - L_{\text{lixiviação}} - L_{\text{voc}} \pm L_{\text{lateral}} \quad (1)$$

Onde:

NBP é a medida de balanço de carbono do ecossistema em escala regional;

GPP é a produtividade primária bruta (ganho de carbono pela fotossíntese);

R_{auto} é a perda de carbono pela respiração autotrófica;

R_{hetero} é a perda de carbono pela respiração heterotrófica;

L_{fogo} é a perda de carbono por combustão (queima de vegetação);

$L_{\text{lixiviação}}$ é a perda de carbono por lixiviação profunda;

L_{voc} é a perda de carbono pela emissão de compostos voláteis orgânicos;

L_{lateral} é a perda de carbono pelo transporte lateral de carbono de outros ecossistemas na forma de carbono orgânico dissolvido e particulado e carbono inorgânico dissolvido exportado e importado pelos rios.

Dependendo das magnitudes de perdas e ganhos de carbono, os principais reservatórios de carbono do ecossistema podem ser alterados e essa alteração pode ser equacionada da seguinte forma:

$$\Delta C_{\text{ecossistema}} = dC_{\text{solo}}/dt + dC_{\text{veg}}/dt + dC_{\text{aquat}}/dt \quad (2)$$

Onde:

ΔC_{bioma} é variação temporal no estoque de carbono em relação ao seu estado original;

dC_x/dt é a variação temporal nos estoques de carbono no solo, vegetação e sistema aquático, respectivamente.

Da mesma forma que para o carbono, é possível se investigar fluxos de nitrogênio em um bioma adotando-se o ecossistema como principal unidade de estudo. O seguinte balanço pode ser considerado (Howarth *et al.*, 1996; Filoso *et al.*, 2006):

$$\Delta N_{\text{ecossistema}} = F_{\text{BNF}} + F_{\text{atm-d}} - F_{\text{atm-e}} \pm F_{\text{lateral}} \quad (3)$$

Onde:

$\Delta N_{\text{ecossistema}}$ é a variação no estoque de nitrogênio no ecossistema;

F_{BNF} é a entrada de nitrogênio através da fixação biológica de nitrogênio;

$F_{\text{atm-d}}$, a entrada de nitrogênio por meio da deposição seca e úmida;

$F_{\text{atm-e}}$ a perda de nitrogênio através da volatilização e emissões de NO, N₂O e N₂. Da mesma forma, perdas ou ganhos significantes de nitrogênio podem acarretar variações significativas nos estoques de nitrogênio nos principais reservatórios.

$$\Delta N_{\text{ecossistema}} = dN_{\text{solo}}/dt + dN_{\text{veg}}/dt + dN_{\text{aquat}}/dt \quad (4)$$

Onde:

ΔN_{bioma} é variação temporal no estoque de nitrogênio em relação ao seu estado original;

dN_x/dt é a variação temporal nos estoques de nitrogênio no solo, vegetação e sistema aquático, respectivamente.

5.4 PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO E NITROGÊNIO NOS PRINCIPAIS BIOMAS BRASILEIROS

No geral, existem poucas informações sobre reservatórios e fluxos de carbono e nitrogênio em nossos biomas. Os dados existentes são fragmentados em termos espaciais e sazonais. Biomas como o Pampa são especialmente pobres em informações, como pode ser constatado nas Tabelas 5.2 e 5.3. Portanto, resultados discutidos e conclusões alcançadas neste estudo devem ser vistos frente à escassez de informações. No entanto, deve-se enfatizar que a escassez de dados básicos sobre nossos biomas constitui-se em uma informação importante no sentido de orientar futuros estudos e investimentos.

Os mais importantes dos reservatórios de carbono e nitrogênio são aqueles oriundos do solos e da vegetação. Ainda que haja dados a respeito dos estoques de nutrientes nos solos de todos os biomas brasileiros, observa-se a ausência de uma padronização quanto à profundidade amostrada (Tabelas 5.2 e 5.3). Estoques de nutrientes nos solos são geralmente quantificados até 1,0m de profundidade. É importante salientar que há um decréscimo exponencial das concentrações de carbono e nitrogênio em relação à profundidade do solo, tornando-se difícil qualquer tipo de extrapolação. Feita esta ressalva, nota-se que os maiores estoques de carbono e nitrogênio até 1,0m de profundidade encontram-se na Mata Atlântica, seguindo-se a Amazônia e o Cerrado. Comparando-se biomas em que os estoques do solo foram estimados até 20 a 30 cm, observa-se que o maior estoque encontra-se no Pampa, seguindo-se o Pantanal e a Caatinga, com estoques aproximadamente equivalentes (Tabelas 5.2 e 5.3).

Quanto aos estoques de carbono e nitrogênio acima do solo, destacam-se como biomas com maiores estoques a Mata Atlântica e, especialmente, a Amazônia (Tabelas 5.2 e 5.3). Os estoques do Pantanal são extremamente variáveis, em função da variação observada nos tipos de vegetação. Ainda assim, observa-se que estes estoques são inferiores àqueles observados na Amazônia e na Mata Atlântica (Tabelas 5.2 e 5.3). A Caatinga e o Cerrado têm estoques acima do solo semelhantes aos estoques observados no Pantanal. No Pampa, ainda que não haja informação disponível, por predominarem campos gramíneos, supõe-se que seus estoques de carbono e nitrogênio acima do solo sejam menores em relação aos demais biomas (Tabelas 5.2 e 5.3).

Interessantemente, somente na Amazônia e no Pantanal os estoques de carbono e nitrogênio são mais elevados na biomassa acima do solo em relação aos estoques do solo; nos outros biomas, os maiores estoques concentram-se efetivamente nos solos (Tabelas 5.2 e 5.3).

Uma forma importante de reciclagem interna dos ecossistemas é a transferência de nutrientes via queda das folhas. Ainda que diferenças acentuadas tenham sido observadas nos estoques de carbono abaixo e acima do solo, a serapilheira produzida teve uma variação muito menos acentuada entre os biomas (Tabela 5.2). Os sistemas florestais tendem a ter uma transferência ligeiramente maior em relação aos sistemas herbáceos-arbustivos, mas não tão mais elevado, se levarmos em consideração a maior biomassa acima do solo observada nos sistemas florestais (Tabela 5.2). Por outro lado, a transferência de nitrogênio é significativamente maior nos sistemas florestais da Amazônia e Mata Atlântica, quando comparados aos sistemas herbáceos-arbustivos, tais como o Cerrado e a Caatinga (Tabela 5.3).

O fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera é uma das maneiras pela qual carbono que foi fixado através do processo de fotossíntese retorna a atmosfera. Apesar das grandes diferenças nos estoques de carbono do solo, as variações nos fluxos de CO₂ não foram elevadas entre os biomas, principalmente se excluirmos a Amazônia – bioma onde os fluxos de CO₂ foram claramente mais elevados (Tabela 5.2). Ao tratar do nitrogênio, o fluxo de NO, N₂O e N₂ do solo para a atmosfera é também considerado uma perda deste elemento do sistema. Neste caso, as diferenças são mais acentuadas entre os biomas, tendo a Amazônia os maiores fluxos, seguindo-se a Mata Atlântica; fluxos muito baixos foram detectados para o Cerrado (Tabela 5.3).

Ainda em relação ao nitrogênio, duas formas importantes de entrada deste nutriente nos ecossistemas são a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e a deposição atmosférica. No caso da FBN, as maiores entradas estão associadas aos sistemas florestais da Amazônia e Mata Atlântica, seguindo-se o Cerrado. Por fim, o Pantanal e a Caatinga apresentam uma quantidade de nitrogênio fixada anualmente significativamente menor que os três biomas citados acima (Tabela 5.3).

