
Giuliano Maselli Locosselli

Análise integrada de dendrocronologia, anatomia e isótopos estáveis de carbono de duas espécies de jatobá (*Hymenaea*, LEGUMINOSAE) para identificação de possíveis efeitos da elevação do CO₂ atmosférico e mudanças climáticas.

Multi-proxy analysis on dendrochronology, anatomy and stable carbon isotopes of two species of jatobá (*Hymenaea*, LEGUMINOSAE) to identify possible atmospheric CO₂ concentration and climate change effects.

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, para a obtenção de Título de Mestre em Ciências, na Área de Botânica.

Orientador:
Prof. Dr. Gregório Ceccantini

São Paulo

2010

Maselli Locosselli, Giuliano

Análise integrada de dendrocronologia, anatomia e isótopos estáveis de carbono de duas espécies de jatobá (*Hymenaea*, LEGUMINOSAE) para identificação de possíveis efeitos da elevação do CO₂ atmosférico e mudanças climáticas.

91 páginas

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Departamento de Botânica.

1. Dendrocronologia
 2. *Hymenaea* spp.
 3. Mudanças Climáticas
- I. Universidade de São Paulo. Instituto de Biociências. Departamento de Botânica.

Comissão Julgadora

Prof(a). Dr(a).

Prof(a). Dr(a).

Prof. Dr. Gregório Ceccantini

Orientador

**Dedico esta dissertação
à minha família.**

Agradecimentos

A realização do presente trabalho não seria possível sem a ajuda direta e/ou indireta de muitas pessoas, a quem dedico os meus sinceros agradecimentos. Sendo assim, agradeço:

À minha família pelo apoio, amor e carinho. Dentre todos, dedico especial agradecimento ao meu pai Leonardo e minha mãe Maria Cristina pelo amor à moda de cada um, por terem auxiliado incondicionalmente o meu caminho para chegar até este momento, e ainda possibilitarem que eu cresça muito. Também dedico especial atenção ao meu irmão José Leonardo, meu maior amigo e companheiro.

À Viviane Jono, uma garota especial que eu conheci na minha caminhada pela botânica, que sempre me ajudou e deu suporte, a quem eu admiro muito. Além do grande amor.

À Myuki Jono por ter hospedado e alimentado o garoto que atacava a dispensa sem pedir e guardava o leite aberto no armário e o achocolatado em pó na geladeira.

Aos amigos do 2001N com quem passei momentos tão bons e com quem eu amadureci muito.

Ao meu orientador, Gregório Ceccantini, que me ensinou muito na matéria de botânica e, além disso, sobre muitas coisas da vida. Agradeço também por ter acreditado no garoto que nem sabia o que era lenhoso!!! Além das relações profissionais, ficarão os bons momentos que passamos nas muitas viagens, nos jantares japoneses, entre outros, selando uma amizade certamente duradoura.

Aos amigos e colegas do laboratório que sempre me ajudaram, com especial atenção aos membros da equipe dentro: Gustavo Burin, Ricardo Cardin, Bruno Balboa (membro honorário) e Luis Horta, com os quais aprendi muito e passei bons momentos (entre eles, na Europa e Argentina), e ao Guilherme Freire pela amizade e pelos campos e coletas que viabilizaram esse trabalho.

À Gisele Costa pela amizade de tantos anos, e pela ajuda na execução do meu trabalho.

Aos professores da anatomia: Prof^a Dra. Nanuza de Menezes, que sempre me deu um carinho especial, a Prof^a Dra. Flávia de Mello de Pinna pela amizade, e a Prof^a Dra. Veronica Angyalossy pelas dicas e críticas desde a época da iniciação científica, e pelo enorme coração.

À Claudia Soliz pela grande amizade, e por nos ajudar nos pequenos detalhes dos estudos de dendrocronologia, aqueles que, se não forem resolvidos, interrompem todo o processo.

À Adriana Grandis, Amanda Pereira de Souza, Bruna Arenque e Wanderley dos Santos, que dedicaram tanto tempo em me auxiliar nos testes das técnicas de extração de celulose, e por terem me ensinado a trabalhar em uma laboratório de fisiologia vegetal.

