



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIEDADE, NATUREZA E
DESENVOLVIMENTO

LUCAS CUNHA XIMENES

ESTRATÉGIAS PARA O MANEJO DE *Carapa guianensis* Aublet NA
FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS

SANTARÉM-PA

2024

LUCAS CUNHA XIMENES

**ESTRATÉGIAS PARA O MANEJO DE *Carapa guianensis* Aublet NA
FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS**

Tese submetida para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais do Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, na Linha de Pesquisa: Impactos Ambientais e Sociais da Mudança do Uso da Terra na Amazônia.

Orientador: Lucas José Mazzei de Freitas

Coorientadora: Luciana Karla Valéria dos Santos Sousa

SANTARÉM-PARÁ

2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

X6e Ximenes, Lucas Cunha
Estratégias para o manejo de *Carapa guianensis* Aublet na Floresta Nacional do Tapajós./ Lucas Cunha Ximenes. – Santarém, 2024.
76 p. : il.
Inclui bibliografias.

Orientador: Lucas José Mazzei de Freitas.
Coorientadora: Luciana Karla Valéria dos Santos Sousa.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Biodiversidade e Florestas, Programa de Pós-Graduação Sociedade, Natureza e Desenvolvimento.

1. Estrutura Populacional. 2. Dendrocronologia. 3. Incremento. I. Freitas, Lucas José Mazzei de, *orient.*. II. Sousa, Luciana Karla Valéria dos Santos, *coorient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 634.92098115



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIEDADE, NATUREZA E DESENVOLVIMENTO

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 26 dias do mês de março do ano de 2024, às 09 horas, através da plataforma virtual meet.google.com/qvf-cdfb-zka e na sala 447 (miniauditório) BMT2, instalou-se a banca examinadora de tese de doutorado do discente Lucas Cunha Ximenes do PPGSND/UFOPA. A banca examinadora foi composta pelo Dr. Lucas José Mazzei de Freitas, PPGSND/UFOPA, orientador e presidente da banca, e pela professora Dr. Luciana Karla Sousa, co-orientadora, e pelos cientistas Dra. Raquel da Silva Medeiros (examinadora externa – INPA, por videoconferência), professor Dr. Afonso Figueiredo Filho (examinador externo – Unicentro, por videoconferência), Dr. Rafael Rode (examinador externo - UFOPA), Dr. Thiago Almeida Vieira (examinador interno - PPGSND/UFOPA), Dra. Lucieta Guerreiro Martorano (examinadora interna - PPGSND/UFOPA) e Dr. Rodrigo Antônio Pereira Junior (examinador externo - PPGSND/UFOPA, por videoconferência). Deu-se início à abertura dos trabalhos, por parte do professor Dr. Lucas José Mazzei de Freitas, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou ao candidato que iniciasse a apresentação da tese, intitulada “Estratégias para o manejo de *Carapa guianensis* Aublet na Floresta Nacional Tapajós”, informando ao discente que possui de 30 a 60 minutos para a apresentação. Concluída a exposição, o Prof. Lucas José Mazzei de Freitas, presidente da banca, passou a palavra à examinadora externa, Dr. Raquel da Silva Medeiros, para arguir o candidato, e, em seguida, aos demais membros para que fizessem o mesmo, na ordem acima citada. Após o término das arguições o orientador solicitou a saída do candidato e do público da sala para que ocorresse a reunião exclusiva entre os membros da banca para o julgamento do trabalho. Após as deliberações da banca examinadora, o orientador convocou o candidato e o público ouvinte de volta para divulgação do resultado. A banca examinadora decidiu por unanimidade pela aprovação do candidato, conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Oeste do Pará. A versão final da tese deverá ser entregue ao programa, no prazo de trinta dias após a defesa, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora. Nada mais havendo por constar, lavrou-se e fez-se a leitura da presente ata que segue assinada pelos membros da banca examinadora, presidente da banca e doutorando. Santarém (PA), vigésimo sexto dia do mês de março do ano de dois mil e vinte e quatro, às treze horas e cinquenta minutos.

 <p>Documento assinado digitalmente LUCAS JOSE MAZZEI DE FREITAS Data: 01/04/2024 09:33:07-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Dr. Lucas José Mazzei de Freitas PPGSND/UFOPA Presidente da banca</p>	 <p>Documento assinado digitalmente LUCIANA KARLA VALERIA DOS SANTOS SOUSA Data: 01/04/2024 10:41:19-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Dra. Luciana Karla Valéria dos Santos Sousa Co-orientadora</p>	 <p>Documento assinado digitalmente LUCAS CUNHA XIMENES Data: 01/04/2024 09:48:12-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Lucas Cunha Ximenes Discente PPGSND</p>
 <p>Documento assinado digitalmente RAQUEL DA SILVA MEDEIROS Data: 02/04/2024 16:06:57-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Dra. Raquel da Silva Medeiros INPA</p>	 <p>Documento assinado digitalmente AFONSO FIGUEIREDO FILHO Data: 02/04/2024 15:42:43-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Dr. Afonso Figueiredo Filho Unicentro</p>	 <p>Documento assinado digitalmente RAFAEL RODE Data: 02/04/2024 14:41:33-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Dr. Rafael Rode UFOPA</p>
 <p>Documento assinado digitalmente THIAGO ALMEIDA VIEIRA Data: 01/04/2024 11:05:06-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Dr. Thiago Almeida Vieira PPGSND/UFOPA</p>	 <p>Documento assinado digitalmente LUCIETA GUERREIRO MARTORANO Data: 01/04/2024 09:44:50-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Dra. Lucieta Guerreiro Martorano PPGSND/UFOPA</p>	 <p>Documento assinado digitalmente RODRIGO ANTONIO PEREIRA JUNIOR Data: 02/04/2024 15:15:58-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> <p style="text-align: center;">Dr. Rodrigo Antônio Pereira Junior IFPA</p>

Aos meus pais, Anastácio Aguiar Ximenes e Maria de
Fátima da Cunha Ximenes,
Ao eterno amigo João Ricardo Vasconcellos Gama
(*in memoriam*)

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre iluminar e guiar os meus caminhos e por ter me mantido firme no meu propósito, mesmo diante das inúmeras dificuldades que enfrentei ao longo da minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais, Anastácio Aguiar Ximenes e Maria de Fátima da Cunha Ximenes, por nunca terem medido esforços em me ajudar no que fosse preciso.

Ao João Ricardo Vasconcellos Gama (*in memoriam*), por ter sido a minha maior inspiração profissional e por nunca ter deixado de acreditar no meu potencial.

Ao Lucas José Mazzei de Freitas, pela orientação, disponibilidade e pelas valiosas contribuições a esta tese.

À Luciana Karla Valéria dos Santos Sousa, pela orientação e disponibilidade em me instruir nas análises dendrocronológicas com eficiência.

Ao Alar Läänelaid, pela orientação, por todo o auxílio prestado a mim e pelos inúmeros passeios prazerosos nas florestas estonianas, sempre demonstrando com entusiasmo sua paixão pela ciência e pela botânica.

