



Variação temporal da densidade da madeira e suas implicações para o estoque de carbono em *Bertholletia excelsa* na Amazônia setentrional

Maria Eduarda Porato Guimarães¹, Gabriel Assis-Pereira¹, Gabriela Morais Olmedo¹, Carolina Volkmer de Castilho², Mario Tomazello-Fo.¹, Patricia da Costa³

¹Departamento de Ciências Florestais (LCF), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba/SP, Brasil; ²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Roraima, Boa Vista/RR, Brasil; ³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna/SP, Brasil

Resumo: As florestas tropicais desempenham um papel vital na oferta de serviços ecossistêmicos e na conservação da biodiversidade. A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*) é uma espécie arbórea de grande importância econômica e ecológica, especialmente devido à sua castanha, amplamente comercializada. Este estudo analisou a variação temporal da densidade da madeira e suas implicações para o estoque de carbono em castanheiras localizadas na Amazônia Setentrional, utilizando a densitometria de Raios-X. Os resultados mostraram que a densidade da madeira aumenta significativamente nos primeiros anos de vida das árvores, estabilizando-se posteriormente, e que a espécie acumula uma quantidade considerável de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Castanheira-da-amazônia, Bioeconomia, Densitometria de Raios-X, Dendrocronologia, Densidade da Madeira, Sequestro de Carbono

Temporal Variation in Wood Density and Its Implications for Carbon Stocks in *Bertholletia excelsa* in Northern Amazonia

Abstract: Tropical forests play a vital role in providing ecosystem services and conserving biodiversity. The Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) is a tree species of great economic and ecological importance, especially due to its nut, which is widely traded. This study analyzed the temporal variation of wood density and its implications for carbon stock in Brazil nuts located in Northern Amazon, using X-ray densitometry. The results showed that wood density significantly increases in the early years of the trees' lives, stabilizing later, and that the species accumulates a considerable amount of carbon, contributing to climate change mitigation.

Keywords: Brazil nut tree, Bioeconomy, X-Ray Densitometry, Dendrochronology, Wood Density, Carbon Sequestration

1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais fornecem uma gama de serviços e benefícios ecossistêmicos (Fearnside, 2008), além de concentrar inúmeros recursos naturais de fauna e flora (Aleixo et al., 2010). A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) é uma espécie arbórea tropical, considerada vulnerável pela União



Internacional para Conservação da Natureza, sendo que seu fruto, a castanha-da-amazônia, é um dos produtos florestais não madeireiros mais consumidos e comercializados globalmente (Wadt et al., 2017). A exploração econômica da castanha é fundamental para as comunidades locais, com aproximadamente 25 mil famílias de comunidades tradicionais, como quilombolas, indígenas e ribeirinhos, dependendo diretamente dessa atividade (Almeida, 2004). No entanto, esses extrativistas enfrentam desafios significativos, incluindo remuneração inadequada e participação reduzida na cadeia de valor da castanha, que representa apenas cerca de 4% da movimentação financeira total (Observatório Castanha-Da-Amazônia, 2023).

A bioeconomia e mercado de carbono têm ganhado destaque na arena econômica internacional, devido às necessidades estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, que busca mitigar o aquecimento global causado pelo aumento de CO₂ atmosférico (International Chamber Of Commerce Brasil; WayCarbon, 2021). O sequestro de carbono florestal emerge como uma solução viável para enfrentar as mudanças climáticas, oferecendo oportunidades para estabelecer métricas de pagamento e promover a conservação e valorização das florestas. Nesse contexto, a quantificação precisa do carbono estocado em árvores é essencial para a definição dessas métricas e para a gestão eficiente das florestas.

Diante disto, a compreensão da densidade da madeira é crucial, pois pode fornecer insights valiosos sobre a dinâmica do carbono e ajudar na valorização das castanheiras como ativos naturais que contribuem para o bem-estar da população regional e para a manutenção da oferta de serviços ecossistêmicos.

Este estudo tem como objetivo analisar, por meio da densitometria de Raio-X, a variação temporal da densidade da madeira e suas implicações para o estoque de carbono em castanheiras-da-amazônia localizadas na Amazônia Setentrional, no estado de Roraima.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras não destrutivas de 10 indivíduos arbóreos de castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) localizados em castanhal nativo, na região do Itã, município de Caracaraí, RR (01°48'58,0" N e 61°07'41,0" W).

Trata-se de uma parcela permanente (PP), de 9 ha (300 x 300m), instalada pela Embrapa no ano de 2006 e que desde 2016 tornou-se um sítio de pesquisa do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração do CNPq (Sítio PELD-FORR).