Quanto à deposição atmosférica de nitrogênio, os valores foram semelhantes entre os biomas e, na maioria dos casos, abaixo dos valores que entram via FBN, sendo ligeiramente mais elevados em relação aos fluxos de N₂O para a atmosfera (Tabela 5.3).

Tabela 5.1. Informações fisiográficas e climáticas sobre os principais biomas brasileiros.

Bioma	Área (km ²)	Vegetação ¹	Solos ²	Clima
Amazônia	4,20	Florestal	Tropicais de baixa fertilidade	Equatorial
Mata Atlântica	1,11	Florestal	Tropicais de baixa fertilidade	Tropical úmido
Pantanal	0,15	Arbustiva-herbácea	Tropicais de baixa fertilidade	Tropical semi-úmido
Cerrado	2,04	Arbustiva-herbácea	Tropicais de baixa fertilidade	Tropical semi-úmido
Caatinga	0,84	Arbustiva-herbácea	Tropicais férteis e inférteis	Tropical semi-árido
Pampa	0,18	Arbustiva-herbácea	Sub-tropicais férteis	Sub-tropical

¹ Tipo de estrato predominante da vegetação

² Característica geral dos solos

Tabela 5.2. Estoque de carbono no solo e na biomassa e fluxo de carbono entre diferentes compartimentos do ecossistema para os biomas brasileiros.

Bioma	Estoques (Mg C ha ⁻¹)			Produção de Serapilheira (Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹)	CO ₂ -Respiração do solo (Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Troca líquida do Ecossistema (Mg C.ha ⁻¹ ano ⁻¹)
	Solos	Biomassa acima do solo	Biomassa abaixo do solo			
Amazônia ¹	85 – 100 ^e	95 – 250	100 ^e	2 – 7	12 – 17	-0,11 a -0,5
Mata Atlântica ²	190 – 280 ^e	90 – 130	20 – 29 ^a	2,6 – 4	3,6	ND
Pantanal ³	11,2 – 15,8 ^b	7,4 – 100,0	36,1 ^d	2,5 – 5,2	6,5	-1,0 a -1,3
Cerrado ⁴	72 – 120 ^e	10 – 35	15 ^f	1 – 4	6 – 8	- 0,1 a -0,3
Caatinga ⁵	25 ^b	15 – 25	3 – 6 ^e	1,0 – 3,0	2 – 10	ND
Pampa ⁶	68 ^c	ND	ND	ND	ND	ND

ND: não determinado

a. até 10 cm de profundidade

b. até 20 cm de profundidade

c. até 30 cm de profundidade

d. até 40 cm de profundidade

e. até 1 m de profundidade

f. até 2 m de profundidade

1. Ometto et al (2005) e outros autores (referências)

2. Villela et al. (2012)

3. Vários autores (referências)

4. Bustamante et al. (2012)

5. Menezes et al. (2012)

6. Pillar et al. (2012)

Tabela 5.3. Estoque de nitrogênio no solo e biomassa e fluxos de nitrogênio entre diferentes compartimentos do ecossistema para os biomas brasileiros.

Bioma	Estoques (Mg N ha ⁻¹)			Produção de Serapilheira (kg N ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Fixação biológica de nitrogênio (kg N ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Emissão de N ₂ O do solo (kg N ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Deposição atmosférica (kg N ha ⁻¹ ano ⁻¹)
	Solos	Biomassa acima do solo	Biomassa abaixo do solo				
Amazônia ¹	1 ^a	1,4 – 2,7	9 ^c	60 – 180	ND	2 – 7	4
Mata Atlântica ²	14 – 20 ^c	0,8 – 1,6	0,25 – 0,4 ^a	90 – 170	ND	1 – 4	1 – 6
Pantanal ³	0,5 – 1,9 ^a	ND	ND	64 – 208	2,6	22,2	7,3
Cerrado ⁴	4,6 ^c	ND	0,1 ^d	13	ND	ALD	4
Caatinga ⁵	2,5 ^b	0,3 – 0,6	0,05 – 0,1 ^c	20 – 60	3 – 11	ND	5
Pampa	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ALD: abaixo do limite de detecção do sistema de medição

ND: não determinado

a. até 10 cm de profundidade

b. até 20 cm de profundidade

c. até 1 m de profundidade

d. até 8 m de profundidade

1. Martinelli et al. (2012)

2. Villela et al. (2012)

3. Watanabe et al. (2012)

4. Bustamante et al. (2012)

5. Menezes et al. (2012)

5.5. IMPACTOS POTENCIAIS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

É incontestável que ainda temos uma visão extremamente fragmentada sobre a ecologia de ecossistemas dos principais biomas brasileiros. Há uma escassez de dados fundamentais que torna extremamente complexa a tarefa de se prever prováveis efeitos das mudanças climáticas sobre os ciclos biogeoquímicos que ocorrem nesses biomas. O maior volume de informações disponíveis para a Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado faz com que algumas previsões possam ser feitas para estes biomas. No entanto, fica o alerta que tais previsões foram feitas sobre uma base de dados escassa frente ao tamanho e complexidade desses biomas.

Além deste fato, deve ser também considerado que, devido a fatores relacionados às atividades humanas, vários ecossistemas que compõem os biomas brasileiros se encontram profundamente modificados

em relação a suas condições naturais. Neste contexto, as paisagens tornam-se fragmentadas, constituindo-se de mosaicos compostos pela vegetação original, sendo entremeados por campos agrícolas e áreas abandonadas. Previsões sob este tipo de paisagem são também extremamente complexas.

Ao mesmo tempo, a falta de informações revela a necessidade urgente do desenvolvimento de estudos desta natureza em todos os biomas brasileiros, mas, principalmente no Pantanal, Caatinga e Pampa.

5.5.1 AMAZÔNIA

O único bioma brasileiro onde há dados suficientes para tais simulações é a Amazônia. Nas últimas décadas, por meio do projeto Experimento de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA (Keller *et al.*, 2009), foram desenvolvidos estudos que incluem desde experimentos de campo em parcelas de 1 ha até o uso de vários modelos de circulação global. O acoplamento das observações de campo com esses modelos tem produzidos resultados consistentes que permitem certas considerações sobre mudanças climáticas e ciclos biogeoquímicos (Ometto *et al.*, 2011).

Para a região Amazônia é previsto que para o final deste século haverá um aumento acentuado na temperatura e uma diminuição na precipitação, principalmente na região leste do bioma (Marengo *et al.*, 2010). Mais importante ainda para esta região é o cenário extremo conhecido na literatura como “*Amazon dieback*”. Neste cenário, previsto pelo modelo HadCM3 do Hadley Center, quando a vegetação original decrescer aproximadamente pela metade na região leste da Amazônia o clima mudaria a tal ponto que o resto da floresta seria substituído por uma vegetação tipo savana (Cox *et al.*, 2004; Marengo *et al.*, 2009). No entanto, Huntingford *et al.* (2013), utilizando uma compilação maior de modelos climáticos globais, contrapõem-se à ocorrência da “*savaniação*” da Floresta Amazônica, ao apresentar simulações que não reproduzem as condições ambientais e de resposta da floresta para que este processo seja estabelecido.

Uma mudança tão profunda na vegetação acarretaria perdas significativas nos estoques de carbono tanto do solo, como da vegetação. As perdas de carbono no solo e vegetação são estimadas em 14 Gt e 36 Gt, respectivamente, totalizando 50 Gt de carbono perdidos até o final deste século (Cox *et al.*, 2004). Além das perdas de carbono, haveria outras mudanças fisiológicas e fenológicas similares àquelas descritas mais adiante para o Cerrado brasileiro. Tais mudanças se refletiriam não somente no ciclo do carbono, mas também no ciclo do nitrogênio.

