

## A Dinâmica da Floresta Neotropical e as Mudanças Climáticas Globais

João Ruffin Leme de Godoy<sup>1</sup>, Mauro Alexandre Marabesi<sup>2</sup>, Leila Cristina Mortari<sup>2</sup>,  
Marcos Pereira Marinho Aidar<sup>1</sup> e Marcos Silveira Buckeridge<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Seção de Fisiologia e Bioquímica de Plantas, Instituto de Botânica, Secretaria de Estado do Meio Ambiente

<sup>2</sup> Departamento de Botânica, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo

\* Autor para correspondência: [msbuck@usp.br](mailto:msbuck@usp.br)

### RESUMO

Entender como os diferentes grupos funcionais responderão às mudanças climáticas em vigor no planeta tem grande relevância quando se pensa em conservação, manejo e modelagem de produção de biomassa em regiões com elevada biodiversidade como a Mata Atlântica e outras florestas tropicais. Em ecossistemas deste tipo, as árvores podem desempenhar um papel fundamental na mitigação dos impactos causados pelas crescentes concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera, captando carbono através da fotossíntese e transformando-o em biomassa. Numa abordagem sucessional, são apresentadas neste artigo uma breve introdução sobre o processo sucessional, algumas características dos diferentes grupos funcionais (principalmente no tocante às diferentes estratégias de regeneração), sua relação com uma atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>, as respostas das plantas a essa nova condição ambiental e alguns resultados obtidos com espécies brasileiras. É sugerido que o processo sucessional teria maior capacidade de captura de carbono do que o uso de espécies isoladas, com ganhos ambientais consideráveis devido às possibilidades de regeneração da biodiversidade.

**Palavras-chave:** CO<sub>2</sub>, ecofisiologia, mata atlântica, sucessão ecológica

### ABSTRACT

Understanding how groups of different functional groups will respond to the Global Climatic Changes is of great relevance when one thinks about conservation, management and modeling of biomass production in regions with elevated biodiversity such as the Atlantic Forest and other tropical forests. In such ecosystems, trees can play a key role in the mitigation of the impacts caused by the increasing concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub>, by absorbing part of this gas through photosynthesis and transforming it into biomass. Using a succession approach, here we present a brief introduction about the succession process, some features of the functional groups (mainly that related to forest regeneration strategies), their relationship with an atmosphere enriched with CO<sub>2</sub>, the responses of plants to these new environmental conditions and some results obtained with Brazilian species. We suggest that the use of forest regeneration is more advantageous due to the higher capacity to produce positive environmental benefits, such as the increase in biodiversity.

**Key –words:** Atlantic rain forest, CO<sub>2</sub>, ecological succession, ecophysiology

## O PROCESSO SUCESSIONAL

A sucessão ecológica pode ser entendida como um processo de modificações na estrutura e composição específica e nas demais características de uma comunidade (e.g. diversidade, biomassa, produtividade, estabilidade, fisionomia) ao longo do tempo, resultando num estado onde estas modificações são muito lentas ou inexpressivas, quando então através de um distúrbio, o processo de estruturação se re-inicia. É um processo de desenvolvimento e auto-organização da comunidade (ou do ecossistema), direcionando-se da simplicidade para a complexidade organizacional, de formas de vida mais simples para mais complexas e diversificadas, e seu processo de destruição ou desestruturação e também seu reinício, que até certo ponto são passíveis de previsão (Finegan 1984, Begon *et al.* 1996, Barnes *et al.* 1998).

O estudo do processo sucessional remonta ao advento de disciplinas como a ecologia e as ciências florestais. Escritores Romanos e estudiosos do século XVIII e XIX já citavam as florestas como não estáticas. Estas conteriam uma composição e uma estrutura em contínua mudança como resultado de perturbações ou do próprio desenvolvimento. Em 1863, Thoreau cunhou o termo "*forest succession*". Em seguida, trabalhos precursores surgiram com Douglas (1875 e 1888) (Spurr 1952).

Na década de 60, Budowski (1963) indicou aspectos importantes do processo de sucessão secundária<sup>1</sup> tropical, considerando os estádios sucessionais, os grupos funcionais e as espécies que os compõem. Além da dominância de florestas secundárias na América Tropical, o autor propôs que estas variam quanto à fisionomia, estrutura e composição florística conforme a idade, o tipo de solo e a natureza das intervenções a que foram submetidas e que nas primeiras fases da sucessão ocorre um número reduzido de espécies (freqüentemente domínio de uma só espécie). O autor colocou ainda que, à medida que se chega à maturidade ocorre uma redução da velocidade de mudança da composição florística, culminando num estado mais estável (e não estagnado), ocorre um aumento da altura, da área basal, do volume e da densidade de árvores por unidade de superfície das comunidades, verifica-se a presença de um gradiente de substituição de espécies intolerantes por tolerantes à sombra, pelo menos em uma fase da vida, verifica-se um aumento da heterogeneidade da composição por idade, uma diminuição da viabilidade das sementes, um aumento da regeneração das espécies, um aumento da dureza e da densidade da madeira, um aumento da abundância de palmeiras e de epífitas e uma diminuição da abundância de gramíneas e de lianas.