À Kristina Sohar, pela orientação e por sempre se colocar à disposição para me auxiliar na mensuração das amostras.

Ao Mario Tommasiello Filho, por ter gentilmente cedido a sonda motorizada para a coleta das amostras e por ter me concedido a oportunidade de ter participado da disciplina de Dendrocronologia de forma remota.

À Soliane Sousa, Eduardo Renan, José Rocha, Manoel Castro e Rodrigo Araújo, pelo auxílio valioso nas coletas de dados em campo.

À Pricila Lima, pelo auxílio inestimável na sincronização das amostras.

Aos colegas e amigos que me auxiliaram em algum outro momento da execução da tese: Girlene Cruz, Luan Campos, Anselmo Araújo, Lucian Oliveira, Danilo Ícaro, Diego Vieira e Viviane Dourado.

À Vanessa Leão e Bruna Naiara, por terem tornado a jornada do doutorado mais leve.

Ao amigo Anderson Oliveira, por ser meu porto seguro em muitos momentos difíceis, sempre me ouvindo, aconselhando e torcendo pelo meu sucesso.

À Marcelene Farias, em nome da Cooperativa Mista da Floresta Nacional do Tapajós, pelo apoio logístico para a coleta de dados em campo e por fornecer informações adequadas, sempre que fosse necessário.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao Programa Dora Plus, pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche na University of Tartu, na Estônia, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, por ter concedido autorização para a coleta de dados e para o transporte do material.

À Universidade Federal do Oeste do Pará e ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, por terem me proporcionado a oportunidade de realizar doutorado e fazer pesquisa na Amazônia.

“Me ensinaram que o caminho do progresso não era rápido, nem fácil”

(Marie Curie)

RESUMO

Os objetivos desta tese foram analisar a estrutura populacional e o padrão espacial de árvores de *Carapa guianensis* Aublet, além de determinar seu diâmetro mínimo de corte (DMC) e ciclo de corte (CC) na Floresta Nacional do Tapajós, a fim de prospectar estratégias de manejo madeireiro para a referida espécie. Os dados para responder ao primeiro objetivo são provenientes do inventário 100% (pré-exploratório) das Unidades de Produção Anual (UPAs) 4, 9, 10, 11, 12, 13 e 1, com nível de inclusão de diâmetro à altura do peito - DAP \geq 20 cm. Foram calculados a estrutura horizontal, a distribuição diamétrica, o padrão de distribuição espacial pelo método K de Ripley e a densidade de Kernel total e por classe de diâmetro, levando em consideração as coordenadas geográficas das árvores. O padrão de distribuição espacial foi predominante agregado, sendo essencial para o planejamento e execução das atividades de colheita madeireira e não-madeireira para um possível futuro manejo da espécie. Os mapas da densidade de Kernel mostraram-se ser uma ferramenta eficaz na capacidade de fornecer subsídios para o manejador planejar tanto a exploração madeireira de *Carapa guianensis* quanto a não-madeireira. Para responder ao segundo objetivo, foram selecionadas 30 árvores localizadas nas UPAs 4 e 10 na Floresta Nacional do Tapajós. Com o uso de uma sonda, foram coletadas, a uma altura de 1,3 m do solo, de 2 a 3 amostras radiais por árvore, totalizando 85 baguetas. Para a modelagem do crescimento, foi aplicado o método GOL (*Growth-Oriented Logging*), com a construção de curvas de diâmetro, área basal e volume em função da idade. O Incremento Corrente Anual (ICA) e o Incremento Médio Anual (IMA) do DAP sem casca das árvores foram obtidos a partir do crescimento cumulativo nos diferentes anos. O DMC foi definido como o diâmetro na idade em que a espécie atingiu seu maior incremento corrente em volume. O ciclo de corte foi determinado pela estimativa do tempo médio de passagem pelas classes diamétricas de 10 cm, até atingir o DMC específico calculado. A espécie *Carapa guianensis* apresenta anéis de crescimento anuais distintos, cuja análise permitiu modelar padrões de crescimento em diâmetro, volume e área basal, permitindo com que critérios específicos de manejo fossem estabelecidos. Os resultados indicam que para que haja um manejo sustentável, é necessário que o DMC seja de 50 cm, com ciclo de corte de 14,8 anos.

Palavras-chave: Estrutura Populacional; Dendrocronologia; Incremento

ABSTRACT

The objectives of this thesis were to analyze the population structure and spatial pattern of *Carapa guianensis* Aublet trees and to define its Minimum Logging Diameter (MLD) and Cutting Cycle (CC) in the Tapajós National Forest, to prospect timber management strategies for that species. The data to answer the first objective comes from the 100% (pre-exploratory) inventory of Annual Production Units (APUs) 4, 9, 10, 11, 12, 13 and 1, with inclusion level of diameter at breast height – DBH \geq 20 cm. The horizontal structure, diameter distribution, the spatial distribution pattern using Ripley's K method and the Kernel density for the total population and by diameter class were calculated, taking into account the geographic coordinates of the trees. The spatial distribution pattern was predominantly aggregated, being essential for the planning and execution of timber and non-timber harvesting activities for possible future management of the species. Kernel density maps proved to be an effective tool in the capacity to provide subsidies for the manager to plan both the timber exploitation of *Carapa guianensis* and non-timber exploitation. To respond to the second objective, 30 trees were selected, located in APUs 4 and 10 in the Tapajós National Forest. Using a probe, 2 to 3 wood cores per tree were collected at a height of 1.3 m above the ground, totaling 85 cores. To model growth, the Growth-Oriented Logging (GOL) method was applied, with the construction of curves of diameter, basal area, and volume as a function of age. The value of the current annual increment (CAI) and the mean annual increment (MAI) of the DBH of the trees without the bark were obtained from the cumulative growth in the different years. The MLD corresponded to the diameter at the age at which the species reached its highest current increase in volume. The cutting cycle was determined by estimating the average passage time through the 10 cm diameter classes, until reaching the calculated specific MLD. The species *Carapa guianensis* has distinct annual growth rings, that allow modeling the growth patterns in diameter, volume and basal area, allowing specific management criteria to be established. The results indicate that in order to have sustainable management, the MLD must be 50 cm, with a 14,8-year cutting cycle.

Keywords: Population Structure; Dendrochronology; Increment

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Disposição das Unidades de Produção Anual (UPAs) 1, 4, 9, 10, 11, 12 e 13 na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 2. Distribuição diamétrica de densidade de árvores de *Carapa guianensis* (DAP \geq 20 cm) por Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 3. Resultado da função K de Ripley univariada e distribuição espacial de árvores de *Carapa guianensis* com DAP \geq 20 cm por Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 4. Padrão espacial utilizando a função K de Ripley univariada de *Carapa guianensis* das Unidades de Produção Anual 1, 4, 9, 10, 12 e 13 por classe de DAP I (20,0 cm a 49,9 cm), II - (50,0 cm a 79,9 cm) e III - (igual ou acima de 80,0 cm) na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 5. Distribuição espacial da densidade ($n \cdot ha^{-1}$) de árvores de *Carapa guianensis* (DAP \geq 20 cm) por Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós. Em que: alta = entre 0,0273 e 0,0372 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$; média = entre 0,0174 e 0,0272 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$; baixa = entre 0,0075 e 0,0173 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$.