Ao Prof. Dr. Marcos S. Buckeridge, pelas rápidas conversas, mas não menos instrutivas, pelo excelente curso de pós-graduação intitulado “Respostas de Plantas às Mudanças Climáticas Globais e seus Impactos sobre a Sociedade”, cujo conteúdo auxiliou na discussão dos meus dados. Também agradeço pelo auxílio financeiro a viagens e às análises isotópicas.

Ao Marcelo Moreira, pela discussão sobre os isótopos, pelo “tour” detalhado no laboratório e explicação das técnicas de isotopia realizadas no laboratório de Ecologia Isotópica, CENA-ESALQ, e pela prontidão em ajudar.

Aos pesquisadores: Fritz H. Schweingruber, Holger Gartner, Patrick Fonti, Jochen Schöngart, Kerstin Treydt, Ricardo Villalba, Brian Luckmann, Donald Falq, que transmitiram as bases da dendrocronologia à equipe dendro em muitos cursos no Brasil, na Argentina e na Suíça.

Ao Claudio Lisi por ter auxiliado indiretamente este trabalho, ao conseguir uma empresa para a fabricação do trado motorizado e ter indicado uma furadeira nacional à gasolina que de fato funcionava.

Ao Seu Guilherme, proprietário da Fazenda Jagoára Velha, local de onde foram extraídas as amostras.

À Eliana, proprietária do hotel homônimo, que sempre nos hospedou, mesmo com pedidos em cima da hora, e também pelo apoio logístico.

À Fapesp pela concessão da bolsa.

E ao parecerista anônimo por ter acreditado na nossa capacidade, mesmo sugerindo a redução do trabalho (que no fim não foi atendida).

Índice

Resumo	8
Abstract	9
Introdução	10
Considerações finais	18

Resumo

O desenvolvimento das atividades humanas está ocorrendo a um alto custo ambiental. A elevação das concentrações atmosféricas de CO₂ e as mudanças no uso do solo estão desencadeando mudanças relevantes no clima global. O objetivo deste trabalho é determinar, por meio da largura dos anéis de crescimento, áreas de vasos e isótopos estáveis de carbono, como as espécies de jatobá: *Hymenaea courbaril* L. (de mata) e *Hymenaea stigonocarpa* Mart ex. Hayne (de cerrado) estão respondendo às mudanças do clima. Foram coletadas amostras do tronco principal de 12 indivíduos de *H. stigonocarpa* e 11 de *H. courbaril*. As amostras foram polidas e os anéis de crescimento foram identificados, datados e medidos. As cronologias foram construídas utilizando os programas COFECHA e ARSTAN. Com os anéis datados, foram medidas as áreas de vaso do lenho inicial de cada anel e também foram obtidas amostras de α -celulose dos anéis de crescimento para a análise de $\delta^{13}\text{C}$ e cálculo da eficiência intrínseca do uso da água (W_i). Os resultados mostram que, a largura dos anéis de *H. courbaril* sofre influência positiva da precipitação, e negativa da temperatura, no final da estação de crescimento. Já as áreas de vaso são influenciadas positivamente pela precipitação do meio da estação de crescimento e negativamente pela temperatura da estação seca antes do início do crescimento. Para *H. stigonocarpa*, a largura do anel de crescimento sofre influência positiva da precipitação, e negativa da temperatura, durante a estação seca anterior ao início do crescimento. Já as áreas de vaso são influenciadas positivamente pela precipitação do início da estação seca anterior à estação de crescimento e negativamente pela temperatura no início do crescimento. Em relação ao $\delta^{13}\text{C}$, as duas espécies mostraram uma influência do clima da estação de crescimento corrente e também da imediatamente anterior. Além disso, *H. stigonocarpa* possui uma tendência de elevação do W_i nas últimas cinco décadas que não foi encontrada em *H. courbaril*. Os resultados mostram que as espécies respondem a diferentes pressões ambientais, e isso levará a respostas diferentes em cenários de mudanças climáticas. Nesses cenários, as duas espécies podem ser prejudicadas, mas *H. courbaril*, possivelmente, sofrerá mais. Porém, existe outra pressão imediata sobre as espécies, que é o desmatamento. A análise das taxas de crescimento pode auxiliar as tomadas de decisão em projetos que envolvam supressão das matas e cerrados. Nesse contexto, *H. stigonocarpa* possui uma taxa de crescimento média 2.4x menor que a de *H. courbaril*, mostrando o maior tempo que essa espécie leva para atingir um tamanho maduro.