Por exemplo, as florestas amazônicas são ecossistemas ricos em nitrogênio (Martinelli *et al.*, 1999) e parte desta riqueza advém dos aportes de nitrogênio pela fixação biológica (Tabela 5.3). Com a retirada da floresta, haverá conseqüentemente um decréscimo considerado na entrada de nitrogênio no solo via FBN. Provavelmente, a vegetação subsequente rica em plantas herbáceas será significativamente limitada por este nutriente, como são as pastagens que substituem a floresta.

Mesmo que não haja uma mudança tão drástica na vegetação, a diminuição das chuvas levará a um aumento na intensidade do período seco e na frequência de fogo, tanto acidental como intencional. Após a severa seca de 2005, que novamente ocorreu em 2010, Lewis *et al.* (2011) estimaram que 1,6 a 2,2 Pg de carbono não foram transferidos da atmosfera para a vegetação, devido à ausência de crescimento das árvores ou à mortalidade que se segue após esses eventos extremos. Por outro lado, o fogo tem conseqüências imediatas sobre os estoques de nutrientes das florestas, pois grande parte do carbono e do nitrogênio estocados na vegetação são perdidos para a atmosfera (Kauffmann *et al.*, 1995), levando a um decréscimo acentuado desses estoques e provocando uma limitação severa no crescimento da vegetação, fruto da falta de nitrogênio nos solos após repetidos ciclos de fogo (McGrath *et al.*, 2001).

5.5.2 MATA ATLÂNTICA

Ainda temos um conhecimento escasso sobre o funcionamento do bioma Mata Atlântica. A maioria das informações produzidas se concentrou sobre a zona costeira da Região Sudeste do Brasil. Há também algumas informações disponíveis em relação à Região Nordeste.

Como a maioria dos dados disponíveis sobre os ciclos de carbono e de nitrogênio se refere à Região Sudeste, consideramos as mudanças climáticas previstas por Marengo *et al.* (2009, 2010) para esta região. Consequentemente, esses resultados não se aplicam a latitudes menores do bioma Mata Atlântica, como é o caso do Nordeste, enfatizando mais uma vez a necessidade urgente de estudos a respeito desse ecossistema do Brasil.

A mudança mais clara prevista pelos três modelos utilizados por Marengo *et al.* (2010) seria um aumento, ao final deste século, da temperatura do ar por todo o País. As alterações de precipitação são menos robustas, com alto grau de variabilidade entre as regiões brasileiras.

Levando-se em conta tais incertezas, a principal projeção feita seria a que aponta para um decréscimo nas chuvas durante o inverno - entre os meses de junho e agosto -, seguido por um aumento da precipitação durante os meses de verão austral - entre os meses de dezembro e fevereiro (Marengo *et al.*, 2009).

Uma das mais notáveis características das florestas tropicais é sua habilidade em estocar grandes quantidades de carbono e nitrogênio, tanto acima como abaixo do solo (Trumbore *et al.*, 1995). Segundo Meier e Leuschner (2010), um aumento na temperatura poderia transformar ecossistemas florestais em fontes de carbono. Isto se deve ao fato de que as emissões do chão aumentariam por conta da elevação da temperatura do ar e do CO₂ lançado à atmosfera, o qual não seria compensado pela absorção pela fotossíntese.

É muito bem estabelecido que as taxas de decomposição e respiração do solo aumentam com as temperaturas do ar e do próprio terreno (Kirschbaum, 2000; Raich *et al.*, 2006; Wagai *et al.*, 2008). Por sua vez, incrementos nessas taxas poderiam levar a uma perda de carbono do solo (Biasi *et al.*, 2008; Dorrepaal *et al.*, 2009).

No caso das florestas de Ubatuba, localizadas no Nordeste do Estado de São Paulo, Sousa Neto *et al.* (2011) encontraram um decréscimo consistente na temperatura do solo ao longo de um gradiente altitudinal. Por conseguinte, houve correlação direta entre temperatura e emissões de CO₂ para a atmosfera. Tal correlação foi posteriormente confirmada por meio de um experimento de campo conduzido no mesmo local, onde terrenos a 1.000 m de altitude foram aquecidos artificialmente, observando-se aumento significativo nas emissões de CO₂ (Martins, 2011).

Finalmente, Vieira *et al.* (2011) encontraram correlação significativa entre estoques de carbono e nitrogênio, tanto abaixo como acima da superfície, com a temperatura do solo no mesmo gradiente altitudinal de Ubatuba. Utilizando uma curva de regressão entre estoques e temperatura, esses autores concluíram que um aumento de 1 °C na temperatura média do solo resultaria em uma transferência líquida da floresta para a atmosfera de aproximadamente 17 megagramas de carbono por hectare - Mg C ha⁻¹ - e um megagrama de nitrogênio por hectare - Mg N ha⁻¹.

Para efeito de comparação, vale mencionar que a produtividade de florestas amazônicas de terra firme varia de aproximadamente 10 a 16 Mg C ha⁻¹ (Aragão *et al.*, 2009), ao passo que a produtividade primária líquida em florestas montanas da porção andina do bioma varia de 6,0 a 6,5 Mg C ha⁻¹ (Girardin *et al.*, 2010). Portanto, a potencial perda de carbono e nitrogênio em decorrência do aumento da temperatura pode ser considerável (Jobbagy e Jackson, 2000; Amundson *et al.*, 2003), ainda que esses cálculos não tenham levado em consideração eventuais aumentos na produtividade primária devido à

elevação do calor e concentração de CO₂ na atmosfera.

Embora a tendência observada em Ubatuba seja inequívoca, essas conclusões ainda são preliminares, pois, como se sabe, o processo de decomposição e respiração do solo não depende unicamente da temperatura (Davidson e Janssen, 2006).

Os ciclos biogeoquímicos são também fortemente afetados pela água, não apenas pela quantidade total, mas pela sazonalidade das chuvas em florestas tropicais (Saiter *et al.*, 2009). Tem sido verificado para a Mata Atlântica, que os processos de estoque, produtividade da biomassa e de dinâmica do carbono e nitrogênio são fortemente influenciados pela pluviosidade (Villela *et al.*, 2012). Tal fator climático altera de forma expressiva o processo de decomposição, já que uma rápida taxa de decomposição é frequentemente o resultado de maiores quantidades de água, estimulando a quebra da matéria orgânica e liberação de nutrientes, o que após um período de estiagem pode acarretar em pulsos de nutrientes (Saiter *et al.*, 2009). Tendo-se como base a previsão de intensificação das chuvas durante o verão no sudeste brasileiro, pode-se esperar que houvesse um incremento nas taxas de decomposição da matéria orgânica, com consequente perda de nutrientes neste período (Villela *et al.*, 2012). O aprimoramento da mensuração e estimativas de tais processos é necessário em diferentes tipos fisionômicos da Mata Atlântica, para que seja possível prever com maior precisão os efeitos das alterações climáticas nos processos biogeoquímicos da Mata Atlântica.

5.5.3 CERRADO

Para o Cerrado, as projeções mais severas indicam que a maioria do bioma sofrerá um aumento de temperatura em torno de 4 °C até o final deste século (Marengo *et al.*, 2009), exceto na região de transição com a Amazônia, onde o aumento da temperatura pode chegar a até 6°C. As projeções menos severas de temperatura apontam para um aumento de 2 °C na parte leste do Cerrado. Quanto à precipitação, as projeções mais severas indicam um decréscimo de 20 a 50% em relação aos valores atuais na parte central e sul do Cerrado, e uma redução de aproximadamente 70% na porção norte. As projeções menos severas indicam uma redução de 30% nas partes central e sul e uma redução de 40% na porção norte.