2.1 Coleta e Preparo das Amostras

Para a coleta de amostras utilizou-se a técnica de amostragem não destrutiva, por meio da ferramenta Sonda de Pressler, retirando segmentos do raio dos indivíduos arbóreos a 1,3 m de altura. No laboratório, as amostras foram coladas em suportes de madeira, com fibras direcionadas transversalmente, formando baguetas, as quais passaram por um corte em uma serra circular dupla, com aproximadamente 1,6 mm de espessura, para obtenção de uma fina lâmina da seção transversal. Com o devido corte realizado, as amostras foram acondicionadas em estufa climatizada, com 20 °C e 60% de umidade por 24 h (Tomazello-Filho; Botosso; Lisi, 1999).

2.2 Obtenção de Imagens

As amostras foram radiografadas em equipamento de Raios-X digital Faxitron, no Laboratório de Anatomia e Identificação e Densitometria de Raios X da Madeira (LAIM – ESALQ/USP), com operação a 32 kV em 5s, junto a uma escala de acetato para calibração da microdensidade aparente do lenho. Em seguida, foram coladas em suporte plano e polidas com lixadeira orbital Mirka, com lixas de 80 a 1200 grãos e digitalizadas em equipamento Scanner Epson Expression, com resolução de 1200 dpi.

2.3 Datação e Determinação do Comprimento e Densidade dos Anéis de Crescimento

As imagens escaneadas foram importadas para o software Cybis Co Recorder 7.8 e CDendro, onde foram mensuradas as larguras dos anéis de crescimento de cada raio das árvores. Levando-se em consideração que o ano de formação do último anel foi 2023, cada amostra foi devidamente datada. Já as imagens radiografadas foram inseridas no software WinDENDRO para obtenção do valor médio de densidade aparente para cada anel de crescimento.

2.4 Cálculo da Quantidade de Carbono Estocado e Estimativa das Idades dos Indivíduos Arbóreos

Os valores de largura dos anéis de crescimento foram transformados em diâmetro do tronco (Dt, em cm) e posteriormente em área seccional do anel de crescimento (g), em mm^2 , onde π faz referência ao valor real (Equação 1).

Utilizando-se a equação hipsométrica desenvolvida por Tonini et al. (2008), foi possível estimar a altura das árvores (h) a partir dos valores de Dt. Neste modelo (Equação 2), b0 e b1 são parâmetros ajustados e correspondem respectivamente aos valores 3,928 e -14,536.

Os valores de densidade básica (Db) dos anéis de crescimento foram calculados a partir dos valores médios de densidade aparente ponderada (Dap) obtidos no software Windendro, multiplicados pelo fator 0,828 (Vital, 1984).

A partir dos valores de Db, Dt e h, substituídos devidamente na Equação 3 (Batista et al., 2014), estimou-se a biomassa lenhosa da parte aérea (AGB) para cada indivíduo da parcela, utilizando o fator de forma (ff) 0,64, determinado para castanheiras por Locatelli et al. (2017). Para geração de estimativas de estoque de carbono (C), em kg, foi considerado 50% da biomassa lenhosa da parte aérea (Gibbs et al., 2007). Os valores de C estocados no lenho foram convertidos em CO₂-equivalente (CO₂-eq) pela razão da massa molar de CO₂ e de C (Watson; Cire Writing Team, 2001).

$$D = 0.0256 * \ln(DAP) + 0.7785 \quad 1)$$

$$\ln h = b0 + b1 1/DAP \quad 2)$$

$$B = h * \pi * \frac{DAP^2}{4000} * ff * Db \quad 3)$$

$$I = -0,15176 + 0,79874 * Dt \quad 4)$$

Foram selecionadas amostras de raio completas (medula-casca), totalizando 2 indivíduos, cujas informações de idade (I) e diâmetro do tronco (Dt), foram utilizadas para ajustar, no software Origin 2024.b, um modelo linear de diâmetro do tronco em função da idade (Equação 4), com R² = 0,99. A idade de cada indivíduo no ano de formação do primeiro anel de crescimento da amostra foi estimada utilizando esse modelo, permitindo correlacionar o ano de formação de cada anel com a idade de desenvolvimento do indivíduo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cronologia de *Bertholletia excelsa* para a região do Itã, Caracaraí, RR, foi de 130 anos, considerando 10 árvores. O comprimento médio dos anéis de crescimento