Trabalhos mais recentes apontaram diferenças significativas na estrutura e composição específica do estrato arbóreo da Mata Atlântica sobre solos eutróficos, oriundos de rochas calcárias, no alto vale do Rio Ribeira de Iguape. Nestas áreas, ao contrário da dominância usualmente atribuída às Melastomataceae (notadamente à *Tibouchina pulchra*), os autores encontraram, além de árvores de maior porte e em

---

<sup>1</sup> sucessão em área previamente ocupada por vegetação, mas que sofreu uma perturbação como a abertura de uma clareira natural ou antrópica.

menor densidade que trechos sob solos ácidos na mesma região, uma dominância da família Leguminosae, especialmente da espécie *Piptadenia gonoacantha* ao longo do processo sucessional (Aidar *et al.* 2001). A compreensão desse processo tem sido considerada importante para a conservação, manejo, restauração e monitoramento em áreas naturais, excelentes históricos das idéias, abordagens e modelos já propostos são encontrados em Sampaio (1997) e Tabarelli (1997).

## **OS GRUPOS FUNCIONAIS**

A abertura de clareiras naturais (e.g. por quedas de galhos ou de árvores, deslizamentos, ciclones) e sua subsequente cicatrização, é um importante componente da dinâmica interna de florestas tropicais. Esse processo, determinante para a composição específica e estrutura fisionômica e fitossociológica das comunidades vegetais em questão, cria na floresta um mosaico de diferentes estádios sucessionais, com composição, estrutura e microclimas específicos, que apresentam também uma heterogeneidade espacial interna já bem documentada. Nesse cenário, diferentes pressões seletivas surgem no ambiente florestal, interferindo no estabelecimento e desenvolvimento das plantas, selecionando estratégias e moldando as características dos ciclos de vida das espécies na floresta (Watt 1947, Whitmore 1996).

Nesse quadro de "heterogeneidade dinâmica" da floresta, foram reconhecidos nos últimos anos grupos cujas espécies apresentam estratégias de germinação, de estabelecimento, de regeneração, de estratificação, de dispersão, de reprodução ou desenvolvimento similares, chamados de guildas ou grupos funcionais. Entre os grupos mais reconhecidos estão os das espécies pioneiras, secundárias iniciais ou tardias, os das espécies de subosque ou dossel, os das espécies anemocóricas ou zoocóricas, anemófilas ou ornitófilas e perenes ou decíduas (Whitmore 1989, Tabarelli *et al.* 1994, Gandolfi *et al.* 1995).

Relacionadas ao processo sucessional, Budowski (1965) classificou as árvores em quatro classes: pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e climácicas, reiterando mais tarde que a diferenciação entre os três últimos grupos é uma tarefa árdua e desafiadora (Budowski, 1970). Após alguma discussão (Denslow 1980, Hubbel & Foster 1986, e.g.) Swaine & Whitmore (1988) classificaram as espécies em apenas dois grupos: espécies pioneiras, capazes de germinar e se estabelecerem em grandes clareiras e áreas abertas (tolerando um ambiente mais hostil: alta irradiância, alta temperatura, baixa umidade do ar e do solo); e espécies climácicas (não pioneiras), adaptadas a germinar e se estabelecer à sombra, no subosque da floresta. A Tabela 1 apresenta outros atributos desses dois grupos funcionais.

Atualmente considera-se que nos extremos continuam as espécies pioneiras e as espécies secundárias tardias ou climácicas, e cobrindo todo o gradiente (temporal e espacial) de variações microambientais e de estratégias adaptativas entre eles, estão espécies intermediárias, como as secundárias iniciais (Gandolfi *et al.* 1995, Aidar *et al.* 2003).

Segundo Whitmore (1996), um dos gradientes mais importantes recai sobre a

disponibilidade de luz entre clareiras e subosque. Processos importantes, como a fotossíntese e a fotomorfogênese, estão relacionados à luz, determinando diferentes (e sobrepostos) padrões de respostas biológicas.

Incluindo as maiores taxas de mortalidade, o estabelecimento – transição entre o período em que as plântulas apresentam total dependência das reservas oriundas da planta mãe e o estabelecimento do aparato fotossintético, onde a plântula não depende mais de reservas – é uma fase crucial para o sucesso das espécies arbóreas num ambiente florestal (Buckeridge *et al.* 2000, Santos & Buckeridge 2004, Santos *et al.* 2004). Boa parte da seleção dos indivíduos ocorre nesse momento, influenciando de forma importante a composição e a diversidade da floresta.

**Tabela 1.** Atributos determinados empiricamente para espécies arbóreas pioneiras e climácicas (não pioneiras) (modificado de Finegan 1984).

<b>atributos (funções)</b>	<b>pioneiras</b>	<b>não pioneiras</b>
<b>Semente</b>		
Amplitude da dispersão	longas distâncias	curtas distâncias
Vetores de dispersão	vento / aves / morcegos	roedores / aves / nenhum
Massa	leve-pesada	pesada
<b>Germinação</b>		
Estímulo pela luz	sim	não
Inibição por vermelho extremo	sim	não
<b>Planta</b>		
Longevidade	baixa	alta
Tempo para maturidade reprodutiva	curto	longo
Crescimento em altura	rápido	lento
Altura na maturidade	baixa	alta
Taxas de aquisição de recursos	alta	baixa
Saturação da fotossíntese	alta luz	baixa luz
Recuperação após escassez de recursos	rápida	lenta

Para se compreender o ciclo biológico, a regeneração natural e conseqüentemente a classificação de uma espécie em um grupo funcional, é necessário ainda um bom conhecimento quanto à germinação e fisiologia de sementes, à sobrevivência de jovens e suas interações com a abertura de clareiras (Whitmore 1989, Swaine 1996).