Mudanças na distribuição das chuvas ao longo do ano também são esperadas no Cerrado brasileiro (Marengo *et al.*, 2010). Na região norte-nordeste do Cerrado, é esperado um aumento de 20 a 30 dias na duração da estação seca (entre os meses de maio e setembro). Da mesma maneira, espera-se um decréscimo no número de eventos de chuva por ano no estado do Tocantins, nas regiões norte do Estado de Goiás, nordeste do Estado do Mato Grosso e no centro do Estado de Minas Gerais. Por outro lado, um aumento no volume de chuva na forma de tempestade é esperado para a região centro-sul do Cerrado.

O balanço entre a vegetação lenhosa e a vegetação herbácea é um importante aspecto da fisionomia do Cerrado. Estes dois grupos de plantas têm diferentes características não somente no uso dos recursos e resistência a mudanças, mas também têm diferentes papéis na ciclagem de nutrientes. A vegetação lenhosa tem estoques de nutrientes mais recalcitrantes na forma de raízes profundas e caules, enquanto a vegetação herbácea é mais prontamente decomposta (Miranda e Bustamante, 2002). O aumento projetado da duração da estação seca pode resultar em uma maior incidência de fogo, que por sua vez, pode favorecer a vegetação herbácea (Filgueiras, 1991), resultando em uma ciclagem de nutrientes mais aberta em detrimento da vegetação lenhosa.

Outra mudança funcional importante envolvendo as espécies herbáceas seria a alteração da proporção de espécies com metabolismo fotossintético do tipo C3 em relação a aquelas que apresentam metabolismo fotossintético do tipo C4. As plantas C3 são inibidas por temperatura e luminosidade elevadas, apresentando maior taxa fotossintética sob condições moderadas. Já as plantas C4 são adaptadas à luz intensa e a altas

temperaturas. Tais características tem implicações ecológicas importantes e são esperados em função de um aumento na temperatura e na concentração atmosférica de CO₂. Ambientes mais quentes favorecem a produtividade de espécies C4 (Hattersley, 1983), enquanto ambientes com maiores concentrações de CO₂ tendem a favorecer a produtividade de espécies C3 (Collatz *et al.*, 1998).

Dentre as plantas lenhosas, possíveis alterações climáticas podem afetar as estratégias fenológicas das plantas. Por exemplo, espécies sempreverdes sofrendo falta de água durante a estação seca podem perder suas folhas, considerando-se que muitas dessas espécies têm raízes pouco profundas (Goldstein *et al.*, 2008). Espécies brevidecíduas e decíduas podem também ter sua fenologia e, conseqüentemente, seu balanço interno de carbono alterados, resultando no decréscimo da produtividade dessas espécies. Outro aspecto importante das espécies decíduas, brevidecíduas e sempreverdes é a concentração de produção de folhas na estação seca (Lenza, 2005). Lenza (2005) sugere que um decréscimo na temperatura no começo da estação seca pode representar um sinal para senescência e abscisão de folhas em plantas decíduas e brevidecíduas, mesmo que o conteúdo de água no solo ainda seja alto. Adicionalmente, Lenza (2005) cogitou a possibilidade que a produção de folhas em todos os grupos fenológicos poderia ser estimulada pelo aumento da demanda evaporativa da atmosfera e pelo decréscimo do conteúdo de água no solo. Caso esses fatores ambientais sejam os principais gatilhos para processos fenológicos, pode-se supor que mudanças climáticas terão um impacto significativo sobre a fenologia das espécies vegetais do Cerrado.

A produtividade primária do Cerrado pode potencialmente ser reduzida frente às mudanças climáticas projetadas para este bioma. Ainda que possa ocorrer um aumento na eficiência fotossintética devido ao aumento nas concentrações de CO₂ na atmosfera, mudanças na disponibilidade de água e aumentos da temperatura do ar poderão influenciar de uma forma negativa a produtividade primária (Bonan, 2008). O aumento da temperatura provavelmente resultará em uma redução do processo fotossintético relacionado com a afinidade da enzima rubisco por CO₂ aliado a um aumento na demanda evaporativa (Berry e Björkman, 1980). O aumento da demanda evaporativa resultará em menos água para a vegetação e aumento das perdas de água por evapotranspiração. Portanto, haverá uma tendência de menor abertura dos estômatos durante a fotossíntese, resultando em um decréscimo na taxa fotossintética. Adicionalmente, na estação seca o Cerrado passa a ser uma fonte de carbono para a atmosfera. Portanto, um aumento na duração deste período implicaria também em uma redução na produtividade primária do Cerrado.

O mesmo aumento na duração do período seco pode potencialmente resultar em um aumento na vulnerabilidade aos incêndios que ocorrem tipicamente neste período no Cerrado (Mistry, 1998). O aumento na ocorrência de eventos de fogo resultaria em uma diminuição dos estoques de biomassa e nutrientes. Sob este cenário, os solos teriam um papel importante na manutenção dos estoques de carbono.

5.5.4 CAATINGA

De acordo com as projeções feitas por Marengo *et al.* (2009, 2010), espera-se para o bioma Caatinga uma redução no valor total e o aumento da variabilidade nos padrões de precipitação, bem como um aumento no número de dias secos e da temperatura do ar. As possíveis conseqüências dessas mudanças no clima seriam secas mais intensas e frequentes, inundações e a perda de potência na geração de energia hidroelétrica (MMA, 2004). A produção de alimento também seria seriamente afetada e o aumento na variabilidade das precipitações afetaria também a pecuária.

Em termos ecológicos, as projeções climáticas para o futuro sugerem uma redução dos já baixos volumes de chuva e do aumento de temperatura, levando a um aumento na evapotranspiração. Como esses são os parâmetros que mais interferem no funcionamento do bioma Caatinga, espera-se

mudanças significativas em seu funcionamento. Portanto, estratégias no sentido de aumentar a resiliência deste bioma são de fundamental importância. Por exemplo, diversos estudos demonstraram que a regeneração da vegetação nativa aumentaria a eficiência no uso da água, a produtividade primária e os estoques de carbono e nutrientes no solo. Adicionalmente, sistemas de uso do solo baseados em espécies perenes podem aumentar a resiliência dos ecossistemas, sendo mais adequado para enfrentar futuras mudanças climáticas.

A vegetação natural da Caatinga é relativamente bem adaptada à falta de água e altas temperaturas. No entanto, não se conhece os limites deste bioma, sendo possível levantar a seguinte questão: até que ponto aumentos na temperatura e déficit hídrico acentuado afetarão os processos biogeoquímicos que regulam o funcionamento da Caatinga.

Portanto, estudos de longo prazo sobre o funcionamento da Caatinga sob condições extremas serão extremamente valiosos para a futura adaptação deste bioma às mudanças globais que se impõe no futuro.

5.5.5 PANTANAL

Do ponto de vista biogeoquímico, alterações no Pantanal devem ser similares ao que pode ocorrer no Cerrado devido à latitude e algumas semelhanças fitofisionômicas. Contudo, o Pantanal experimenta naturalmente mudanças drásticas que podem estar ligadas ao tempo e posição média no verão austral da banda de chuva da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Dependendo das temperaturas da superfície do mar (TSM) equatorial no Atlântico e no Pacífico, as ZCAS podem estar mais perto (TSM maior) ou mais longe (TSM menor) do Pantanal e isso deve refletir diretamente na intensidade e duração do pulso de inundação anual, interanual, decadal, etc (Bergier e Resende, 2010). O pulso de inundação, principal modulador da estrutura e função do bioma, sofre, portanto, naturalmente mudanças drásticas, como pode ser visto na figura abaixo (Figura 5.5).