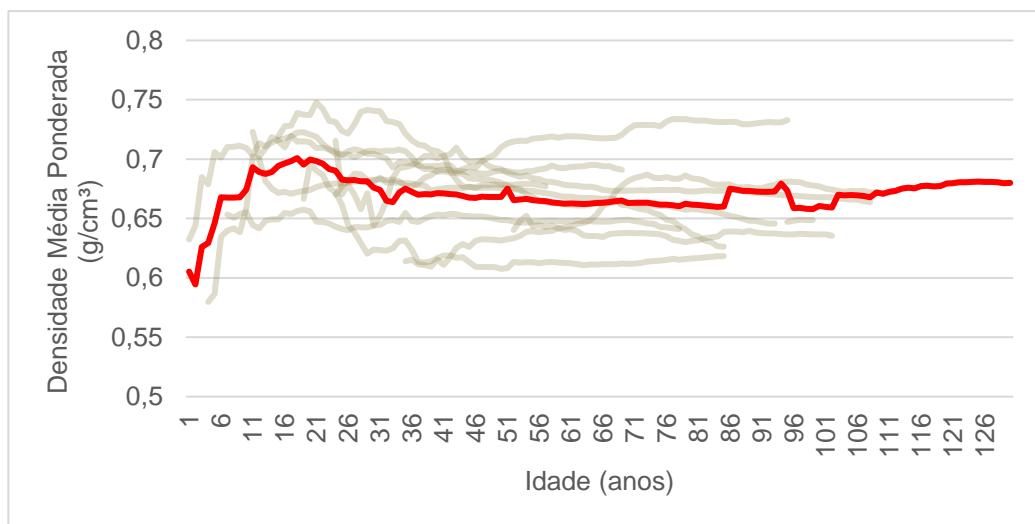


e os valores médios de densidade ponderada da madeira foram respectivamente de $3,87 \pm 2,66 \text{ mm anos}^{-1}$ e $0,67 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3} \text{ anos}^{-1}$.

É possível observar um aumento acentuado de densidade nos primeiros anos dos indivíduos de *B. excelsa*, que posteriormente se estabiliza, atingindo um platô em torno dos 50 anos, e mantendo-se relativamente constante até o final do período analisado (Fig. 1). Isto ocorre devido os indivíduos estarem passando por um período de rápido crescimento e desenvolvimento, o que pode levar a diferenças significativas na densidade. Entretanto, destaca-se uma grande variabilidade da densidade média ponderada entre indivíduos de *B. excelsa*, especialmente nos primeiros anos, que pode variar significativamente mesmo na mesma faixa etária.

Ademais, observa-se a presença de picos e vales tanto para os indivíduos de *B. excelsa*, representados pelas linhas de cor cinza, quanto para os valores médios de densidade média ponderada, representados pela linha vermelha. Esses picos e vales podem indicar eventos ou fatores que influenciaram a densidade do material, como mudanças nas condições ambientais, como processos de liberação ou supressão de crescimento, ou ainda alterações fisiológicas.

Figura 1. Valores de densidade média ponderada no decorrer do crescimento das árvores.



Para os indivíduos amostrados, o incremento de área basal foi de aproximadamente 25.966 cm^2 nos anos 1939 até 2023, que, em um período de 84 anos, corresponde a um incremento médio de $309 \text{ cm}^2 \text{ ano}^{-1}$, apresentando picos de 182 e $172 \text{ cm}^2 \text{ ano}^{-1}$ no anos 1990 e 2021, os quais são observados em árvores mais longevas. Observa-se novamente uma variabilidade nos dados de incremento



corrente anual de área basal, biomassa e, consequentemente, assimilação de carbono (Tabela 1), indicando a influência de fatores endógenos e exógenos no crescimento dos indivíduos.

As árvores analisadas acumularam em média 29.690,3 kg de carbono, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas. A capacidade de sequestro de carbono das árvores de *B. excelsa* mostrou-se diretamente correlacionada ao seu crescimento em diâmetro e à densidade da madeira formada. A curva de captação de carbono acompanhou de forma consistente a curva de crescimento, evidenciando o papel fundamental dessas árvores no sequestro de carbono atmosférico.

Tabela 1. Valores médios, máximos e mínimos do incremento anual de área basal, biomassa e carbono para *Bertholletia excelsa*, na Amazônia Setentrional.

Área Basal			Carbono			Biomassa		
	(cm ² /ano)			(kg/ano)			(kg/ano)	
Média	Máx	Min	Média	Máx	Min	Média	Máx	Min
309,00	182,02	6*10 ⁻²	29.690,30	191.120,00	8,83*10 ⁻²¹	59.380,60	38.2239,70	1,76*10 ⁻²⁰

Este estudo representa um avanço significativo na avaliação do sequestro de carbono em *Bertholletia excelsa* (Pinheiro, 2022), ao incorporar a variabilidade temporal da densidade da madeira nas estimativas, permitindo a geração de avaliações mais precisa da biomassa acima do solo e, consequentemente, da captura de carbono.

A espécie apresenta variações na densidade da madeira ao longo de sua vida e em relação ao diâmetro, como registrado para outras espécies florestais (Chave et al., 2004; Heitz et al., 2013). Ignorar essas variações pode levar a subestimativas ou superestimativas dos estoques de carbono (Baker et al., 2004).