Abstract

The development of human activities is taking place at a high environmental cost. The increasing atmospheric CO₂ concentrations and changes in land-use are unleashing relevant changes in global climatic. The objective of this study is to determinate how *H. courbaril* L. (from forest) and *H. stigonocarpa* Mart ex. Hayne (from cerrado) are responding to the climatic change through tree-ring width, vessel area and stable carbon isotope analysis. Twelve specimens of *H. stigonocarpa* and eleven of *H. courbaril* were sampled. Then, samples were polished and tree-rings were identified, dated, measured and chronologies were built using COFECHA and ARSTAN softwares. With tree-rings dated, early wood vessel areas were measured and α -celluloses were sampled from wood of each tree-ring to $\delta^{13}\text{C}$ analysis and intrinsic water-use efficiency estimation (W_i). The results shows that tree-ring width in *H. courbaril* are positively related with the precipitation, and negatively related to temperature, during the end of growth period. Also, vessel areas are positively related to precipitation during the middle growth period and negatively related with temperature during the dry season previous to growth period. Tree-rings width in *H. stigonocarpa* were positively related to precipitation during dry season previous to growth period and were negatively related to temperature during the same period. Also, vessel areas were positively related to precipitation during the beginning of dry season, previous to the current growth period, and negatively related to temperature during the beginning of growth period. In relation to $\delta^{13}\text{C}$, climate signals were found during the current growth period and the previous one. Beyond that, *H. stigonocarpa* showed a clear increasing trend on W_i during the last five decades, that was not found in *H. courbaril*. The results indicate that these species respond to different environmental demands, and that shall lead to different responses regarding the climatic change scenarios. In these scenarios, both species shall be negatively influenced, which will be probably worse in *H. courbaril*. But, there is another immediate pressure on both species that is related with deforestation. The growth ratio analysis can help policy-makers in projects that have forest and cerrado suppression. In this context, *H. stigonocarpa* has a mean growth ratio 2.4x smaller than *H. courbaril*, what implicates longer time for those species reach a mature size.

Introdução

A preocupação com as mudanças nos ambientes por conta do desenvolvimento das atividades humanas remonta a década de 1970, em especial o ano de 1972 com a Conferência de Estocolmo, organizada pela Organização das Nações Unidas, que resultou no Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. A Conferência de Estocolmo foi o primeiro passo e, como resposta às crescentes preocupações internacionais em relação à deterioração do meio ambiente, foi instituída a Comissão Mundial do Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1983, também conhecida por Comissão de Brundtland. Após quatro anos da criação da comissão, esta produziu um relatório cujos dados desencadearam, após um ano, a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) que tem como objetivo promover uma análise das bases científicas a respeito das mudanças climáticas induzidas pelo homem (Lombardi 2008).

Dos relatórios produzidos pelo IPCC, o quarto foi publicado em 2007 e produziu um grande impacto na mídia internacional e na opinião pública por afirmar categoricamente que as mudanças no clima têm origem nas atividades humanas (Lombardi 2008). As mudanças no clima estão associadas à emissão dos gases do efeito estufa (GEE), sendo o CO₂ o principal GEE produzido pelas atividades humanas. Como consequência dessas emissões, as concentrações de CO₂ atmosféricas elevaram-se de 280ppm antes da revolução industrial para 379ppm em 2005, atingindo uma concentração superior às naturais nos últimos 650.000 anos (IPCC 2007).

As principais fontes antropogênicas de CO₂ são o uso de combustíveis fósseis e as mudanças no uso do solo (IPCC 2007). O desmatamento emite cerca de 1.6 bilhões de toneladas equivalentes de carbono ao ano, que é uma quantidade considerável quando comparada às emissões provenientes do uso de combustíveis fósseis, que contribui com seis bilhões de toneladas ao ano (Goldemberg & Lucon 2008).

As emissões de CO₂ por desmatamento são importantes principalmente nos países tropicais denominados em desenvolvimento, dentre os quais se encontra o Brasil, onde 75% das emissões de CO₂ decorrem de mudanças no uso do solo (Cerri *et al.* 2009).