## **OS GRUPOS FUNCIONAIS E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS**

Atualmente, a perda e fragmentação de habitats devido às mudanças no uso e cobertura do solo, à invasão das áreas naturais por espécies exóticas, à poluição, ao esgotamento dos aquíferos e aos altos índices demográficos e de pobreza verificados ao redor do globo aliam-se às altas (e crescentes desde o começo da revolução industrial) taxas de emissão dos gases que provocam o efeito estufa (gás carbônico e metano, principalmente) para compor um quadro de grande ameaça à biodiversidade global, incluindo os seres humanos (Buckeridge, 2008).

Com o aumento, já registrado, da concentração desses compostos na atmosfera, prevê-se para 2075 o dobro da atual concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> (Alcamo *et al.* 1996) que já é 36 % maior que as maiores concentrações de CO<sub>2</sub> que a atmosfera conteve nos últimos 650.000 anos (Siegenthaler *et al.* 2005 *apud* Körner 2006). Um dos fatores mais importantes para a construção deste cenário é a queima de combustíveis fósseis (petróleo e carvão) para a geração de energia e outras atividades humanas como o desmatamento, as queimadas e a pecuária.

Por ser o CO<sub>2</sub> um dos principais gases componentes do efeito estufa (processo de retenção de calor na atmosfera), espera-se que a temperatura média da Terra aumente entre 1 e 6° C nos próximos 100 anos, derretendo geleiras e calotas polares, alterando correntes marítimas e elevando o nível dos mares. Mudanças climáticas poderão ocorrer tanto em nível regional como global, causando alterações nos padrões de precipitação (secas ou enchentes), tempestades e furacões e com isso, mais perda e fragmentação de habitats, aumento de doenças tropicais, deslocamentos de zonas agrícolas, aumento na demanda por irrigação e alterações fenológicas com prejuízos ainda imprevisíveis (Peters & Darling 1985, IPCC 2007, Buckeridge, 2008).

Nesse quadro de grande ameaça à biodiversidade, o conhecimento dos grupos funcionais e das espécies-chave auxiliam na compreensão dos mecanismos de resistência e resiliência das florestas (Noss 2001) e com isto permitem o monitoramento dos possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade.

### **RESPONDENDO A UMA ELEVAÇÃO NA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE CO<sub>2</sub>**

No geral, os efeitos diretos do aumento na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico nas plantas são: *i*) aumento de atividade da Rubisco, via estímulo da carboxilação e inibição da oxigenação da RuBP; *ii*) redução da abertura estomática; *iii*) alteração da respiração mitocondrial; e *iv*) possível redução da transcrição de genes relacionados às trocas gasosas (Rubisco ativase e anidrase carbônica) ou ao crescimento (ciclinas e XET). Indiretamente, ocorre uma alteração no balanço de água e carbono nas plantas, com efeitos secundários sobre o crescimento, partição de recursos e síntese de compostos de defesa (Buckeridge *et al.*, 2008). Em alguns casos pode ocorrer

aclimação, caracterizada por uma redução no investimento em proteínas relacionadas ao aparato fotossintético (*biochemical downregulation*), modulada pelos níveis foliares de carboidratos em consonância com sinais hormonais das raízes (Pritchard *et al.* 1999, Sage 2002).

Além de uma maior eficiência de uso da água, sob CO<sub>2</sub> elevado as plantas mostram um aumento na concentração de carboidratos não estruturais e na eficiência de uso do nitrogênio, uma diminuição da concentração de nutrientes na folha e na planta e um aumento nas taxas de respiração para espécies cultiváveis e diminuição para espécies nativas perenes (Luo *et al.* 1999, Poorter & Pérez-Soba 2002, Sage 2002).

Maiores áreas foliares, folhas mais espessas (*morphological upregulation*) e mais folhas por planta são normalmente observados, assim como um aumento no comprimento e diâmetro de caules e raízes, o que acaba interferindo diretamente nas interações acima e abaixo do solo (Pritchard *et al.* 1999).

Plantas crescidas em CO<sub>2</sub> elevado normalmente apresentam maior massa foliar por centímetro quadrado de folha devido a um aumento da espessura do parênquima palissádico e acúmulo de amido e outros carboidratos não estruturais (e.g. açúcares solúveis) no mesofilo (De Souza *et al.*, 2008b). Esses metabólitos respondem inclusive por uma retroinibição da fotossíntese e explicam, pelo menos em parte, porque o estímulo no crescimento das plantas em alto CO<sub>2</sub> não é diretamente proporcional ao estímulo da fotossíntese (Luo *et al.* 1999, Poorter & Pérez-Soba 2002).