A dendrocronologia pode ser particularmente relevante para a investigação da dinâmica da biomassa florestal, pois permite estimar dados de crescimento, biomassa e carbono ao longo de toda a vida das árvores. Esta abordagem permite ampliar o entendimento sobre os mecanismos de captura e sequestro de carbono e pode contribuir para melhorar as estimativas de sequestro de carbono por florestas tropicais. Sua valorização como um ativo natural pode proporcionar benefícios econômicos e sociais significativos para as comunidades locais, que dependem do

extrativismo da castanha. A integração de práticas de manejo sustentável e a promoção do mercado de carbono podem garantir a conservação das florestas tropicais, ao mesmo tempo em que oferecem alternativas viáveis para a melhoria da qualidade de vida de suas populações.

4. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a densidade da madeira das castanheiras (*Bertholletia excelsa*) sofre variações ao longo de sua história de vida. Observou-se um incremento significativo na densidade da madeira nos primeiros anos, que se estabiliza após cerca de 50 anos, permanecendo relativamente constante nos anos seguintes.

A capacidade de sequestro de carbono dessas árvores mostrou-se diretamente relacionada ao seu crescimento em diâmetro e à densidade da madeira formada. Além disso, a curva de captação de carbono acompanha de forma consistente o padrão de crescimento das árvores, indicando uma relação direta entre esses dois processos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica concedida a M.E.P.G.; ao LAIM – ESALQ/USP pela disponibilização de espaço e equipamentos; e ao CNPq e Embrapa pelo financiamento, respectivamente, através dos Projetos PELD-FORR (Processo:441575/2016-1) e EcogenCast (SEG:12.13.05.017.00.00).

6. REFERÊNCIAS

- ALEIXO, A. et al. Mudanças climáticas e a biodiversidade dos biomas brasileiros: passado, presente e futuro. *Natureza & Conservação*, v.8, n.2, p.194-196, 2010.
- ALMEIDA, A.W. Terras tradicionalmente ocupadas: processos de territorialização e movimentos sociais. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v.6, n.1, p.9-32, 2004.
- BATISTA, J. L. F; COUTO, H. T. Z. do; SILVA-FILHO, D. F. da. Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2014. 384 p.
- CHAVE, J. et al. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, The Royal Society, v. 359, p. 409-420, 2004.



FAUSET, S. et al. Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nature Communications*, n. 6, p. 6857, abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms7857>

FEARNSIDE, P. M. Amazon forest maintenance as a source of environmental services. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 80, n. 1, p. 101–114, 2008.

GIBBS, H. K. et al. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, v. 2, n. 4, 2007.

HIETZ, P.; VALENCIA, R.; WRIGHT, S. J. Strong radial variation in wood density follows a uniform pattern in two neotropical rain forests. *Functional Ecology*, Wiley Online Library, v. 27, p. 684–692, 2013.

INTERNATIONAL CHAMBER OF COMMERCE BRASIL; WAYCARBON. Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono – Relatório. 2021. Disponível em: https://www.iccbrasil.org/wp-content/uploads/2021/10/oportunidades-para-o-brasil-em-mercados-de-carbono_icc-br-e-waycarbon_29_09_2021.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.

LOCATELLI, M. et al. Fator de forma para a castanheira-da-amazônia. Porto Velho, RO: Embrapa Rondônia, 2017. 4 p.

OBSERVATÓRIO CASTANHA-DA-AMAZÔNIA. A castanha-da-Amazônia: aspectos econômicos e mercadológicos da cadeia de valor. Organização Observatório Castanha-da-Amazônia (OCA). – Brasília, DF: Mil Folhas do IEB, 2023. 44 p. Disponível em: https://observatoriodacastanha.org.br/api/uploads/documents/A_Castanha_Da_Amazonia_Aspectos_Economicos_EMercadologicos.pdf. Acesso em: 5 jun. 2024.

PINHEIRO, F. A. P. Diversidade arbórea e estoque de biomassa em um castanhal nativo do sul do estado de Roraima. 2022. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Roraima, Bela Vista.

TOMAZELLO-FILHO, M., BOTOSSO P.C., LISI C.S. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. In: MAIA, N.B. et al. (org.) *Indicadores ambientais: conceitos e aplicações*. São Paulo, SP: EDUC, 1999. 285 p.

TONINI, H.; COSTA, P. da; KAMINSKI, P. E. Estrutura e produção de duas populações nativas de castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* O. Berg) em Roraima. *Floresta*, v. 38, n. 3, p. 445-457, 2008.

VITAL, B. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais – Universidade Federal de Viçosa, 1984. 21p. (Boletim Técnico, n.1).

WADT, L. H. de O. et al. (ed.). *Produtos florestais não madeireiros: guia metodológico da Rede Kamukaia*. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 133 p.

WATSON, R. T.; CORE WRITING TEAM (ed.). *Climate change 2001: synthesis report*. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press: Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001, 397p. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/466959?v=pdf>. Acesso em: 05 de jun. de 2024.