Figura 6. Distribuição espacial da densidade ($n \cdot ha^{-1}$) de árvores de *Carapa guianensis* das Unidades de Produção Anual 1, 4, 9, 10, 11, 12 e 13 por classe de DAP I – (20,0 cm a 49,9 cm), II - (50,0 cm a 79,9 cm) e III - (igual ou acima de 80,0 cm) na Floresta Nacional do Tapajós. Em que: classe de DAP I (alta = entre 0,0346 e 0,0372 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$; média = entre 0,0101 e 0,0345 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$; baixa = entre 0,0075 e 0,0100 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$); classe de DAP II (alta = entre 0,0014 e 0,0029 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$; média = entre 0,00063 e 0,0013 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$); baixa = entre 0,0002 e 0,0005 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$); classe de DAP III (alta = entre 0,0083 e 0,0151 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$; média = entre 0,0036 e 0,0082 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$; baixa = entre 0,0003 e 0,0035 $\acute{a}rv \cdot ha^{-1}$).

Figura 7. Distribuição espacial do volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) de árvores de *Carapa guianensis* (DAP \geq 20 cm) por Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós. Em que: alta = entre 0,4714 e 0,7062 $m^3 \cdot ha^{-1}$; média = entre 0,2366 e 0,4713 $m^3 \cdot ha^{-1}$; baixa = 0,0018 e 0,2365 $m^3 \cdot ha^{-1}$.

Figura 8. Distribuição espacial do volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) de árvores de *Carapa guianensis* (DAP \geq 20 cm) das Unidades de Produção Anual 1, 4, 9, 10, 11, 12 e 13 por classe de DAP I – (20,0 cm a 49,9 cm), II - (50,0 cm a 79,9 cm) e III - (igual ou acima de 80,0 cm) na Floresta Nacional do Tapajós. Em que: classe de DAP I (alta = entre 0,9196 e 1,3602 $m^3 \cdot ha^{-1}$; média = entre 0,4790 e 0,9195 $m^3 \cdot ha^{-1}$; baixa = entre 0,0384 e 0,4789 $m^3 \cdot ha^{-1}$); classe de DAP II (alta = entre 1,8881 e 2,8011 $m^3 \cdot ha^{-1}$; média = entre 0,9752 e 1,8880

$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$); baixa = entre 0,0623 e 0,9751 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; classe de DAP III (alta = entre 0,1350 e 0,1866 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; média = entre 0,0835 e 0,1349 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; baixa = entre 0,0319 e 0,0834 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

Figura 9. Localização das árvores de *Carapa guianensis* nas Unidades de Produção Anual 4 e 10 na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 10. Extração das baguetas de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 11. Coleta das amostras (baguetas) pelo método não destrutivo a 1,3 m de altura do solo e em 2 ou 3 diferentes direções nas árvores de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. As setas pretas indicam as diferentes direções em que as amostras foram retiradas.

Figura 12. Baguetas de *Carapa guianensis* coletadas na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 13. Fluxograma da coleta e processamento dos dados. Em que: DMC: Diâmetro Mínimo de Corte e CC: Ciclo de corte.

Figura 14. Anéis de crescimento de *Carapa guianensis*. As faixas azuis indicam as faixas de parênquima axial marginal que delimitam os anéis de crescimento da espécie.

Figura 15. A seta branca refere-se a agrupamento/densidade de vasos devido à faixas de parênquima muito estreitas e muito próximas entre si, indicando um falso anel de crescimento em *Carapa guianensis*.

Figura 16. A seta branca refere-se a um conjunto de faixas de parênquima muito estreitas e sobrepostas, formando uma faixa contínua e indicando um falso anel de crescimento em *Carapa guianensis*.

Figura 17. As setas brancas referem-se a anéis convergentes, indicando um falso anel de crescimento em *Carapa guianensis*.

Figura 18. Curvas de crescimento cumulativo em diâmetro em função da idade de 30 árvores de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 19. Curvas de crescimento em diâmetro para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. A linha preta contínua representa o crescimento cumulativo em diâmetro; a linha cinza representa o incremento corrente anual em diâmetro; a linha preta tracejada representa o incremento médio anual em diâmetro.

Figura 20. Curvas de crescimento em área basal para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. A linha preta contínua representa o crescimento cumulativo em área basal; a linha cinza representa o incremento corrente em área basal; a linha preta tracejada representa o incremento médio em área basal.

Figura 21. Curvas de crescimento em volume para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. A linha preta contínua representa o crescimento cumulativo em volume; a linha cinza representa o incremento corrente em volume; a linha preta tracejada representa o incremento médio em volume; a seta vermelha indica o ponto de máximo incremento em volume.

Figura 22. Relação entre diâmetro e idade para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós e o tempo de passagem (anos) que a espécie necessitou para atingir cada classe de 10 cm de diâmetro até alcançar o diâmetro mínimo de corte (DMC) de 50 cm.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização das Unidades de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós.

Tabela 2. Equações de volume ajustadas para cada Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós.

Tabela 3. Estrutura horizontal e volumetria de *Carapa guianensis* (DAP \geq 20 cm) na Floresta Nacional do Tapajós.

Tabela 4. Quantidade de árvores de *Carapa guianensis* utilizadas para as análises pelos anéis de crescimento nas UPAs 4 e 10 na Floresta Nacional do Tapajós.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
OBJETIVOS	18
Capítulo 1 – Estrutura populacional e distribuição espacial de <i>Carapa guianensis</i> Aublet e suas implicações para o manejo na Floresta Nacional do Tapajós	19
Introdução	19
Material e Métodos.....	22
Resultados	29
Discussão	37
Conclusão.....	41
Referências bibliográficas.....	41
Capítulo 2 – Uso da dendrocronologia para definir ciclo e diâmetro mínimo de corte para o manejo madeireiro de <i>Carapa guianensis</i> Aublet na Amazônia Oriental	49
Introdução	49
Material e métodos	51
Resultados	59
Discussão	66
Conclusão.....	70
Referências bibliográficas.....	70
CONCLUSÕES GERAIS	76

INTRODUÇÃO GERAL

Carapa guianensis Aublet, popularmente conhecida no Brasil como “andiroba”, nome derivado do tupi guarani “*nhandi-rob*” (*nhandi*: óleo e *rob*: amargo), é uma árvore com excelente qualidade de madeira (FERRAZ; CAMARGO; SAMPAIO, 2002a), sendo empregada na fabricação de móveis, carpintaria, marcenaria, construção civil e naval, lâminas e compensados (FREITAS et al., 2013) e suas sementes produzem um dos óleos mais aplicados na medicina popular amazônica (BOUFLEUER, 2004b). Além disso, possui ampla distribuição geográfica, podendo ser encontrada desde o Paraguai até a América Central (LAMEIRA et al., 2022).