Porém, a contribuição do desmatamento das florestas tropicais para as mudanças climáticas não decorre apenas das emissões de dióxido de carbono, mas também, do importante papel destas florestas na regulação do clima global (Fearnside 2001).

Estes fatos colocam o Brasil, e suas florestas, em posição de destaque por possui 28,3% das florestas primárias remanescentes do mundo e, simultaneamente, ter uma das maiores perdas líquidas de florestas com 3,1 milhões de hectares por ano (FAO 2009).

Um bioma brasileiro que não deve ser esquecido nas questões apresentadas é o Cerrado, que é o segundo maior bioma do país, estendendo-se por mais de 200 milhões de hectares, sendo que apenas 2.2% deles são protegidos (Silva *et al.* 2006). O Cerrado possui um importante papel de regulação de energia e trocas de massa com a atmosfera sendo que a maior parte do carbono fixado nesse bioma encontra-se dentro do solo (Batle-Bayer *et al.* 2010).

Portanto é imprescindível compreender como estas formações vegetacionais estão respondendo às mudanças do clima e tentar prever o que acontecerá com elas num futuro próximo, e a dendrocronologia, como um estudo de registros naturais, é essencial para compreender como as espécies lenhosas presentes nestas regiões estão respondendo às mudanças do clima.

Os anéis de crescimento em árvores são considerados um dos registros naturais mais precisos, com alto grau de confiança nas datações, sendo capazes de registrar até 60% da variação dos dados de temperatura e precipitação, conforme os dados climáticos de plataformas de coleta (Huges 2002).

Estudos das séries de anéis de crescimento em árvores têm desempenhado um importante papel na reconstrução de séculos de temperatura e precipitação, auxiliando os pesquisadores a determinar se essas mudanças são naturais ou estão ocorrendo como consequência das atividades antropogênicas (Jacoby & D'Arrigo 1997 e Briffa 2000).

Muitos trabalhos de dendroclimatologia vêm mostrando que recentemente a temperatura está aumentando numa taxa considerada anormal para os últimos milênios. Essa tendência é mostrada por D'Arrigo *et al.* (2006), estudando *Tectona grandis*, e Esper *et al.* (2002) e Briffa (2000) que analisaram cronologias de várias espécies temperadas do hemisfério Norte. Essas espécies mostram um sinal comum da evolução da temperatura, com um período claramente mais quente durante a Idade Média,

seguido de uma pequena glaciação, e um aumento de temperatura abrupto nos últimos 150 anos.

No hemisfério Sul, Villalba *et al.* (1997) também mostram que existe um aumento na temperatura registrada por *Nothofagus pumilo* de uma região ao norte e outra ao sul da Cordilheira dos Andes. Fica claro também que no local de coleta ao sul da Cordilheira dos Andes o aumento de temperatura é maior do que ao norte.

Além da temperatura a precipitação também está mudando. Schongart *et al.* (2004) estudando *Piranhea trifoliata*, uma espécie amazônica de florestas alagáveis, foram capazes de reconstruir os eventos de El-Niño dos últimos dois séculos e verificaram indícios de que os eventos de El-Niño estão se tornando mais severos. Schongart *et al.* (2006), mostraram a partir da reconstrução da precipitação, utilizando *Azelia africana* e *Pterocarpus erinaceus*, que as condições de seca estão aumentando nos últimos 160 anos no oeste africano.

Apesar das respostas do crescimento das plantas não dependerem somente da precipitação e da temperatura, podendo variar entre espécies e locais de estudos (Cook *et al.* 2001, Villalba *et al.* 1997), atualmente já é relativamente bem conhecido como o crescimento das espécies arbóreas respondem a essas variáveis climáticas. Anos muito frios e/ou anos muito secos são reconhecidamente limitantes do crescimento (Schweingruber 1996).