De 1900 a 1963 o Pantanal experimentou grande flutuação interanual de disponibilidade hídrica, oscilando entre períodos cheios (> 3 metros na cidade de Ladário) e secos (< 3 metros na cidade de Ladário) (Bergier e Resende, 2010). Todavia, de 1964 a 1973, as chuvas e os níveis máximos anuais foram sempre relativamente mais baixos, restringindo a dinâmica temporal ao canto inferior esquerdo do espaço de fase (em amarelo na Figura 5.5). Nesse período seco as queimadas devem ter sido mais frequentes e mais acentuadas alterando a organização dos ecossistemas pantaneiros. De 1974 até 2006 as precipitações sazonais estão usualmente acima dos 1000 mm e níveis máximos anuais quase sempre superiores a 4 metros (Figura 5.2, em vermelho). A análise em espaço de fase revela, portanto, a possibilidade de ocorrência de um dipolo ou oscilação bimodal nas escalas interanual e decadal.

Neste ano específico, o fato de o Pantanal estar relativamente mais cheio, limitando-se a um modo do dipolo (em vermelho na Figura 5.2), pode ter diversas causas. Há a projeção de um aumento da precipitação na região do Pantanal com as mudanças climáticas (Marengo *et al.*, 2009), devido ao aumento de temperatura dos oceanos e mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul. Por outro lado, a mudança no uso da terra no planalto, especialmente a partir da década de 60, de mata de Cerrado para pastagens (em maior quantidade) e agricultura, pode refletir em um aumento do escoamento superficial de água (*runoff*) do planalto para a planície (Watanabe, 2012), mantendo, portanto, as planícies relativamente mais cheias mesmo para precipitação anual inferior a 1000 mm (Bergier e Resende, 2010).

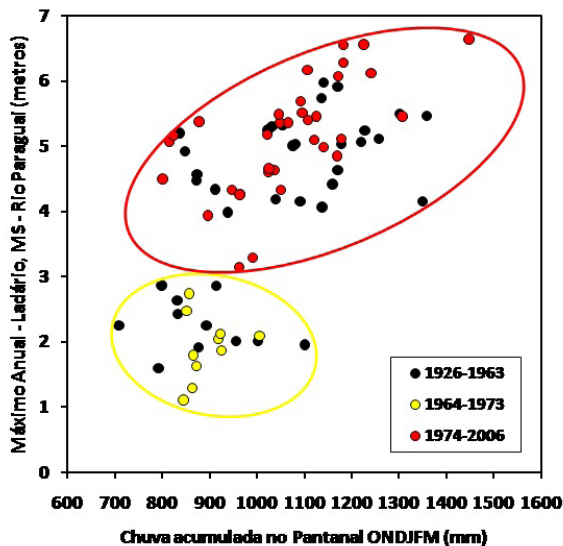


Figura 5.5. Dípolo de cheia ou sucessão da estação de cheia para a seca no Pantanal, revelado através de análise em espaço de fase.
Fonte: adaptado de Bergier e Resende (2010).

5.5.6 PAMPA

Não há ainda informações suficientes sobre os efeitos dos cenários de mudanças climáticas sobre o funcionamento dos campos sulinos. No entanto, inequivocamente, os campos sulinos guardam apreciáveis estoques de carbono em seus solos. As baixas temperaturas contribuem para o acúmulo de matéria orgânica no solo; portanto, um aumento nas temperaturas como previsto, levaria a um aumento nas taxas de decomposição, aumentando as emissões de CO₂ para atmosfera. Similarmente para a Mata Atlântica, não é possível ainda prever se esse aumento nas emissões seria compensado por um aumento na produtividade primária líquida do sistema.

5.5.7 ÁGUAS INTERIORES

O território brasileiro hospeda uma das mais densas redes de sistemas aquáticos de água doce do planeta, contando com mais de 20% da água doce lançada aos oceanos anualmente. Apesar disto, a distribuição e disponibilidade dos recursos hídricos no Brasil não ocorre de maneira uniforme, reflexo das dimensões continentais do país. A região Amazônica hospeda a maior quantidade de água doce do país, enquanto que, na Região Nordeste, encontram-se as maiores carências hídricas, tanto ao sistema natural quanto ao uso humano.

De forma geral há uma grande incerteza em relação aos efeitos de alterações climáticas nos recursos hídricos do Brasil (Roland *et al.*, 2012). As bacias hidrográficas mais importantes do país, segundo seus atributos hidrológicos e ecológicos são a do Amazonas, Tocantins-Araguaia, Paraná, Paraguai e São Francisco. Essas bacias cortam regiões que devem sofrer diferentes impactos relacionados às alterações de temperatura e precipitação (volume e frequência de chuvas), com efeitos distintos na disponibilidade de água ao uso humano assim como à manutenção de processos ecológicos. Por exemplo, alterações na vazão e na temperatura da água podem afetar negativamente a biota aquática.

Os efeitos das alterações climáticas globais em sistemas aquáticos brasileiros serão variáveis em função dos diversos tipos de sistemas aquáticos. Por exemplo, alterações no padrão hidrológico, em sistemas lóticos, podem alterar a qualidade do habitat da biota aquática, em sistemas lênticos processos como eutrofização podem ser mais intensos, assim como, a estratificação na coluna d'água pode ser mais pronunciada e prolongada, alterando a disponibilidade e qualidade do habitat e consequentemente afetando as cadeias alimentares. Adicionalmente, esses processos podem favorecer *blooms* de cianobac-

-térias em águas eutróficas, acarretando em sério risco à saúde humana (PaerleHuisman, 2008, 2009). É importante ressaltar que as alterações ambientais antrópicas atuais, que incluem uso do solo, fragmentação da paisagem, represamento e desvio de corpos d'água, urbanização, esgoto e poluentes acarretam pressões muito maiores aos ambientes aquáticos, a curto prazo, que alterações climáticas.

As projeções climáticas propostas por Marengo *et al.* (2010) para este século (até 2100), em cenários de emissões de gases de efeito-estufa A2 (maiores emissões) e B2 (menores emissões), (IPCC, 2007), apontam para um aumento generalizado na temperatura do ar em todo país, assim como um maior número de noites quentes em oposição à diminuição de noites frias, o que pode afetar a temperatura média dos corpos d'água. Regionalmente, o aumento de eventos extremos associados à frequência e volume de precipitação também é previsto. Os cenários apontam para diminuição na pluviosidade nos meses de inverno em todo país, assim como no verão no leste da Amazônia e Nordeste. Da mesma forma a frequência de chuvas na região Nordeste e no Leste da Amazônia (Pará, parte do Amazonas, Tocantins, Maranhão) deve diminuir, com aumento na frequência de dias secos consecutivos. Este cenário deverá impor um stress sério aos já escassos recursos hídricos da região Nordeste. Em contraste, o país deve observar um aumento na frequência e intensidade das chuvas intensas na região subtropical (Região Sul e parte do Sudeste) e no extremo oeste de Amazônia.

○ efeito do aumento sistemático da temperatura na biota aquática de regiões tropicais é pouco conhecido. Cussac *et al.* (2009), em uma revisão sobre peixes neo-tropicais, apresenta a dependência da ecologia e morfologia destas espécies à temperatura da água, apontando como crítica a biodiversidade aquática o aumento da temperatura devido às alterações climáticas. Por outro lado alterações no metabolismo dos peixes, pelo aumento na temperatura média dos corpos d'água pode determinar redistribuição das espécies e dominação de algumas, mais resilientes, em relação a outras.