Em virtude da sua alta demanda comercial, estudos que visam seu manejo devem ser conduzidos de forma a levar em consideração suas características ecológicas e de crescimento, com o intuito de estabelecer critérios de manejo específicos para a espécie e promovendo, portanto, sua sustentabilidade da produção;

O estudo da estrutura de populações de espécies, considerando mortalidade e sobrevivência por classes diamétricas, associado à temporalização das classes e a incorporação dos dados de crescimento, provenientes de parcelas permanentes ou por medição dos anéis de crescimento, propiciam análise concreta sobre os limites dos ciclos na produção ótima (BRAZ; MATTOS, 2015a). A implantação de projetos de manejo florestal em florestas nativas necessita de informações sobre a composição e estrutura de populações de espécies comerciais (HOSOKAWA; MOURA; CUNHA, 2008).

Ademais, é importante levar em consideração o padrão espacial de uma espécie em uma floresta de produção para fins de manejo, pois o seu desconhecimento pode resultar em uma redução exagerada do número de árvores e, conseqüentemente, aumento da distância entre árvores, alterando os processos reprodutivos, como o fluxo de pólen, o que influenciaria a produção de sementes, a taxa de germinação e a estrutura diamétrica (DEGEN; ROUBIK, 2004; MURAWSKI; HAMRICK, 1991)

Portanto, para caracterizar os parâmetros ecológicos de árvores de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós, foram utilizados, no capítulo 1, a estrutura populacional, a distribuição diamétrica, a distribuição espacial e a quantificação do estoque volumétrico, a fim de que essas informações fossem capazes de subsidiar o manejo madeireiro desta espécie.

Além disso, nos últimos anos, estudos dendroecológicos têm sido desenvolvidos como ferramenta para projetar intervenções de colheita de madeira (BRIENEN; ZUIDEMA, 2006) e avaliar e ajustar as atuais práticas de manejo florestal em florestas

tropicais, a fim de encontrar a sustentabilidade da produção (ANDRADE et al., 2019a; LÓPEZ; VILLALBA; BRAVO, 2013; MIRANDA et al., 2018; SCHÖNGART, 2008a).

Em virtude disso, no 2º capítulo desta tese, foram utilizados dados de anéis de crescimento de *C. guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós, a fim de estabelecer critérios específicos de diâmetro mínimo de corte e de ciclo de corte para o manejo madeireiro da referida espécie, respeitando suas características biológicas de padrão de crescimento em diâmetro, área basal e volume.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, V. H. F. et al. Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 215–223, 15 abr. 2019.

BOUFLEUER, T. N. **Aspectos ecológicos de Andiroba (*Carapa guianensis* Aublet., Meliaceae), visando seu manejo e conservação**. Dissertação de mestrado—Rio Branco: Universidade Federal do Acre, 2004.

BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P. Manejo de produção em florestas naturais da Amazônia: mitos e verdades. **Nativa**, v. 3, n. 4, p. 292–295, 20 dez. 2015.

BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. **Journal of Ecology**, v. 94, n. 2, p. 481–493, mar. 2006.

DEGEN, B.; ROUBIK, D. W. Effects of animal pollination on pollen dispersal, selfing, and effective population size of tropical trees: a simulation study. **Biotropica**, v. 36, n. 2, p. 165–179, 2004.

FERRAZ, I. D. K.; CAMARGO, J. L. C.; SAMPAIO, P. DE T. B. Acta_Nogueira. **Acta Amazonica**, v. 32, n. 4, p. 647–661, 2002.

FREITAS, J. L. et al. Fenologia Reprodutiva da Espécie *Carapa guianensis* Aubl. (Andirobeira) em Ecossistemas de Terra Firme e Várzea, Amapá, Brasil. **Biota Amazônia**, v. 3, n. 1, p. 31–38, 30 jun. 2013.

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B.; CUNHA, U. S. **Introdução ao Manejo e Economia de Florestas**. 1. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2008. v. 1

LAMEIRA, O. A. et al. *Carapa guianensis*: Andiroba. Em: CORANDIN, L.; CAMILLO, J.; VIEIRA, I. C. G. (Eds.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Norte**. 53. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2022. v. 1p. 1002–1012.

LÓPEZ, L.; VILLALBA, R.; BRAVO, F. Cumulative diameter growth and biological rotation age for seven tree species in the Cerrado biogeographical province of Bolivia. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 49–55, 5 mar. 2013.

MIRANDA, Z. P. et al. Volume increment modeling and subsidies for the management of the tree *Mora paraensis* (Ducke) Ducke based on the study of growth rings. **Trees - Structure and Function**, v. 32, n. 1, p. 277–286, 1 fev. 2018.

MURAWSKI, D. A.; HAMRICK, J. L. The effect of the density of flowering individuals on the mating systems of nine tropical tree species. **Heredity**, v. 67, p. 167–174, 1991.

SCHÖNGART, J. Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 1–2, p. 46–58, 10 jul. 2008.

OBJETIVOS

Analisar a estrutura populacional e o padrão espacial de árvores de *Carapa guianensis* Aublet na Floresta Nacional do Tapajós.

Definir diâmetro mínimo de corte (DMC) e ciclo de corte (CC) para *Carapa guianensis* Aublet na Floresta Nacional do Tapajós, com o intuito de prospectar ações de manejo madeireiro para a referida espécie.

Capítulo 1 – Estrutura populacional e distribuição espacial de *Carapa guianensis* Aublet e suas implicações para o manejo na Floresta Nacional do Tapajós

Resumo

O objetivo deste estudo foi analisar a estrutura populacional e o padrão espacial de árvores de *Carapa guianensis* Aublet na Floresta Nacional do Tapajós. Os dados são provenientes do inventário 100% (pré-exploratório) de sete Unidades de Produção Anual (UPAs), com nível de inclusão de DAP (diâmetro à altura do peito) ≥ 20 cm. A estrutura horizontal foi calculada e para avaliação da distribuição diamétrica da espécie na área, as árvores foram agrupadas em classes de diâmetro com amplitude de 10 cm. O padrão de distribuição espacial foi determinado pelo método K de Ripley, no qual o raio s foi de 5 m, até uma distância máxima, que variou de 3000 m até 7360 m, dependendo do tamanho da área de cada UPA. O padrão foi determinado tanto para o conjunto de todas as árvores por UPA, quanto por classe de DAP, sendo I – remanescentes (20,0 cm a 49,9 cm), classe II – produção não-madeireira (50,0 cm a 79,9 cm) e classe III – árvores senescentes (igual ou acima de 80,0 cm) para cada UPA. A densidade total e por classe de diâmetro, além da volumetria foram representadas em mapas de calor, utilizando estimador de densidade de Kernel, levando em consideração as coordenadas geográficas das árvores. As árvores de *Carapa guianensis* da UPA 4 da Floresta Nacional do Tapajós, podem ser exploradas comercialmente a partir de 80 cm de DAP e as sementes de árvores com DAP até 79,9 cm podem ser coletadas para manejo não-madeireiro, indicando, assim, a espécie para manejo de uso múltiplo. O padrão de distribuição espacial foi predominante agregado, sendo essencial para o planejamento e execução das atividades de colheita madeireira e não-madeireira para um possível futuro manejo da espécie. Os mapas da densidade de Kernel mostraram-se ser uma ferramenta eficaz na capacidade de fornecer subsídios para o manejador planejar tanto a exploração madeireira de *Carapa guianensis*, levando em consideração as densidades e os estoques volumétricos das árvores, quanto a colheita de frutos para o manejo não-madeireiro, além de intervenções silviculturais nas árvores de classes diamétricas menores.