Mais recentemente, outra linha de estudo da dendrocronologia, a que estuda a variação da anatomia dos anéis de crescimento, está produzindo resultados novos que permitirão uma compreensão mais profunda dos efeitos das mudanças climáticas sobre as plantas (Fonti *et al.* 2010)

Trabalhos como os de Fonti *et al.* (2007) e Campelo *et al.* (2010) são exemplos de como os vasos contêm informações climáticas anuais relevantes. Fonti *et al.* (2007) estudaram *Castanea sativa* e encontram influências negativas da temperatura de fevereiro a março e positivas em abril sobre as áreas dos vasos do lenho inicial. Já Campelo *et al.* (2010) foram capazes de encontrar sinais climáticos analisando a média de áreas de vasos e a área máxima de vasos. A primeira variável produziu correlações positivas com a precipitação de abril e maio e a segunda, positivas com a precipitação de maio e junho.

Portanto, fica claro como os anéis de crescimento e as áreas de vasos possuem íntima relação com as variáveis climáticas de precipitação e temperatura. Porém, como explicado anteriormente, as variações do clima são uma consequência da elevação das concentrações de CO₂ atmosférico, e quando se estuda a precipitação e a temperatura, estão sendo analisados apenas resultados consequentes dessa elevação. Para estudar diretamente os efeitos do CO₂ nas plantas, outra variável, além dos anéis e dos vasos, está produzindo resultados muito promissores: o $\delta^{13}\text{C}$ (proporção relativa entre carbono ¹²C e ¹³C).

Os isótopos estáveis de carbono possuem uma íntima relação com as plantas, em especial com as que possuem a fotossíntese do tipo C3. Essas plantas são capazes de discriminar os isótopos estáveis através de dois processos de fracionamento (McCarroll & Loader 2004). O primeiro processo ocorre no momento da difusão do gás através da abertura estomática, o que acaba privilegiando o ¹²C, que é o isótopo mais leve. O outro processo de fracionamento ocorre durante a fotossíntese na qual o carbono é fixado pela enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase (RUBISCO), que possui uma preferência pelo isótopo mais leve (¹²C), realizando o segundo processo de fracionamento (Marino & McElroy 1991).

O fracionamento dos isótopos estáveis pode ser expresso como:

$$\delta^{13}\text{C}_p = \delta^{13}\text{C}_a - a - (b-a)p_i/p_a$$

Na qual:

$\delta^{13}\text{C}_p$ = valor isotópico do produto fotossintético;

$\delta^{13}\text{C}_a$ = valor isotópico do CO₂ atmosférico;

a = fracionamento por difusão;

b = fracionamento pela ação da RUBISCO;

p_i = pressão parcial de CO₂ no espaço intracelular;

p_a = pressão parcial de CO₂ na atmosfera.

As razões entre os isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) podem também ser expressas como eficiência intrínseca no uso da água (W_i), que é a razão entre o carbono fixado e a quantidade de água perdida, já que ambos processos são regulados pela atividade estomática e pela RUBISCO (McCarroll & Loader 2004).

Muitos trabalhos têm mostrado que a eficiência intrínseca no uso da água tem aumentado nas últimas décadas em decorrência da elevação da concentração atmosférica de CO₂ (Feng 1999, Hielitz *et al.* 2005 e Silva *et al.* 2009). Esse aumento na eficiência intrínseca do uso da água pode refletir no aumento das taxas de incremento anual do lenho. Bert *et al.* (1997) estudaram os anéis de crescimento e $\delta^{13}\text{C}$ de *Abies alba*. A partir da discriminação dos isótopos estáveis de carbono, os autores calcularam o W_i e verificaram que este aumentou durante as últimas décadas, e que este aumento coincide com um maior incremento radial da espécie observado no mesmo período.

O objetivo geral do presente trabalho é analisar os efeitos das mudanças do clima em *Hymenaea courbaril* L. e *Hymenaea stigonocarpa* Mart ex. Hayne através das informações registradas nos anéis de crescimento, utilizando três níveis diferentes de informação, um em escala macroscópica (que é o pano de fundo deste trabalho), que consiste na largura do anel de crescimento, outro em escala microscópica, que são as áreas de vasos e ainda outro em escala atômica, que são as razões entre os isótopos estáveis de carbono.