Outro efeito de concentrações elevadas de CO<sub>2</sub> no crescimento das plantas reside numa aceleração do crescimento inicial das mesmas (Hättenschwiler 1997, Würth *et al.* 1998, Centritto *et al.* 1999) e essa aceleração, de certa forma, pode também acelerar o desvio ontogenético sofrido pelas espécies ao longo do seu desenvolvimento (Godoy 2007). Poorter & Navas (2003) mencionam o aumento na massa foliar específica (g.cm<sup>-2</sup>) como um dos principais fatores para explicar esse decaimento na taxa de crescimento relativo sob alto CO<sub>2</sub>.

Atualmente está claro que o grau de resposta à elevação atmosférica de CO<sub>2</sub> depende da capacidade de utilização pela planta dos fotoassimilados (carboidratos) "extras" para crescimento estrutural, ou do seu armazenamento em órgãos especializados, ou ainda da capacidade que a planta tem de transportar esses fotoassimilados (Pritchard *et al.* 1999, Poorter & Pérez-Soba 2002, Buckeridge *et al.* 2008). Por isso plantas com taxas de crescimento relativo mais altas (Poorter 1993), ou com abundância de órgãos de armazenamento (como raízes tuberosas, i.e., drenos fortes) aclimatam menos ou apresentam maiores respostas à elevação na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>. Ao contrário, sob condições de estresse (escassez ou competição por nutrientes ou espaço aéreo/subterrâneo – situação natural) ou com drenos mais fracos, as respostas das plantas e até mesmo da comunidade, em termos de incremento de biomassa, pode ser reduzida (Körner 2006). Dentre os drenos existentes nas plantas, o mais importante atualmente é o lenho das espécies arbóreas devido a sua alta capacidade de armazenar carbono, retirando-o da

atmosfera e compactando-o na forma de celulose (De Souza et al. 2008). Daí a importância da densidade da madeira de cada espécie.

Plantas de crescimento mais rápido (e.g. pioneiras e secundárias iniciais) apresentam respostas mais intensas (Poorter & Pérez-Soba 2002). Contudo, Kerstiens (1998, 2001) encontrou maiores aumentos percentuais na assimilação líquida de CO<sub>2</sub> e na biomassa, menor redução percentual na razão área foliar: biomassa da planta e maior redução no conteúdo de nitrogênio foliar em espécies mais tolerantes à sombra, isto é, secundárias tardias, sugerindo que essas espécies estariam melhor adaptadas em termos de arquitetura e partição de biomassa e nitrogênio, correlacionadas com a utilização de recursos normalmente limitantes em alto CO<sub>2</sub>, como luz, água e nutrientes.

Trechos pouco perturbados de floresta amazônica monitorados durante duas décadas mostraram um aumento na dominância e densidade de gêneros de espécies secundárias iniciais (árvores de crescimento rápido, do dossel e emergentes) e um declínio de gêneros de secundárias tardias (árvores de crescimento lento, do subdossel) (Laurance et al. 2004).

Tais diferenças nas respostas a uma atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> entre os grupos funcionais (aqui quanto às estratégias de regeneração) devem, em médio e longo prazo, acarretar em mudanças na composição específica, na dinâmica, na regeneração, na ciclagem de nutrientes e na estocagem de carbono das florestas (Lovelock et al. 1998, Kerstiens 2001, Laurance et al. 2004). De forma alarmante, evidências recentes indicam que a elevação da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> tornará a floresta mais dinâmica e um *turnover* mais rápido das árvores pode, em longo prazo, reverter o efeito fertilizante do CO<sub>2</sub>, ao favorecer árvores de ciclo de vida mais curto, com madeiras de menor densidade (e.g. pioneiras), reduzindo assim a biomassa de C estocada na floresta (Körner 2004).

Uma síntese sobre as respostas das florestas tropicais às mudanças atmosféricas globais é encontrada em Malhi & Phillipis (2004) e algumas revisões sobre como as plantas brasileiras poderão responder às mudanças climáticas encontram-se em Buckeridge (2008).

## **AS RESPOSTAS DAS PLANTAS BRASILEIRAS A UMA ELEVAÇÃO NA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE CO<sub>2</sub>**

Embora a literatura a respeito do crescimento e fisiologia de plantas sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> seja vasta (Griffin & Seemann 1996, Ceulemans et al. 1999, Pritchard et al. 1999, Luo et al. 1999, Kerstiens 2001, Poorter & Pérez-Soba 2002, Sage 2002, Ainsworth & Long 2004, Malhi & Phillips 2004, Körner 2006, entre os milhares disponíveis) diretamente pouco se sabe sobre as respostas de espécies arbóreas da Mata Atlântica e da Amazônia a esta nova condição. Resultados iniciais são encontrados em Aidar et al. (2002), Oliveira (2006), Godoy (2007) e Marabesi (2007), Buckeridge, (2008, ver capítulos da Dimensão Botânica) e DaMatta et al. (2009).