Palavras-chave: Floresta Nacional do Tapajós; K de Ripley; Densidade de Kernel

Introdução

À medida que o desmatamento cresce na Amazônia, com a taxa do ano de 2020 sendo a maior dos últimos 11 anos (SILVA JUNIOR et al., 2021), aumenta-se a necessidade da adoção de ferramentas que promovam a conservação das florestas, como o manejo florestal, por exemplo. Dentro desse contexto, a aplicação da exploração

florestal, dentro de um plano de manejo licenciado, reduz os danos causados pela extração seletiva de madeira, podendo garantir que a regeneração natural da floresta manejada seja capaz de produzir estoque de madeira no futuro (QUANZ et al., 2012).

Quando comparado com a exploração ilegal, no manejo florestal há maior recuperação da biomassa e do volume de madeira pós-colheita (VIDAL; WEST; PUTZ, 2016; WEST; VIDAL; PUTZ, 2014), além da redução da área de infraestruturas construídas (SIST et al., 2003a) e de maior lucratividade (HOLMES et al., 2002). Ainda do ponto de vista ecológico, os danos à vegetação remanescente no manejo são menores, uma vez que a exploração ilegal envolve a derrubada de várias árvores adjacentes aptas para a colheita, criando clareiras que favorecem a regeneração de espécies pioneiras (DENSLOW, 1987; SWAINE; WHITMORE, 1988) e suprimindo o crescimento de espécies de interesse comercial (APPANAH; PUTZ, 1984; CARSE; FREDERICKSEN; LICONA, 2000; PEÑA-CLAROS et al., 2008; PUTZ, 1991).

Apesar disso, a obtenção de rendimentos sustentáveis no manejo de recursos madeireiros requer o conhecimento das características específicas do sítio e das espécies florestais na área de estudo (SEBBENN et al., 2008; VAN GARDINGEN; VALLE; THOMPSON, 2006), uma vez que, quando submetidas à colheita, as espécies respondem de forma diferente, tanto demograficamente quanto geneticamente, com diferentes taxas de riqueza de alelos (SEBBENN et al., 2008). Por isso, as práticas de manejo florestal devem levar em consideração não só as taxas de crescimento individual, mas também as variáveis ecológicas de cada espécie, a fim de promover a manutenção e a conservação das populações e da floresta a longo prazo (SEBBENN et al., 2008).

Dentre essas variáveis, a distribuição diamétrica fornece informações sobre o estoque de madeira disponível para colheita (CYSNEIROS et al., 2017), pois auxilia na tomada de decisões sobre a necessidade de reposição florestal (COELHO DE ABREU et al., 2014). Oferece ainda informações ecológicas importantes sobre a densidade, o recrutamento e a mortalidade de árvores em diferentes tamanhos (LOPES et al., 2011), fornecendo subsídios para a implantação de estratégias de sua manutenção, recuperação e conservação (COSTA et al., 2019). Ademais, pode ser usada para indicar se a densidade de árvores menores em um povoamento é suficiente para substituir a população atual de árvores maiores e auxilia na avaliação do potencial de sustentabilidade da floresta (RUBIN; MANION; FABER-LANGENDOEN, 2006).

As informações sobre a estrutura e o padrão espacial de espécies arbóreas também são necessárias para o entendimento de suas ecologias. O padrão de distribuição espacial

das plantas está relacionado a diversos processos ecológicos, envolvendo fatores endógenos, como mecanismos de dispersão, interação interespecífica e competição, bem como fatores exógenos, como tipo de solo, textura, fertilidade, disponibilidade de água, luz e temperatura (BASTOS et al., 2018; BOLKER, 2003; FLETCHER; FORTIN, 2018).

Além disso, antes de realizar o manejo de qualquer espécie comercial, é importante levar em consideração seu padrão de distribuição espacial na área (SCHWARTZ et al., 2014), pois ele fornece informações que subsidiam estratégias de manejo (HIGUCHI et al., 2011; MORAES et al., 2017), como a localização das áreas destinadas para a construção de estradas e pátios de estocagem (SIST, 2000) e o mapeamento das árvores matrizes para coleta de sementes (DANTAS et al., 2017).

A quantificação do estoque volumétrico é outra variável essencial para a sustentabilidade do manejo, pois fornece subsídios para a identificação de níveis de produção volumétrica, para que o manejador possa desenvolver estratégias que causam menos impactos na floresta remanescente (SOUZA; SOARES, 2013) e contribuir para um melhor planejamento tático (SILVA; SILVA; CHICHORRO, 2015). Adicionalmente, a quantificação do estoque está presente na legislação brasileira como um dos requisitos básicos para os planos de manejo florestal (BRASIL, 2006).

Em virtude da alta demanda comercial madeireira e não madeireira da espécie *Carapa guianensis* Aublet (BRAGA et al., 2021; CASTRO et al., 2021; COSTA; MORAIS, 2013), ações que envolvam seu manejo são essenciais para a manutenção de sua população, especialmente na Floresta Nacional do Tapajós, considerada uma unidade de conservação de uso sustentável (BRASIL, 2000), com grande representatividade de árvores desta espécie (COSTA et al., 2019; REIS et al., 2010; SILVA; CARVALHO; LOPES, 1985).

Esta é uma espécie de uso múltiplo, cujo óleo extraído de suas sementes é bastante utilizado na indústria de cosméticos e na medicina popular da região Norte do Brasil (FERRAZ; CAMARGO; SAMPAIO, 2002; HAMMER; JOHNS, 1993; LOUREIRO; SILVA; ALENCAR, 1979). A madeira, de excelente qualidade, é considerada nobre e moderadamente pesada, fácil de trabalhar, muito procurada para fabricação de móveis e construção civil (FERRAZ; CAMARGO; SAMPAIO, 2003), além de ser resistente ao ataque de insetos e moluscos xilofágicos (turus) e tem alta demanda para exportação (SHANLEY; LONDRES, 2011).

Portanto, para este estudo, as seguintes hipóteses foram formuladas: (1) para a distribuição espacial, a hipótese é de que o padrão espacial da referida espécie é agregado

em todas as classes de tamanho, possibilitando ações de tratamentos silviculturais nas árvores em classes menores de diâmetro e efetivo planejamento tático e operacional da exploração de árvores com maiores diâmetros.

Além disso, outra hipótese testada é que (2) a densidade de Kernel é uma ferramenta de distribuição espacial visual eficaz para subsidiar ações pontuais de silvicultura e manejo para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós.