Os objetivos específicos são:

- Determinar a anualidade dos anéis de crescimento de *H. stigonocarpa*, enquanto *H. courbaril* já possui anéis comprovadamente anuais (Westbrook *et al.* 2006);
- Verificar se os anéis de crescimento das duas espécies possuem sinais comuns e se estes sinais estão correlacionados com o clima;
- Criar cronologias de áreas de vasos e analisar os sinais climáticos presentes nestas;
- Comparar as variáveis climáticas que regulam o crescimento e a área de vaso com as previsões futuras em modelos regionais de mudanças do clima;
- Construir cronologias de $\delta^{13}\text{C}$ e avaliar a variação da eficiência intrínseca do uso da água para as duas espécies;
- Analisar as taxas de crescimento das duas espécies dentro de um cenário de conservação das espécies.

Este último objetivo específico é de grande importância, pois, apesar da grande relevância das mudanças do clima sobre as duas espécies, existe, no estado de origem do material coletado (Minas Gerais), uma pressão maior e imediata sobre as espécies, que consiste na derrubada de áreas naturais de matas e cerrados, a qual coloca a conservação das duas espécies em uma urgência, em curto prazo, maior que as próximas mudanças climáticas.

Bibliografia

- Battle-Bayer L., Barjes N.H. & Bindraban P.S., 2010, Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127, 47-58
- Bert D., Leavitt S.W., & Dupouey J.L., 1997, Variations of wood $\delta^{13}C$ and water-use efficiency of *Abies alba* during the last century. *Ecology*, 78, 1588-1596
- Briffa K.B., 2000, Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees, *Quaternary Science Reviews*, 19, 87-105
- Campelo F., Nabais C., Gutiérrez E., Freitas H. & García-González I., 2010, Vessel features of *Quercus ilex* L. growing under Mediterranean climate have a better climatic signal than tree-ring width. *Trees Structure and Function*, 24, 463-470
- Cerri C.C., Maia S.M.F., Galdos M.V., Cerri C.E.P., Feigl B.J. & Bernoux M., 2009, Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. *Scientia Agricola*, 66, 831-843
- Cook E.R., Glitzenstein J.S., Krusik P.J. & Harcombe P.A., 2001, Identifying functional groups of trees in west gulf coast forests (usa): a tree-ring approach, *Ecological applications*, 11(3), 883-903
- D'Arrigo, R., Wilson, R., Jacoby, G., 2006, On the long-term context for late twentieth century warming. *Journal of Geophysical Research*. 111, 1-12
- Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H., 2002, Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* 295, 2250–2253
- FAO, 2009, State of the World's Forests, Rome

- Fearnside P.M., 2001, Saving tropical forests as a global warming countermeasure: an issue that divides the environmental movement. *Ecological Economics*, 39, 167-184
- Feng X., 1999, Trends in intrinsic water-use efficiency of natural trees for the past 100–200 years: a response to atmospheric CO₂ concentration, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 1891-1903
- Fonti P., Solomonoff N. & García-González I., 2007, Earlywood vessels of *Castanea sativa* record temperature before their formation. *New Phytologist*, 173, 562-570
- Fonti P., Arx G., García-Gonzalez I., Eilmann B., Sass-Klaassen U., Gärtner H. & Eckstein D., 2010, Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist*, 185, 42-53
- Goldenberg J. & Lucon O., 2008, Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento, 3^a Edição, EDUSP, São Paulo, SP, 396 pg
- Huges M.K., 2002 Dendrochronology in climatology-the state of the art. *Dendrochronologia*, 20(1-2), 95-116
- Hietz P., Wanek W. & Dünisch O., 2005, Long-term trends in cellulose $\delta^{13}\text{C}$ and water-use efficiency of tropical *Cedrela* and *Swietenia* from Brazil. *Tree Physiology*, 25, 745-752
- IPCC, 2007, Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacoby G.C. & D'Arrigo R.D., 1997, Tree rings, carbon dioxide and climatic change, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 94, 8350-8353
- Lombardi A., 2008, Créditos de carbon e sustentabilidade: os caminhos do novo capitalism. Lazuli Editora / Companhia Editora Nacional, São Paulo, 191 pg