No Brasil, estudos pioneiros em linhas de pesquisa experimental consolidadas com respostas de plantas às mudanças climáticas foram iniciados pelos grupos de pesquisa dos Professores Marcos Buckeridge (então no Instituto de Botânica de São Paulo) e Carlos Martinez (então na Universidade Federal de Viçosa) (ver Pivetta 2002 para um histórico). Estas atividades foram seguidas pelas publicações de Aidar *et al.* (2002), Buckeridge & Aidar (2002), Costa (2002) e examinando inicialmente as respostas da espécie *Hymenaea courbaril* (Leguminosae) e posteriormente em De Souza *et al.* (2008a), com cana-de-açúcar (Poaceae), Braga *et al.* (2006) com soja, Godoy (2007) com *Sesbania virgata*, *Schizolobium parahyba*, *Piptadenia gonoacantha*, *Dalbergia nigra* e *Hymenaea courbaril*, e Marabesi (2007) com *Senna alata* (Leguminosae). Proveniente do grupo do Prof. Martinez, Oliveira (2006) estudos com *Croton urucurana* e *Cariniana legalis* (Euphorbiaceae e Lecythidaceae, respectivamente).

Numa abordagem intrafilética de ecofisiologia comparada (senso Kerstiens 1998), uma investigação do estabelecimento de cinco espécies arbóreas de Leguminosae da mata atlântica descrita em Godoy (2007) e discutida do ponto de vista da sucessão e fenologia em Buckeridge *et al.* (2007), pertencentes a diferentes grupos funcionais, sob atmosfera ambiente e enriquecida com CO<sub>2</sub>, mostrou maiores valores para altura, área foliar, taxa de crescimento relativo inicial, assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, eficiência de uso da água, capacidade fotossintética e razão raiz : parte aérea para as plantas crescidas sob as concentrações de CO<sub>2</sub> previstas para o final do século. Porém, uma análise mais detalhada revelou que as espécies iniciais na sucessão (*Sesbania virgata*, *Schizolobium parahyba*) apresentaram maiores valores para as taxas iniciais de crescimento relativo, para o número de folhas em torno dos 40 dias após o plantio, para a eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv:Fm), para a assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, para a razão entre a concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesófilo e a concentração ambiente desse gás (Ci:Ca) e para o incremento percentual na capacidade fotossintética (A<sub>max</sub>) e no acúmulo de biomassa sob CO<sub>2</sub> elevado. Porém, essas espécies mostraram também os menores valores para a eficiência intrínseca de uso da água e para os incrementos percentuais na assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, na eficiência intrínseca de uso da água e na redução da taxa de carboxilação máxima da Rubisco e do transporte de elétrons (Godoy 2007).

Esses resultados evidenciaram um gradiente de respostas coincidindo com o gradiente de estratégias de regeneração estudado. Como proposto por Buckeridge *et al.* (2007), os ciclos de vida mais curtos, as maiores densidades populacionais, as madeiras de menor densidade e o quadro oposto apresentado pelas espécies secundárias tardias indicaram que os diferentes grupos funcionais podem, no longo prazo, garantir maior estabilidade ao seqüestro de carbono em relação às espécies isoladamente, pois com o passar do tempo o carbono deixa de ser assimilado e transformado em biomassa pelas plantas pioneiras com maior rapidez e intensidade e passa a ser captado de forma mais lenta, porém mais duradoura e com maior potencial de resposta às mudanças climáticas que estão por vir, pelas espécies secundárias tardias (Buckeridge *et al.* 2007).

Embora não tenham sido observadas mudanças na porcentagem de carbono nas diferentes partes das plântulas, uma diminuição significativa na porcentagem de nitrogênio nas folhas crescidas sob alto CO<sub>2</sub> evidenciou um aumento na eficiência de uso desse elemento por parte das espécies estudadas e o acúmulo de biomassa permitiu estimar o potencial de seqüestro de C de cada parte da planta (Tabela 2, dados compilados de Godoy, 2007).

Esses dados indicaram maior potencial de captação de C pelas espécies mais iniciais na sucessão, especialmente *Schizolobium parahyba*, uma espécie secundária inicial. Atualmente a escolha de espécies voltadas para a recuperação de áreas degradadas e seqüestro de carbono deve considerar um crescimento rápido, um eficiente uso da água, madeira com elevada densidade e solos profundos e férteis, garantindo dessa forma drenos internos de carbono eficientes, culminando em um aumento, e não diminuição, do nível de carbono armazenado na floresta (Körner 2006, Godoy 2007).

**Tabela 2.** Acúmulo extra de C (%) em plantas de *Sesbania virgata*, *Schizolobium parahyba*, *Piptadenia gonoacantha*, *Dalbergia nigra* e *Hymenaea courbaril* após 60 dias de vida e 45 dias de crescimento em alto CO<sub>2</sub> (720 ppm). São mostrados os incrementos percentuais verificados nas plantas crescidas em alto CO<sub>2</sub> em relação às plantas crescidas sob atmosfera normal (os dados originais serão enviados a outra publicação).

PIONEIRA		SECUNDÁRIAS INICIAIS		SECUNDÁRIA TARDIA
<i>Sesbania virgata</i>	<i>Schizolobium parahyba</i>	<i>Piptadenia gonoacantha</i>	<i>Dalbergia nigra</i>	<i>Hymenaea courbaril</i>
+ 44%	+ 64%	+ 35%	+ 20%	+ 20%

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, além dos impactos antrópicos relacionados às mudanças de uso da terra, as florestas tropicais vêm sofrendo alterações advindas da elevação nas concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>, acompanhadas também por alterações nos padrões de temperatura, precipitação e umidade (Chambers & Silver 2004). Em florestas deste tipo, como a Mata Atlântica, a cada um desses fatores associam-se inúmeras respostas e uma variedade de estratégias ecofisiológicas, com valor adaptativo para sobrevivência, apresentadas pelas espécies Reich *et al.* (2003). Essa diversidade de comportamentos, associada às inúmeras possibilidades de interferências do meio na estrutura, desenvolvimento e dinâmica da floresta, compõe um quadro complexo, cujas ferramentas para análise ainda estão em desenvolvimento.