Com isso, o objetivo deste estudo foi caracterizar os parâmetros ecológicos de árvores de *Carapa guianensis*, a fim de que essas informações possam subsidiar seu manejo madeireiro na Floresta Nacional do Tapajós.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Floresta Nacional do Tapajós (FNT). A FNT é uma Unidade de Conservação de Uso Sustentável dos recursos florestais e de utilização para pesquisa científica. Foi criada em 19 de fevereiro de 1974, por meio do Decreto nº 73684, originalmente com 600 mil ha, porém, teve seus limites alterados por meio da Lei nº 12678 de 25 de junho de 2012 e atualmente possui 527.319 ha (SANTOS, 2019).

A FNT está localizada no estado do Pará, entre os paralelos de 2° 45' e 4° 10' de latitude sul e entre os meridianos de 54° 45' e 55° 30' de longitude oeste. Limita-se ao norte e a leste pela rodovia federal BR-163 (Cuiabá-Santarém); ao sul com a rodovia Transamazônica e rios Cupari e Cuparaitinga; e a oeste, com o rio Tapajós (ESPÍRITO-SANTO et al., 2005).

Grande parte de seu território é classificado como Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2012), com solos dos tipos latossolos, argissolos e neossolos arenosos, apresentando topografia que varia de suavemente ondulada a ondulada. O clima da região é quente e úmido (Am na classificação de Köppen), com precipitação média anual de 2000 mm, além de uma estação seca (agosto a novembro) e temperatura média anual de 25°C (ICMBIO, 2019).

Desde 2005, o manejo florestal em parte da Flona é administrado pela Cooperativa Mista da Floresta Nacional do Tapajós (COOMFLONA), que detém a concessão para exploração comercial de madeira da FNT, por meio do Manejo Florestal Comunitário (MFC), garantindo alternativa de renda aos moradores e apoio financeiro às comunidades da FNT, por seu viés socioeconômico (ANDRADE et al., 2022).

Coleta de dados

Os dados são provenientes do inventário 100% (pré-exploratório) das espécies de interesse comercial das Unidades de Produção Anual (UPAs) 1, 4, 9, 10, 11, 12 e 13 (Figura 1) em áreas de florestas manejadas pela COOMFLONA na FNT. Os inventários 100% são requisitos para o manejo da Floresta Amazônica brasileira com fins madeireiros (BRASIL, 2006), levantando, um ano antes da exploração, o potencial produtivo da floresta, seja este relacionado às espécies madeireiras ou às que produzem produtos não madeireiros (ESPADA et al., 2013).

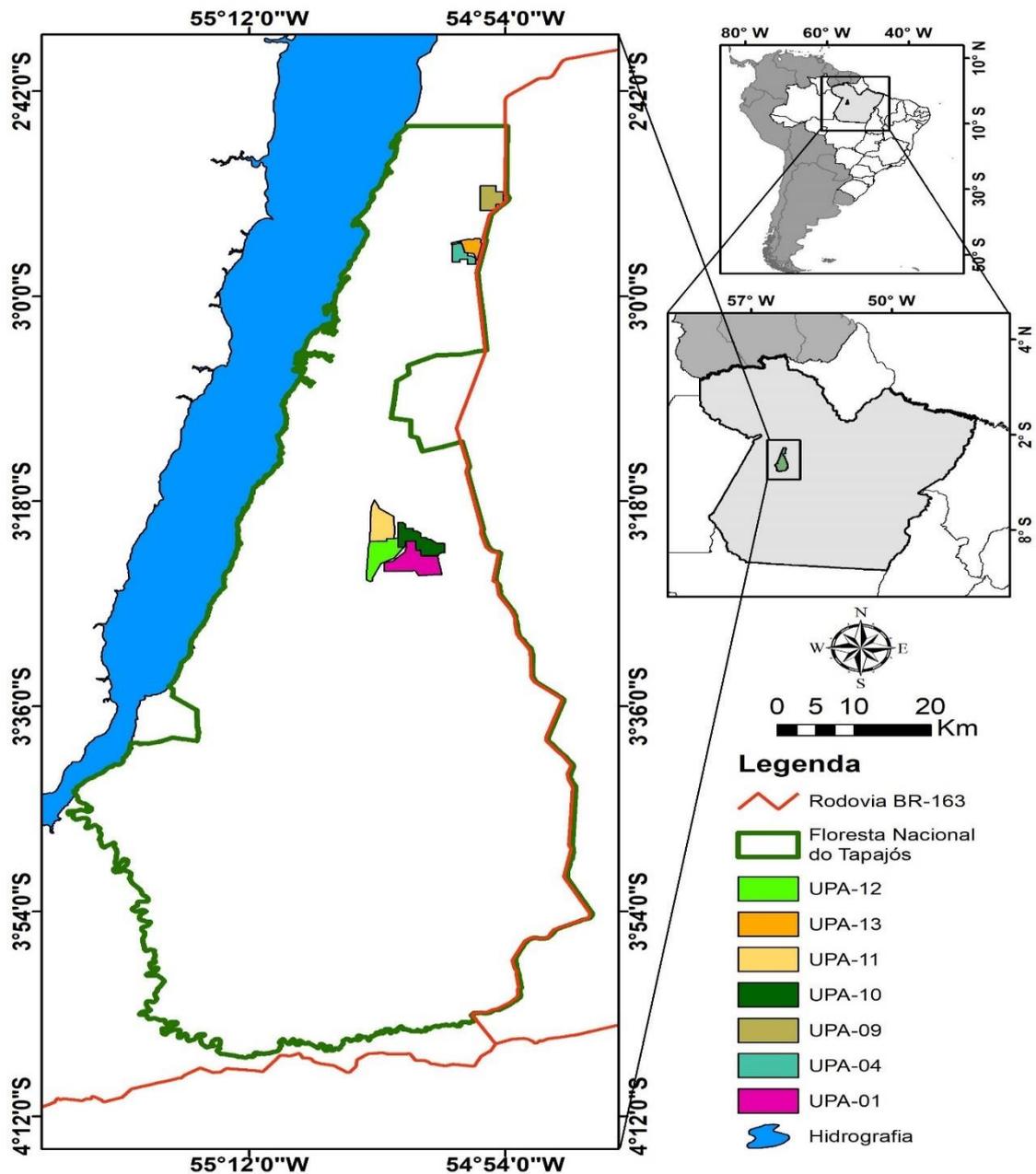


Figura 1. Disposição das Unidades de Produção Anual (UPAs) 1, 4, 9, 10, 11, 12 e 13 na Floresta Nacional do Tapajós.

As UPAs foram divididas em subáreas, denominadas de Unidades de Trabalho (UTs), a fim de promover a operacionalização das atividades pré-exploratórias e exploratórias do estoque madeireiro. Assim, o número de UTs, seu tamanho, a área de efetivo manejo e o ano da coleta dos dados (inventário 100%) variaram de acordo com cada UPA (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização das Unidades de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós.