A intensidade dos eventos de precipitação, conjuntamente com padrões no uso do solo, define o padrão do escoamento e o transporte de material orgânico e inorgânico da bacia de drenagem aos corpos d'água (Johnson *et al.*, 2008), e por conseqüência a dinâmica deposicional destes elementos/nutrientes nas áreas de várzea. Este aspecto é crítico na dinâmica dos corpos d'água da região Amazônica e da Bacia do Paraná, onde os lagos de planície de inundação compõem uma das formas mais abundantes de sistemas lênticos no Brasil. Esses lagos são profundamente afetados pelo pulso de inundação do rio, desta forma alterações na frequência e intensidade da precipitação pode alterar drasticamente esses ecossistemas. Da mesma forma as alterações na turbidez da água por aporte maior ou menor de sedimento aos lagos rasos (Mooij *et al.*, 2009), podem influenciar deletariamente a biota aquática (Meerhoff *et al.*, 2007).

De acordo com Abe *et al.*, (2009), o processo de eutrofização pode aumentar em regiões sujeitas a um aumento de temperatura e no aporte de nutrientes e matéria orgânica para os corpos d'água. Farjalla *et al.* (2006) sugerem que o aumento no aporte de material alóctone nos ambientes aquáticos, especialmente lênticos, pode estimular a produção primária bruta do sistema, no entanto a respiração do sistema também seria favorecida pela disponibilidade de matéria orgânica autóctone de melhor qualidade no ambiente. Entretanto, esses autores argumentam que a eficiência do sistema pode aumentar (referenciando Doddse Cole, 2007), ou seja, apesar de haver uma maior disponibilização de matéria orgânica alóctone, favorecendo a respiração, o resultado seria uma maior produtividade primária líquida (PPL). Uma melhor compreensão da regulação da PPL é crucial na determinação dos fluxos de matéria orgânica ao sedimento e da ação do sistema como acumulador de carbono (Thomaz *et al.*, 2007).

○ reconhecimento da importância do material alóctone para o metabolismo aquático é amplamente reconhecido. Assim, a heterotrofia é padrão na maior parte dos corpos d'água no Brasil, padrão semelhante ao encontrado globalmente (Cole *et al.*, 1994). Este fato foi reportado para lagos Amazônicos (Richey *et al.*, 2002), lagos costeiros na região da mata Atlântica (Kosten *et al.*, 2010; Marotta *et al.*, 2009). Kosten *et al.* (2010) e Marotta *et al.* (2009) encontraram a partir de uma base de estudos em 82 lagos rasos distribuídos entre as latitudes 5 e 55°S (Kosten *et al.*, 2010) e 86 lagos de diferentes profundidades, forma e latitudes (Marotta *et al.*, 2009) valores relativos de 80% e 87% de ambientes heterotró-

-ficos, respectivamente. Em sistemas tropicais o aumento na deposição de matéria orgânica ao sedimento pode ocasionar maiores emissões de metano e dióxido de carbono (Conrad *et al.*, 2010, 2011).

5.6 CONCLUSÕES

As alterações ambientais e climáticas correntes constituem um enorme desafio a curto, médio e longo prazo à humanidade. A resiliência do ambiente a impactos frequentes e intensificados, constitui uma questão crucial. Neste contexto, estudos sobre ciclagem biogeoquímica integram vários fatores, e assim permitem identificar vetores críticos de perturbação do meio. Nossas observações indicam que alguns sistemas naturais estão preocupantemente impactados no Brasil, como, por exemplo, sistemas aquáticos continentais (com problemas sérios de poluição orgânica e inorgânica, excesso de nutrientes e perda dramática de biodiversidade), sistemas estuarinos (com problemas semelhantes aos anteriores, além de riscos associados à elevação do mares, turismo descontrolado, entre outros), sistemas florestais, com perda de biomassa, biodiversidade e alterações na ciclagem de nutrientes. Em alguns casos, os impactos são locais, afetando pouco a dinâmica regional destes sistemas, mas diversos casos já se mostram críticos regionalmente, como o balanço de nitrogênio e carbono, ciclo hidrológico e deposição atmosférica de aerossóis e particulados. Alterações regionais podem interferir em ecossistemas distantes da causa do problema, como o desmatamento interferindo no fluxos hidrológicos, ou o fogo interferindo no metabolismo vegetal pela produção de ozônio em baixa altitude ou de aerossóis que interferem no balanço energético local.

Ressalta-se com este trabalho a necessidade clara e premente da geração de dados, espacialmente explícitos, referentes às alterações do uso e cobertura do solo, da ciclagem de carbono e de nutrientes em diversas regiões do Brasil, em especial nos biomas Pampa, o Pantanal e a Caatinga. Esforços de síntese e compilação, como o protagonizado pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, são essenciais para, não só a sistematização da informação, mas também para a identificação de lacunas críticas da geração de conhecimento ambiental no Brasil. Da mesma forma, a apresentação das informações de maneira regular, com uma sistemática abrangente, identificando linguagem correta, *stakeholders* chaves, e os diversos universos acadêmicos, é um passo importante que o país toma no sentido a difundir sua base de conhecimento, de produção de novas informações e incentivo às novas gerações ao avanço científico e tecnológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abe, D.S. *et al.*, 2009: The effect of eutrophication on greenhouse gas emissions in three reservoirs of the middle Tietê River, Southeastern Brazil. In: Proceedings of the International Association of Theoretical and Applied Limnology, 30, 822-825.

Alho, C.J.R., 2011: Biodiversity of the Pantanal: its magnitude, human occupation, environmental threats and challenges for conservation. Braz. J. Biol., 71, 229-232.

Amundson, R. *et al.*, 2003: Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. Global Biogeochem. Cycles, 17(1), 1031-1042.

Aragão, L.E.O.C. *et al.*, 2009: Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. Biogeosciences, 6, 2759-2778.

Bergier, I. *et al.*, 2012: Biofuel production from water hyacinth in the Pantanal wetland. Ecohydrology and Hydrobiology, 12:77-84.

- Bergier, I. e E. K. Resende, 2010: Dinâmica de cheias no Pantanal do Rio Paraguai de 1900 a 2009. In: Anais. Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 3, 2010, Cáceres, MT, 16-20 de outubro 2010. Campinas/ São José dos Campos: EmbrapaInformáticaAgropecuária; São José dos Campos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) p. 35-43. Disponível em <http://www.geopantanal2009.cnptia.embrapa.br/2010/cd/p147.pdf>.
- Berry, J. e O. Björkman, 1980: Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 31(1), 491-543.
- Biasi, C. *et al.*, 2008: Initial effects of experimental warming on carbon exchange rates, plant growth and microbial dynamics of a lichen-rich dwarf shrub tundra in Siberia. *Plant Soil*, 307(1-2), 191-205.
- Bonan, G.B., 2008: Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449.
- Bustamante, M.M.C. *et al.*, 2012: Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. *Braz. J. Biol.*, 72(3), suppl., 655-671.
- Castro, A., 1994: Comparação florística de espécies do Cerrado. *Silvicultura*, 15(58), 16-18.
- Chapin III, F.S. *et al.*, 2002: *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York, NY: Springer, 436 pp.
- Cole, J.J. *et al.*, 1994: Carbon-dioxide supersaturation in the surface waters of lakes. *Science*, 265(5178), 1568-1570.
- Collatz, G.J. *et al.*, 1998: Effects of climate and atmospheric CO₂ partial pressure on the global distribution of C₄ grasses: present, past, and future. *Oecologia*, 114(4), 441-454.
- Conrad, R. *et al.*, 2010: Methanogenic pathway, ¹³C isotope fractionation, and archaeal community composition in the sediment of two clear-water lakes of Amazonia. *Limnol. Oceanogr.*, 55(2), 689-702.
- Conrad, R. *et al.*, 2011: Stable carbon isotope discrimination and microbiology of methane formation in tropical anoxic lake sediments. *Biogeosciences*, 8, 795-814.
- Cox, P.M. *et al.*, 2004: Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theor. Appl. Climatol.*, 78, 137-156.
- Cussac, V.E. *et al.*, 2009: Fishes of Southern South America: a story driven by temperature. *Fish Physiol. Biochem.*, 35, 29-42.
- Da Rocha, H.R. *et al.*, 2009: Evapotranspiration. In: *Amazonia and Global Change*, pp. 261-272. [Keller, M. *et al.* (Eds.)], Geophysical Monograph Series, vol. 186, American Geophysical Union, Washington, DC: AGU, 565 pp.
- Davidson, E.A. e I.A. Janssen, 2006: Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165-73.
- Dodds, W.K. e J.J. Cole, 2007: Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: it's not just the autotrophs. *Aquat. Sci.*, 69(4), 427-439.
- Dorrepaal, E. *et al.*, 2009: Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. *Nature*, 460(7255), 616-619.
- Eiten, G., 1972: The Cerrado vegetation of Brazil. *Bot. Rev.*, 38(2), 201-341.