-
- Marino B.D. & McElroy M.B., 1991, Isotopic composition of atmospheric CO₂ inferred from carbon in C4 plant cellulose. *Nature*, 349, 127-131
- McCarroll D. & Loader N. J., 2004, Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23, 771-801
- Schongart J., Bettina O., Hennenberg K. J., Poremski S. & Worbes M., 2006, Climate-growth relationships of tropical tree species in West Africa and their potential for climate reconstruction. *Global Change Biology*, 12, 1139-1150.
- Schongart J., Junk W.J., Piedade M.T.F., Ayres J.M., Hüttermann A. & Worbes M., 2004, Teleconnection between tree growth in the Amazonian flood-plains and El Niño-Southern Oscillation effect. *Global Change Biology*, 10, 683-692
- Schweingruber F.H., 1996, Tree rings and environment dendroecology, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt, 609 pg.
- Silva L.R., Anand M., Oliveira J.M. & Pillar V.D., 2009, Past century changes in *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze water use efficiency of southern Brazil: implications for forest expansion. *Global Change Biology*, 15, 2387-2396
- Silva J.F., Fariñas M.R., Felfili J.M. & Klink C.A., 2006, Spatial heterogeneity, land use and conservation in the cerrado region of Brazil, *Journal of Biogeography*, 33, 536-548
- Villalba R., Boninsegna J.A., Veblen T.T., Schmelzer A., & Rubulis, S., 1997, Recent Trends in Tree-Ring Records from High Elevation Sites in the Andes of Northern Patagonia, *Clim. Change*, 36, 425-454
- Westbrook J.A., Guilderson T.P. & Colinvaux P.A., 2006, Annual growth rings in a sample of *Hymenaea courbaril*. *IAWA bulletin n.s.*, 27(2), 193-197

Considerações Finais

As duas espécies estudadas produziram bons resultados dendrocronológicos, com anéis de crescimento sensitivos e que registravam informações climáticas. Além dos resultados obtidos com a largura dos anéis de crescimento, as áreas de vasos e os isótopos estáveis de carbono foram capazes de fornecer informações importantes sobre as temperaturas e precipitações anuais.

A adição de mais indivíduos das duas espécies no trabalho provocaria pouca ou nenhuma mudança na sensibilidade, na intercorrelação e nos sinais climáticos registrados nas cronologias construídas. Isso ficou claro conforme os indivíduos foram sendo adicionados à cronologia média e, gradativamente, menos alterações nas cronologias foram observadas. Vale ressaltar que a datação cruzada de amostras de trado foi mais fácil de realizar em *H. courbari*, por conta dos anéis maiores, e os melhores resultados foram obtidos quando haviam sido coletadas três baquetas por árvore. No caso de estudos com *H. stigonocarpa*, é interessante começar o trabalho com alguns discos para depois complementar com amostras de trado.

Além das informações de precipitação da estação de crescimento corrente, tanto no caso da largura dos anéis de crescimento, como nas áreas de vasos, quanto no $\delta^{13}\text{C}$, foram encontrados sinais climáticos da estação de crescimento imediatamente anterior. Esses resultados mostram a complexidade na formação do anel de crescimento e que outras questões inerentes ao próprio lenho já formado, podem influenciar em parte o lenho que virá a se formar.

Por exemplo, um anel produzido na estação de crescimento corrente, que possui vasos de grande calibre, ainda continuará a conduzir muita água no ano seguinte, mesmo se o próximo anel tiver vasos de pequeno calibre, por ser um ano seco. O inverso também pode ser possível, e provavelmente essa quantidade de água sendo conduzida pelo anel anterior pode influenciar o seguinte. O mesmo vale para a influência da quantidade de reservas acumuladas em um ano favorável ou desfavorável ao crescimento pode influenciar o crescimento do ano seguinte.

Essas influências sobre a formação dos anéis de crescimento poderiam ser melhor estudadas para uma compreensão mais ampla dos processos de formação do anel. Desta maneira, caso sejam consideradas nas construções das cronologias ou modelos

climáticos, é possível que uma nova fronteira possa surgir para os estudos dendrocronológicos, trazendo informações que antes não eram obtidas, pois apareciam como ruídos nos modelos.

Para alcançar esse objetivo, estudos das reservas nos anéis de crescimento podem ser realizadas, principalmente em função do clima para definir quais as condições ideais de acúmulo de reserva e as condições desfavoráveis. Em relação à arquitetura hidráulica, um primeiro passo poderia ser a determinação do número de anéis de crescimento que são condutores.