UPA	AT (ha)	AEM (ha)	Quantidade de UTs	Ano do inventário	QEI	QAI	QAI de <i>C. guianensis</i>
1	2219	1750	28	2019	106	27624	116
4	693	680	9	2009	99	34306	3231
9	984	968	10	2014	99	35622	790
10	1552	1529	16	2015	103	30732	1397
11	1590	1485	15	2016	97	25293	44
12	1723	1437	15	2017	100	20561	138
13	612	504	10	2018	86	915	737

Em que: AT: área total em hectares; AEM: área de efetivo manejo em hectares; UTs: unidades de trabalho; QEI: quantidade de espécies inventariadas; QAI: quantidade de árvores inventariadas.

As demais UPAs não foram inseridas nesta pesquisa por terem sido (posteriormente à exploração seletiva de madeira) reconhecidas como território indígena, pelo Ministério da Justiça em 11 de maio de 2016 e retiradas do plano de manejo. Portanto, não há informações sobre a estrutura e a dinâmica da população de *Carapa guianensis* nestas UPAs após a exploração.

Em todas as UPAs, o nível de inclusão aplicado para que as árvores *Carapa guianensis* fossem incluídas no inventário foi considerar todas as árvores da espécie com DAP (diâmetro à altura do peito) ≥ 20 cm. As variáveis coletadas foram: diâmetro à altura do peito (DAP) e qualidade de fuste (QF), sendo classificado em 1 e 2 (fuste comercial com respectivamente 100 e 75% de aproveitamento) e 3 (fuste não comercial, com aproveitamento inferior a 50%). Além disso, todas as árvores inventariadas receberam plaquetas de alumínio com numeração individual, acrescida da numeração da UPA e da UT.

Nas UPAs 4, 9, 10 e 11, a localização das árvores foi estimada visualmente em coordenadas locais (x, y) a partir das trilhas de orientação do inventário, equidistantes 50 m. As trilhas foram abertas e percorridas no sentido leste-oeste, possuem largura entre 0,5 m e 0,7 m e placas informando a distância percorrida a cada 50 m. A equipe localizou

a árvore e estimou a distância até a trilha mais próxima e a distância percorrida na trilha, a partir de relações entre os membros da equipe. Assim, as coordenadas locais foram transformadas em coordenadas geográficas, a partir de pontos de coordenadas geográficas identificadas nos cantos de cada UT.

Nas UPAs 1, 12 e 13, as árvores tiveram suas coordenadas geográficas coletadas com o uso de receptores GPS (*Global Positioning System*) e as trilhas de orientação do inventário foram criadas virtualmente, a cada 40 m de distância entre si, para ajudar no caminhamento da equipe.

Estrutura populacional e distribuição diamétrica

Os parâmetros estruturais da população de árvores de *Carapa guianensis*, densidade, frequência e dominância absoluta, foram calculados para cada UPA (MUELLER-DOMBOIS; ELLENBERG, 1974). A densidade é o número de árvores por hectare; a frequência infere sobre a distribuição da espécie na área; e a dominância expressa o grau de ocupação da área da floresta pelo tronco das árvores da espécie (SOUZA; SOARES, 2013). Essas informações são importantes para entender a estrutura e o comportamento da espécie na floresta, pois servem de base para as prospecções de sua conservação.

Para o cálculo da frequência, neste estudo, como se trata de dados de inventário 100%, cada UT foi considerada como uma unidade de amostra em que as árvores ocorreram.

Para a distribuição diamétrica, as árvores foram agrupadas em classes de diâmetro com amplitude de 10 cm e com limite de classe de até 80 cm de DAP, sendo incluídas nesta última classe, todas as árvores acima desse DAP.

O volume foi calculado com base na equação ajustada para cada UPA, conforme consta nos seus respectivos Planos Operacionais Anuais (POAs), com exceção da UPA 4, que, por ser uma das primeiras a ser explorada pela cooperativa, não constava a informação do ajuste da equação e por isso foi utilizada a equação ajustada da UPA 13, por ser uma área próxima da UPA 4 (Tabela 2).

Tabela 2. Equações de volume ajustadas para cada Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós.

UPA	Equação
1	$Vc/c = \text{EXP} (-8,376017145 + 1,753912947 * \text{Ln} (\text{DAP}) + 0,848599699 * \text{Ln} (\text{Hc}))$
4	$Vc/c = \text{EXP} (-8,376017145 + 1,753912947 * \text{Ln} (\text{DAP}) + 0,848599699 * \text{Ln} (\text{Hc}))$
9	$Vc/c = 8,9525703778108 + 1,88437411839699 * \text{Ln} (\text{DAP}) + 0,807002832127167 * \text{Ln} (\text{Hc})$
10	$Vc/c = 8,9525703778108 + 1,88437411839699 * \text{Ln} (\text{DAP}) + 0,807002832127167 * \text{Ln} (\text{Hc})$
11	$Vc/c = \text{EXP} (-8,403336924 + 1,744975054 * \text{Ln} (\text{DAP}) + 0,856823471 * \text{Ln} (\text{Hc}))$
12	$Vc/c = \text{EXP} (-8,376017145 + 1,753912947 * \text{Ln} (\text{DAP}) + 0,848599699 * \text{Ln} (\text{Hc}))$
13	$Vc/c = \text{EXP} (-8,376017145 + 1,753912947 * \text{Ln} (\text{DAP}) + 0,848599699 * \text{Ln} (\text{Hc}))$

Em que: Vc/c: volume comercial com casca (m³); Ln: logaritmo natural; DAP: diâmetro à altura do peito (cm); Hc: altura comercial (m).

Distribuição espacial

O padrão de distribuição espacial foi determinado pelo método K de Ripley, em que um círculo de raio *s* é centrado em cada ponto (árvore) e o número de árvores vizinhas dentro do círculo é contado (RIPLEY, 1977).

O raio *s* foi de 5 m até uma distância máxima, dependendo do tamanho da área de cada UPA, pois recomenda-se que a distância máxima utilizada no K de Ripley seja metade do eixo da área (DIGGLE, 2013), que neste estudo variou de 1500 m a 3680 m. Dessa forma, foi possível detectar o padrão espacial da espécie em diferentes escalas de distância. Esta flexibilidade em relação à escala de distâncias é o que difere substancialmente a função K de outros métodos de distribuição espacial (DE LA CRUZ et al., 2008).

O padrão de distribuição de K de Ripley foi analisado tanto para a população das árvores de *Carapa guianensis*, quanto por classe de DAP. Neste capítulo, foram utilizadas três classes de diâmetro: classe I – considerando árvores remanescentes com DAP de 20,0 cm a 49,9 cm, classe II – considerando árvores para a produção não-madeireira com DAP de 50,0 cm a 79,9 cm, e classe III – considerando árvores senescentes com DAP igual ou acima de 80,0 cm.

As árvores com DAP ≥ 80 cm foram consideradas como potencialmente em fase inicial de estagnação ou início de senescência, uma vez que a maior parte das espécies

arbóreas da Floresta Amazônica não produz incremento líquido nos diâmetros a partir de 70-80 cm (MUÑOZ BRAZ et al., 2012). Além disso, há um declínio na produção de frutos de *Carapa guianensis* a partir de 70 cm de DAP, indicando senescência (TONINI, 2017) e, neste estudo, deixou-se um intervalo de 10 cm de DAP para indicar senescência, ou seja, a partir da classe de 80 cm.