Frente ao problema da elevação das concentrações de gases que provocam o efeito estufa na atmosfera, soluções poderão ser encontradas procurando-se alternativas que seqüestrem CO<sub>2</sub> com maior eficiência ou que mantenham o carbono capturado por mais tempo. Soluções deste tipo aliam-se às necessidades de

conservação e restauração de áreas degradadas e ressaltam a importância de dados ecofisiológicos a respeito do estabelecimento de plântulas, pertencentes a diferentes grupos funcionais ao longo da sucessão, sob atmosfera natural e enriquecida com CO<sub>2</sub>.

Em relação ao uso de uma única espécie para o seqüestro de carbono, acreditamos que o uso de estratégias de regeneração de floresta, restabelecendo o processo sucessional, tem tanto o potencial de aumento de biomassa e seqüestro de carbono que seria possivelmente similar ao uso de espécies isoladas, principalmente no longo prazo, como vantagens ambientais incomparáveis, uma vez que também auxiliam na conservação da biodiversidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de doutorado concedida JRLG e de Produtividade em Pesquisa para MSB, ao BIOTA/FAPESP, ao Ministério da Ciência e Tecnologia e à TNC do Brasil pelo suporte financeiro ao projeto e ao CENA, ESALQ-USP, pelas análises elementais.

## **REFERÊNCIAS**

- Aidar, M.P.M., Godoy, J.R.L., Bergmann, J. & Joly, C.A. 2001. Atlantic Forest succession over calcareous soil – PETAR, SP. *Revista Brasileira de Botânica* 24: 455-469
- Aidar, M.P.M., Martinez, C.A., Costa, A.C., Costa, P.M.F., Dietrich, S.M.C. & Buckeridge, M.S. 2002. Effect of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the establishment of seedlings of jatobá (*Hymenaea courbaril* L. Leguminosae-Caesalpinioideae). *Biota Neotropica* 2(1). (<http://www.biotaneotropica.org.br>)
- Aidar, M.P.M., Schmidt, S., Moss, G., Stewart, G. R. & Joly, C.A. 2003. Nitrogen use strategies of neotropical rainforest trees in threatened Atlantic Forest. *Plant, Cell and Environment* 26: 389-399
- Ainsworth, E.A & Long, S.P. 2004. What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. *Tansley Review. New Phytologist*: 1-21.
- Alcamo, J., Kreileman, G.J.J., Bollen, J.C., van den Born, G.J., Gerlagh, R., Krol, M.S., Toet, A.M.C. & de Vries, H.J.M. 1996. Baseline scenarios of global environmental change. *Global Environmental Change* 6: 261-303
- Barnes, B.V., Zak, D.R., Denton, S.R. & Spurr, S.H. 1998. *Forest Ecology*. 4<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc. 774 pp.
- Begon, M., Harper, J.L. & Townsend, C.R. 1996. *Ecology: individuals, populations and communities*. Blackwell, Oxford.
- Braga, M.R., Aidar, M.P.M., Marabesi, M.A., Godoy, J.R.L. 2006. Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the phytoalexin production of two soybean cultivars differing in the