- Farjalla, V.F. *et al.*, 2006: Influence of floodpulse on bacterial growth and DOC consumption in a clear water Amazonian lake. *Microb. Ecol.*, 52, 334-344.
- Ferreira, R. N. e T. M. Rickenbach, 2011: Regionality of monsoon onset in South America: a three-stage conceptual model. *Inter. J. Climatol.*, 31(9), 1309-1321.
- Filgueiras, T.S., 1991: A floristic analysis of the gramineae of Brazil's Distrito Federal & a list of the species occurring in the area. *Edinb. J. Bot.*, 48, 73-80.
- Filgueiras, T.S., 2002: Herbaceous plant communities. In: *The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a Neotropical savanna* [Oliveira, P.S. e R.J. Marquis (Eds.)]. New York, NY: Columbia University Press, pp. 121-139.
- Filoso, S. *et al.*, 2006: Human activities changing the nitrogen cycle in Brazil. *Biogeochemistry*, 79(1-2), 61-89.
- Freitas, A.D.S. *et al.*, 2012: How much nitrogen is fixed by biological symbiosis in tropical dry forests? 2. Herbs. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. OF, p. 1-12.
- Girardin, C.A.J. *et al.*, 2010: Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. *Global Change Biol.*, 16(12), 3176-3192.
- Goldstein, G. *et al.*, 2008: Water economy of neotropical savanna trees: six paradigms revisited. *Tree Physiol.*, 28(3), 395-404.
- Gonçalves, H.C. *et al.*, 2011: Hydrological cycle. *Braz. J. Biol.*, 71, 241-253.
- Grimm, A.M., 2011: Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 537-554.
- Hattersley, P.W., 1983: The distribution of C3 and C4 grasses in Australia in relation to climate. *Oecologia*, 57, 113-128.
- Howarth, R.W. *et al.*, 1996: Regional nitrogen budgets and riverine N and P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: natural and human influences. *Biogeochemistry*, 35(1), 75-139.
- Huntingford *et al.*, 2013: Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂-induced climate change, *Nature Geoscience*, 6, 268–273, doi:10.1038/ngeo1741.
- IBGE, 2004: Mapa da vegetação do Brasil e Mapa de biomas do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Rio de Janeiro, RJ.
- IBGE, 2009: Manual técnico de geomorfologia. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Manuais Técnicos em Geociências, 51, 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ, 175 pp.
- INMET, 1992: Normas Climatológicas do Brasil: 1961-1990. Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), Brasília, DF, 465 pp.
- IPCC, 2007: *Climate change 2007: Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). New York, NY: Cambridge University Press, 851 pp.
- Irion, G., 1978: Soil infertility in the Amazonian rain forest. *Naturwissenschaften*, 65, 515-519.

- Jacomine, P.K.T., 1996: Solos sob caatingas – características e uso agrícola. In: O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e desenvolvimento sustentado [Alvarez V. e M.P.F. Fontes (Eds.)]. Viçosa, SBCS/UFV-DS, pp.95-111.
- Jenny, H., 1941: Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Mineola, NY: Courier Dover Publications, 281 pp.
- Jobbagy, E.G. e R.B. Jackson, 2000: The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.*, 10(2), 423-436.
- Johnson, M.S. *et al.*, 2008: CO₂ efflux from Amazonian headwater streams represents a significant fate for deep soil respiration. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L17401.
- Jordan, C.F., 1989: Are process rates higher in tropical forest ecosystems? In: Mineral Nutrients in Tropical Forests and Savanna Ecosystems [Proctor, J. (Ed.)]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, pp. 205-215.
- Jordan, C.F. e R. Herrera, 1981: Tropical rain forests: are nutrients really critical? *Am. Nat.*, 117, 167-180.
- Kauffman, J.B. *et al.*, 1995: Fire in the Brazilian Amazon: biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. *Oecologia*, 104, 97-409.
- Keller M. *et al.*, 2009: Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Series 186, American Geophysical Union, Washington, DC: AGU, 563pp.
- Kirschbaum, M.U.F., 2000: Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biogeochemistry*, 27, 753-760.
- Kosten, S. *et al.*, 2010: Climate-dependent CO₂ emissions from lakes. *Global Biogeochem. Cycles*, 24, GB2007, doi:10.1029/2009GB003618.
- Lenza, E., 2005: Fenologia, demografia foliar e características foliares de espécies lenhosas em um Cerrado sentido restrito no Distrito Federal e suas relações com as condições climáticas. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134 pp.
- Lewis, S.L. *et al.*, 2011: The 2010 Amazon Drought. *Science*, 331(6017), 554.
- Marengo J.A. *et al.*, 2001: Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, 14: 833-852.
- Marengo, J.A. *et al.*, 2009: Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *Int. J. Climatol.*, 29(15), 2197-2352.
- Marengo, J.A. *et al.*, 2010: Future change of climate in South America in the late twenty-first century: inter-comparison of scenarios from three regional climate models. *Clim. Dyn.*, 35(6), 1073 - 1097.
- Marotta, H. *et al.*, 2009: Large CO₂ disequilibria in tropical lakes. *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB4022.
- Martinelli, L.A. *et al.*, 1999: Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: tropical versus temperate forests. *Biogeochemistry*, 46, 45-65.
- Martinelli, L.A. *et al.*, 2012: Nitrogen mass balance in the Brazilian Amazon: an update. *Braz. J. Biol.*, 72(3), suppl., 683-690.