Ao analisar conjuntamente os resultados obtidos com a largura dos anéis, as áreas de vaso e os isótopos estáveis de carbono é possível inferir como são as demandas ambientais de cada tipo vegetacional e ainda tentar compreender como essas plantas respondem fisiologicamente a estas demandas. Aparentemente, as fontes de stress hídrico, a que as duas espécies estão submetidas, são diferentes. *H. courbaril* depende de um estoque limitado de água do solo que se abastece na época de chuvas, mas se exaure no período de seca. Esta dificuldade é reforçada pela espécie possuir raízes não tão profundas, como ocorre com a espécie de cerrado, e pela maior demanda ambiental de água por ser a mata uma formação mais fechada, o que leva a uma maior competição por água. Esse stress é contornado, nesta espécie, pelos estômatos, que são menores e de controle de abertura/fechamento mais rápido.

Já *H. stigonocarpa*, possui outra fonte de stress hídrico, que não está no solo como na espécie de mata, pois possui raízes profundas e maior disponibilidade de água no solo ao longo do ano. A maior irradiância solar combinada com um ambiente mais aberto leva a uma maior taxa de perda de água por transpiração. Isso é possível de ser inferido, pois a espécie possui estômatos maiores, e de menor controle que, portanto permitem uma grande transpiração, mas com vasos de menor calibre, o que denota uma necessidade de maior segurança na condução. Se a água presente no solo não é limitante, a baixa pressão parcial dela na atmosfera, possivelmente é.

Todas essas influências do clima sobre o anel de crescimento permitem especular que as previsões de elevação da temperatura e a mudança dos padrões de chuva influenciarão as espécies estudadas. De uma maneira geral, a elevação da temperatura pode levar a uma diminuição do crescimento das espécies, e a elevação da precipitação, em geral, seria favorável ao crescimento das duas espécies, mas se, junto ao aumento do

volume, ocorrer uma concentração da precipitação, *H. courbaril* poderia ter um crescimento seriamente prejudicado, pois esta espécie responde principalmente ao comprimento da estação chuvosa e o solo dessa formação não acumula grandes estoques de água.

Em relação aos efeitos diretos da elevação da concentração atmosférica de CO₂, *H. stigonocarpa* já está respondendo há pelo menos cinco décadas, com um aumento da eficiência intrínseca do uso da água, o que pode, teoricamente, favorecer a espécie em condições de stress hídrico induzidas pelas mudanças do clima. Já *H. courbaril* não apresentou nenhuma variação na eficiência intrínseca do uso da águas no mesmo período, possivelmente por já possuir um valor elevado de eficiência. Provavelmente, em concentrações maiores de CO₂ ele obtenha uma resposta semelhante à de *H. stigonocarpa*.

Esse aumento na eficiência intrínseca do uso da água pode levar a uma maior resistência das plantas aos períodos mais secos, e também pode permitir que o estoque de água no solo dure por mais tempo, prolongando o período de crescimento das espécies. Essas hipóteses podem explicar o aumento na taxa de crescimento de *H. stigonocarpa* observado em todos os indivíduos nas últimas cinco décadas, independentemente das idades deles (figura 2, terceiro capítulo).

Os resultados deste trabalho se unem aos muitos outros obtidos no mundo e são mais um passo na complexa tarefa de compreender o que acontecerá daqui a algumas décadas com os ambientes naturais e artificiais com as mudanças globais. Assim como muitos outros trabalhos, este realizado com as duas espécies de jatobá mostra que as espécies já estão respondendo às mudanças no clima e que possivelmente o futuro não será muito promissor para, ao menos, a espécie de mata.

Apesar das condições futuras serem aparentemente mais favoráveis ao crescimento de *H. stigonocarpa*, essa é uma espécie que merece atenção em curto prazo por possuir uma taxa de crescimento substancialmente menor que *H. courbaril* e estar presente em um bioma que sofre grande pressão, seja por força de empreendimentos que demandam o desmate, seja pelo uso de recurso madeireiro, principalmente para a produção de carvão. Se os tomadores de decisão pretendem inserir o país em um modelo de desenvolvimento mais sustentável, e isso demandar a recuperação de áreas

degradadas, fica muito clara a maior dificuldade de regenerar áreas com a espécie de cerrado, e talvez o bioma como um todo.