- resistance to stem canker disease. *Environmental and Experimental Botany* 58: 85-92
- Buckeridge, M. S., Mortari, L. C. & Machado, M. R. 2007. Respostas fisiológicas de plantas às mudanças climáticas: alterações no balanço de carbono nas plantas podem afetar o ecossistema? In: Rego, G. M., Negrelle, R. R. B & Morellato, L. P. C. Fenologia - Ferramenta para conservação e manejo de recursos vegetais arbóreos. - Colombo, PR: Embrapa Florestas. Cap. 12: 213-230.
- Buckeridge, M.S. (2008). *Biologia & Mudanças Climáticas no Brasil*. Rima Editora, São Carlos, 295p.
- Buckeridge, M.S. & Aidar, M.P.M. 2002. Carbon Sequestration in the Rain Forest: Alternatives Using Environmentally Friendly Biotechnology. *Biota Neotropica* 2(1). (<http://www.biotaneotropica.org.br>)
- Buckeridge, M.S., Aidar, M.P.M., Martinez, C.A. & Silva, E.A. (2008). Respostas de plantas às mudanças climáticas Globais, *In*: Buckeridge, M.S. *Biologia & Mudanças Climáticas no Brasil* (Ed.), Rima Editora, São Carlos, PP. 77-91.
- Buckeridge, M.S., Santos, H.P. & Tiné, M.A.S. 2000. Mobilisation of storage cell wall polysaccharides in seeds. *Plant Physiology & Biochemistry* 38: 141-156
- Budowski, G. 1963. Forest succession in tropical lowlands. *Turrialba* 13(1): 42-44
- Budowski, G. 1965. Distribution of tropical american rain forest species in the light of successional processes. *Turrialba* 15: 40-42
- Budowski, G. 1970. The distinction between old secondary and climax species in tropical central american lowland forests. *Tropical Ecology* 11: 44-48
- Centritto, M., Lee, H.S.J. & Jarvis, P.G. 1999. Increased growth in elevated CO<sub>2</sub>: an early, short-term response? *Global Change Biology* 5: 623-633
- Ceulemans, R., Janssens, I.A. & Jach, M.E. 1999. Effects of CO<sub>2</sub> Enrichment on Trees and Forests: Lessons to be Learned in View of Future Ecosystem Studies. *Annals of Botany* 84: 577-590
- Chambers, J.Q. & Silver, W.L. 2004. Some aspects of ecophysiological and biogeochemical responses of tropical forests to atmospheric change. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359: 463-476
- Costa, P.M.F. 2002. Efeitos da alta concentração de CO<sub>2</sub> sobre o metabolismo de reservas e estabelecimento de plântulas de jatobá de mata - *Hymenaea courbaril* L. var. *stilbocarpa* (Heyne) Lee & Langenheim - Caesalpinioideae. Dissertação de mestrado, Instituto de Biologia, UNICAMP, Campinas.
- DaMatta, F.M., Grandis, A., Arenque, B.C., Buckeridge, M.S. (2009) Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International* (doi: 10.1016/foodres.2009.11.001)
- De Souza, A.P., Gaspar, M., Silva, E.A., Ulian, E.C., Waclawovsky, A.J., Nishiyama-Jr, M.Y., Santos, R.V., Teixeira, M.M., Souza, G.M., Buckeridge, M.S. (2008a) Elevated CO<sub>2</sub> increases photosynthesis, biomass, productivity, and modifies gene expression in sugarcane. *Plant Cell & Environment* 31: 1116-1127.
- De Souza, Gaspar, M., Tiné, M.A.S. & Buckeridge, M.S. (2008b). Ajustando os botões: como as plantas lidam com o aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico? In: *Biologia & Mudanças Climáticas no Brasil* (Ed. Buckeridge, M.S.) Cap. 6 pg. 101-113.

- Denslow, J.S. 1980. Gap partitioning among tropical rainforest trees. *Biotropica* 12(2): 47-55
- Douglas, R. 1875. Succession of species in forests. *Horticulturist* 30: 138-140
- Douglas, R. 1888. Succession of forest growths. *Garden and Forest* 2: 285-286
- Finegan, B. 1984. Forest Sucession. *Nature* 312: 109-114
- Gandolfi, S., Leitão Filho, H. F. & Bezerra, C. L. F. 1995. Levantamento florístico e caráter sucessional das espécies arbustivo-arbóreas de uma Floresta Mesófila Semidecídua no município de Guarulhos. *Revista Brasileira de Biologia* 55: 753-767
- Godoy, J.R.L. 2007. Ecofisiologia do estabelecimento de leguminosas arbóreas da Mata Atlântica, pertencentes a diferentes grupos funcionais, sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>: uma abordagem sucessional.. Tese de doutorado, Instituto de Botânica, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo. 113 pp.
- Griffin, K.L. & Seemann, J.R. 1996. Plants, CO<sub>2</sub> and photosynthesis in the 21<sup>st</sup> century. *Chemistry & Biology* 3: 245-254
- Hättenschwiler, S., Miglietta, F. Raschi, A. & Körner, C. 1997. Thirty years of *in situ* tree growth under elevated CO<sub>2</sub>: a model for future forest responses? *Global Change Biology* 3: 463-471
- Hubbel, S.P. & Foster, R.B. 1986. Canopy gaps and the dynamics of a neotropical Forest. *In*: Crawley, M.J. (ed.). *Plant Ecology*. Blackwell Scientific, Oxford. pp. 77-96.
- IPCC 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_spm.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf) (acesso em 18.08.2008).
- Kerstiens, G. 1998. Shade-tolerance as a predictor of responses to elevated CO<sub>2</sub> in trees. *Physiologia Plantarum* 102: 471-480
- Kerstiens, G. 2001. Meta-analysis of the interaction between shade-tolerance, light environment and growth response of woody species to elevated CO<sub>2</sub>. *Acta Oecologica* 22: 61-69
- Körner, C. 2004. Through enhanced tree dynamics carbon dioxide enrichment may cause tropical forests to lose carbon. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359: 493-498
- Körner, C. 2006. Plant CO<sub>2</sub> responses: an issue of definition, time and resource supply. *New Phytologist* 172: 393-411
- Laurance, W.F., Oliveira, A.A., Laurance, S.G., Condit, R., Nascimento, H.E.M., Sanchez-Thorin, A.C., Lovejoy, T.E., Andrade, A., D'Angelo, S., Ribeiro, J.E. & Dick, C.W. 2004. Pervasive alteration of tree communities in undisturbed Amazonian forests. *Nature* 428: 171-175
- Lovelock, C.E., Winter, K., Mersits, R., Popp, M. 1998. Responses of communities of tropical tree species to elevated CO<sub>2</sub> in a forest clearing. *Oecologia* 116 (1-2): 207-218