- Martins, L.F.B., 2011: Alterações nos fluxos de gases do solo e na ciclagem de carbono e nitrogênio após aquecimento do solo em áreas de Mata Atlântica. Dissertação de Mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 86 pp.
- McGrath, D.A. *et al.*, 2001: Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazonia. *Ecosystems*, 4(7), 625-645.
- Meerhof, M. *et al.*, 2007: Can warm climate-related structure of littoral predator assemblies weaken the clear water state in shallow lakes? *Global Change Biol.*, 13, 1888-1897.
- Meier, I.C. e Leuschner, C., 2010: Variation of soil and biomass carbon pools in beech forests across a precipitation gradient. *Global Change Biol.*, 16, 1035-1045.
- Mendonça, R.C. *et al.*, 2008: Flora vascular do bioma Cerrado: checklist com 12.356 espécies. In: Cerrado: ecologia e flora [Sano, S.M. *et al.* (Eds.)]. Embrapa Informação Tecnológica, 2, 421-442.
- Menezes, R.S.C. *et al.*, 2012: Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. *Braz. J. Biol.*, 72(3), suppl., 643-653.
- Mercante, M.A. *et al.*, 2011: Geomorphology and habitat diversity in the Pantanal. *Braz. J. Biol.*, 71(1), 233-240.
- Miranda, H.S. e M.M.C. Bustamante, 2002: The firefactor. In: The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna [Oliveira, P.S. e R.J. Marquis (Eds.)]. New York, NY: Columbia University Press, pp. 51-68.
- Mistry, J., 1998: Fire in the Cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. *Prog. Phys. Geogr.*, 22(4), 425.
- MMA, 2004: Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca, PAN-BRASIL. Edição comemorativa dos 10 anos da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca. CCD. Ministério do Meio Ambiente (MMA), secretaria de Recursos Hídricos, Brasília, 220 pp.
- Mooij, W.M. *et al.*, 2009: Linking species- and ecosystem-level impacts of climate change in lakes with a complex and a minimal model. *Ecol. Model.*, 220, 3011-3020.
- Nobre, C.A. *et al.*, 2009: Understanding the climate of Amazonia: Progress from LBA. In: Amazonia and Global Change [Keller, M. *et al.* (Eds.)]. American Geophysical Society, Washington, DC, pp. 145-147.
- Ometto J.P.H.B. *et al.*, 2005: Amazonia and the modern carbon cycle: lessons learned. *Oecologia*, 143, 483-500, doi:10.1007/S00442-005-0034-3
- Ometto J.P. *et al.*, 2011: Amazon deforestation in Brazil: effects, drivers and challenges. *Carbon Management*, 2(5), pp. 575-585.
- Paerl, H.W. e J. Huisman, 2008: Blooms like it hot. *Science*, 320, 57-58.
- Paerl, H.W. e J. Huisman, 2009: Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environ. Microbiol. Rep.*, 1, 27-37.
- Pillar, V.D. *et al.*, 2012: The Southern Brazilian grassland biome: soil carbon stocks, fluxes of greenhouse gases and some options for mitigation. *Braz. J. Biol.*, 72(3), suppl., 673-681.
- Pott, A. *et al.*, 2011: Plant diversity of the Pantanal wetland. *Braz. J. Biol.*, 71, 265-273.

- Quesada, C.A. *et al.*, 2009: Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. *Biogeosciences Discuss.*, 6, 3993-4057.
- Quesada, C.A. *et al.*, 2010: Chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, 7, 1515-1541.
- Raich, J.W. *et al.*, 2006: Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. *Ecology*, 87, 76-87.
- Randerson, J.T. *et al.*, 2002: Net ecosystem production: a comprehensive measure of net carbon accumulation by ecosystems. *Ecol. Appl.*, 12(4), 937-947.
- Ratter, J.A. *et al.*, 2003: Analysis of the floristic composition of the Brazilian Cerrado vegetation III: Comparison of the woody vegetation of 376 areas. *Edinb. J. Bot.*, 60(1), 57-109.
- Reatto, A. *et al.*, 1998: Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: *Cerrado: ambiente e flora* [Sano, S.M. e S.P. Almeida (Eds.)]. Embrapa Cerrados, Planaltina, Brasil, pp. 47-86.
- Reddy, S.J. 1983: Climatic classification: the semi-arid tropics and its environment - a review. *Pesq. Agropecu. Bras.*, 18, 823-847.
- Ribeiro, J.F. e Walter, B.M.T., 1998: Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: *Cerrado: ambiente e flora* [Sano, S.M. e S.P. Almeida (Eds.)]. Embrapa Cerrados, Planaltina, Brasil, pp. 89-166.
- Richey, J.E. *et al.*, 2002: Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature*, 416(6881), 617-620.
- Richter, D.D. e L.I. Babbar, 1991: Soil diversity in the tropics. *Adv. Ecol. Res.*, 21, 315-389.
- Roland, F. *et al.*, 2012: Climate change in Brazil: perspective on the biogeochemistry of inland waters. *Braz. J. Biol.*, 72(3), suppl., 709-722.
- Saiter, F.Z. *et al.*, 2009: Rain forests: Floristics. In: *International Commission on Tropical Biology and Natural Resources, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Oxford: UNESCO, Eolss Publishers, 1, 203-228
- Sampaio, E.V.S.B., 1995: Overview of the Brazilian caatinga. In: *Seasonally Dry Tropical Forests* [Bullock, S.H. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, UK, e New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 35-63.
- Sanchez, P.A., 1976: *Properties and Management of Soils in the Tropics*. New York, NY: John Wiley & Sons, 618 pp.
- Sanchez, P.A., e S.W. Buol, 1975: Soils of the tropics and the world foodcrisis. *Science*, 188, 598-603.
- Schulze, E.-D. *et al.*, 2000: Climate change: managing forests after Kyoto. *Science*, 289(5487), 2058-2059.
- Silva, J.R.C., 2000: Erosão e produtividade do solo no semi-árido. In: *Agricultura, sustentabilidade e o semiárido* [Oliveira, T.S. *et al.* (Eds.)]. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, pp. 168-213.
- Sombroek, W., 2001: Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall. *Ambio*, 30(7), 388-396.
- Sombroek, W.G., 1966: *Amazon soils: a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region*. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, 330 pp.

- Sousa Neto, E. *et al.*, 2011: Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, methane and carbon dioxide in a gradient of elevation in the coastal Brazilian Atlantic forest. *Biogeosciences*, 8(3), 733-742.
- Stark, N., 1971: Nutrient cycling. I. Nutrient distribution in some Amazonian soils. *Trop. Ecol.*, 12, 24-50.
- Stark, N.M. e Jordan, C.F., 1978: Nutrient retention by the root mat of an Amazonian rain forest. *Ecology*, 59(3), 434-437.
- Thomaz, S.M. *et al.*, 2007: Floods increase similarity among aquatic habitats in river-floodplain systems. *Hydrobiologia*, 579(1), 1-13.
- Trumbore, S.E. *et al.*, 1995: Belowground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. *Global Biogeochem. Cycles*, 9, 515-528.
- Veloso, H.P. *et al.*, 1991: Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um Sistema Universal. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Rio de Janeiro, 124 pp. Disponível em <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/classificacaovegetal.pdf>.
- Vieira, S.A. *et al.*, 2011: Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above- and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range. *Ecol. Evol.*, 1, 421-434.
- Villela, D.M. *et al.*, 2006: Effect of selective logging on forest structure and nutrient cycling in a seasonally dry Brazilian Atlantic forest. *J. of Biog.*, 33, 506-516.
- Villela, D.M. *et al.*, 2012: Carbon and nitrogen stock and fluxes in coastal Atlantic Forest of Southeast Brazil: potential impacts of climate change on biogeochemical functioning. *Braz. J. Biol.*, 72(3) suppl., 633-642.
- Wagai, R. *et al.*, 2008: Climate and parent material controls on organic matter storage in surface soils: A three-pool, density-separation approach. *Geoderma*, 147(1-2), 23-33.
- Watanabe, M.D.B., 2012a: Agricultura, pastagens e mata nativa: cálculo e simulação dos valores monetários dos fluxos hidrológicos e do carbono na Bacia do Taquarizinho utilizando a metodologia emergética. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP, 252 pp.
- Watanabe, M.D.B. *et al.*, 2012b: Nitrogen cycle and ecosystem services in the Brazilian La Plata Basin: anthropogenic influence and climate change. *Braz. J. Biol.*, 72(3), suppl., 691-708.