- Luo, Y., Reynolds, J., Wang, Y. & Wolfes, D. 1999. A search for predictive understanding of plant responses to elevated [CO<sub>2</sub>]. *Global Change Biology* 5: 143-156
- Malhi, Y. & Phillips, O.L. 2004. Tropical forests and global atmospheric change: a synthesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359: 549-555
- Marabesi, M.A. 2007. Efeito do CO<sub>2</sub> elevado no crescimento inicial e na fisiologia da fotossíntese em plântulas de *Senna alata* L. (Roxb.). Dissertação de mestrado, Instituto de Botânica, São Paulo.
- Noss, R.F. 2001. Beyond Kyoto: Forest Management in a Time of Rapid Climate Change. *Conservation Biology* 15(3): 578-590
- Oliveira, E.A.D. 2006. Efeitos de três concentrações de CO<sub>2</sub> sobre a fisiologia e partição de biomassa no crescimento inicial de *Croton urucurana* Baill e *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze, numa simulação climática futura. Monografia de bacharelado, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto. 56pp.
- Peters, R.L. & Darling, J.D. 1985. The greenhouse effect and nature reserves. *Bioscience* 35: 707-715
- Pivetta, M. 2002. O jatobá contra a poluição. *Revista Pesquisa FAPESP* 80.
- Poorter, H. & Navas, M.L. 2003. Plant growth and competition at elevated CO<sub>2</sub>: on winners, losers and functional groups. *New Phytologist* 157: 175-198
- Poorter, H. & Pérez-Soba, M. 2002. Plant Growth at Elevated CO<sub>2</sub>. *In*: Mooney, H.A. & Canadell, J.G. (eds.). *The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change*, Vol. 2. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. pp. 489-496.
- Poorter, H. 1993. Interspecific Variation in the Growth Response of Plants to an Elevated Ambient CO<sub>2</sub> Concentration. *Vegetatio* 104/105: 77-97.
- Pritchard, S., Rogers, H., Prior, S. & Peterson, C. 1999. Elevated CO<sub>2</sub> and plant structure: a review. *Global Change Biology* 5: 807-837.
- Reich, P.B., Wright, I.J., Cavender-Bares, J., Craine, J.M., Oleksyn, J., Westoby, M. & Walters, M.B. 2003. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies. *International Journal of Plant Science*: 164(3 Suppl.): 143-164.
- Sage, R.F. 2002. How Terrestrial Organisms Sense, Signal, and Response to Carbon Dioxide. *Integrative and Comparative Biology* 42: 469-480.
- Sampaio, P.D. 1997. Florística e Estrutura de Floresta Atlântica Secundária - Reserva Biológica Estadual da Praia do Sul, Ilha Grande, RJ. Dissertação de mestrado, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Santos, H.P. & Buckeridge, M.S. 2004. The Role of the Storage Carbon of Cotyledons in the Establishment of Seedlings of *Hymenaea courbaril* Under Different Light Conditions. *Annals of Botany* 94(6): 819-830
- Santos, H.P., Purgato, E., Mercier, H. & Buckeridge, M.S. 2004. The Control of Storage Xyloglucan Mobilization in Cotyledons of *Hymenaea courbaril* L. *Plant Physiology* 135: 287-299

- Siegenthaler, U., Stocker, T.F., Monnin, E., Luthi, D., Schwander, J., Stauffer, B., Raynaud, D., Barnola, J.M., Fischer, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J. 2005. Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. *Science* 310: 1313-1317.
- Spurr, S.H. 1952. Origin of the concept of Forest Succession. *Ecology* 33(3): 426-427.
- Stulen, I. & Den Hertog, J. 1993. Root growth and functioning under CO<sub>2</sub> enrichment. *Vegetatio* 104/105: 99-115.
- Swaine, M.D. & Whitmore, T.C. 1988. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. *Vegetatio* 75: 81-86.
- Swaine, M.D. (ed.) 1996. The ecology of tropical forest tree seedlings. *Man & the Biosphere Series*, vol. 18. UNESCO/Parthenon, Carnforth and New York. 340 pp.
- Tabarelli, M. 1997. A Regeneração da Floresta Atlântica Montana. Tese de doutorado, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Tabarelli, M., Villani, J.P. & Mantovani, W. 1994. Estudo Comparativo da Vegetação de Dois Trechos de Floresta Secundária no Núcleo Santa Virgínia, Parque Estadual da Serra do Mar, S.P. *Revista do Instituto Florestal* 6: 1-11
- Watt, A.S. 1947. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology* 35: 1-22.
- Whitmore, T.C. 1989. Canopy gaps and the two major groups of the forests trees. *Ecology* 70(3): 536-538.
- Whitmore, T.C. 1996. A review of some aspects of tropical rain forest seedling ecology with suggestions for further enquiry. *In*: Swaine, M.D. (ed.). The ecology of tropical forest tree seedlings. UNESCO/Parthenon, Paris/Carnforth. pp. 3-39.
- Würth, M.K.R., Winter, K. & Körner, C. 1998. *In situ* responses to elevated CO<sub>2</sub> in tropical forest understorey plants. *Functional Ecology* 12: 886-895.



*Naturalia* – eISSN:2177-0727 - ISSN: 0101-1944 - UNESP, Rio Claro, SP, Brasil  
 Licenciada sob [Licença Creative Commons](#)