Nas árvores que se encontravam próximas às bordas das UPAs, a correção isotrópica de bordadura foi empregada (Equação 1), para que essas árvores não fossem interpretadas como se não tivessem vizinhas. As vizinhas existiam, mas por estarem fora dos limites das áreas das UPAs não seriam computadas. Portanto, o número de árvores vizinhas próximo aos limites do mapa seria mais baixo do que para as demais, ocasionando um viés no cálculo do estimador da função $K(s)$ (RIPLEY, 1977; VIEIRA et al., 2021).

$$(1) \quad \hat{K}(s) = \frac{1}{\hat{\lambda}n} \sum_i^n = \sum_j^n = 1 W_I^{-1}(X_i, X_j) I(\|X_i - X_j\| < s)$$

Em que:

- n é o número de árvores na região de estudo; X_i e X_j são as coordenadas dos pontos do mapa;
- $\|X_i - X_j\|$ é a distância euclidiana entre as localizações X_i e X_j ;
- s é um vetor arbitrário de distâncias;
- $\hat{\lambda} = n / |A|$ é o número de árvores dividido pela área da região de estudos, sendo um estimador não viciado da intensidade do processo;
- $W_I^{-1}(X_i, X_j)$ é a função de correção isotrópica de bordadura, a qual representa a proporção da circunferência com centro em X_i e com raio $\|X_i - X_j\|$ que está fora da região de estudo;
- $I(U)$ é uma função indicadora que assume o valor 1 (um) sempre que a condição U for verdadeira, e zero quando a condição for falsa.

Dessa forma, a correção isotrópica de bordadura estima os pontos próximos da borda com um peso proporcional para a porção do círculo que está dentro do limite da área de estudo. Por exemplo, se apenas metade do círculo cair na região de estudo, a função K conta efetivamente dois pontos para cada ponto encontrado no círculo incompleto (WIEGAND; MOLONEY, 2014).

Para a função K de Ripley univariada, a hipótese nula é a de Completa Aleatoriedade Espacial (CAE), ou seja, o processo que gera o padrão é aleatório em qualquer escala (RIPLEY, 1977). Por isso, a CAE foi testada por meio de 500 simulações

(m) de Monte Carlo, com 99% de probabilidade $((1 / (1 + m)) \times 100\%)$ e os diferentes valores de K foram determinados para formar os envelopes de confiança, usando os maiores e menores valores da função K para cada simulação e para cada escala de distâncias.

Para facilitar a visualização e interpretação dos resultados, a função K foi transformada para $L(s)$ (Equação 2), com os valores distribuídos graficamente, em que os eixos das abscissas representam as distâncias s e os eixos das ordenadas representam os valores transformados da função K (RIPLEY, 1979).

$$(2) \quad \hat{L}(s) = \frac{\sqrt{\hat{K}(s)}}{\pi} - s$$

Para a interpretação gráfica dos resultados, se os valores observados estiverem dentro dos envelopes de confiança, que oscilam em torno de zero da transformada $L(s)$, é possível dizer que o padrão espacial é aleatório, aceitando-se H_0 , hipótese de CAE. Entretanto, se os valores forem positivos, o padrão é agregado e se os valores forem negativos, o padrão é regular. Para os dois últimos casos, a hipótese nula é rejeitada (RIPLEY, 1977).

Em alguns casos, quando o conjunto de dados contém menos de 70 árvores, a função K de Ripley não é recomendada, pois um número menor que este causa grande variação no estimador dos cálculos da função, dificultando a análise (WIEGAND; MOLONEY, 2014).

O processamento de dados foi realizado utilizando o *software* R (R CORE TEAM, 2023), por meio da plataforma *R Studio* e com o auxílio do pacote *Splancs* (ROWLINGSON; DIGGLE, 1993).

Para melhor visualização e interpretação dos resultados, a densidade, tanto para a população de todas as árvores de *Carapa guianensis*, quanto por classe de diâmetro, além da volumetria, foram representadas em mapas de calor, utilizando um estimador de densidade de Kernel e levando em consideração as coordenadas geográficas das árvores.

A densidade de Kernel estima um círculo ao redor de cada ponto da amostra, correspondendo ao raio de influência, aplicando uma função estatística de Kernel de 1 para a posição do ponto, até 0, no limite do raio de atuação. A densidade de cada célula é a soma dos valores das superfícies de Kernel sobrepostos para cada ponto do dado de entrada e divididos pela área de atuação do raio de influência (SILVERMAN, 1986).

O raio utilizado na análise é de preenchimento opcional. Portanto, foram gerados valores automaticamente (quando o campo é deixado em branco) para gerar os mapas de calor, considerando três classes de densidade de Kernel: alta, média e baixa.

O produto gerado é uma imagem com a estimativa da intensidade, cuja análise é feita de forma subjetiva, porém com a maior facilidade de identificar padrões do que a simples visualização de um padrão pontual (POTTKER, 2012), em que os valores dos *pixels* são a densidade e o volume estimados de árvores, revelando as regiões de *cluster* em cada UPA.

O objetivo com a densidade de Kernel é a verificação de como a intensidade varia em toda a área de estudo, isto é, conferindo uma estimativa da densidade de probabilidade univariada a partir das observações (BAILEY; GATRELL, 1995).

Portanto, espera-se que esta análise possa ser útil para identificar áreas mais produtivas em termos volumétricos e com maior densidade de árvores, para que, dessa forma, possa subsidiar ações de manejo de forma pontual, levando em consideração os níveis de adensamento das árvores de *Carapa guianensis* em cada UPA. O processamento de dados foi realizado no *software ArcGis 10.8*.

Resultados

Estrutura populacional, volumetria e distribuição diamétrica

Foram inventariadas 6453 árvores de *Carapa guianensis*, com o número de árvores por hectare (DA) variando entre 0,5 e 38,2 em cada UPA. Os maiores valores de volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) foram encontrados nas UPAs 4, 9 e 10, com $284,92 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, $157,07 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ e $59,79 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, respectivamente; as UPAs 1 e 11, por sua vez, foram as que tiveram os menores valores de volume, com $3,95 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ e $1,65 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Estrutura horizontal e volumetria de *Carapa guianensis* ($\text{DAP} \geq 20 \text{ cm}$) na Floresta Nacional do Tapajós.

UPA	DA ($\text{n}.\text{ha}^{-1}$)	FA	DoA ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$)	V ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$)
1	1,2	17,9	0,37	3,95
4	38,2	88,9	6,89	59,79
9	8,5	56,2	2,21	157,07
10	15,3	81,2	4,16	284,92
11	0,5	46,7	0,15	1,65
12	1,1	26,7	0,28	37,25
13	17,2	80,0	4,08	41,62

Em que: UPA: Unidade de Produção Anual; DA: densidade absoluta ($\text{n}.\text{ha}^{-1}$); FA: frequência absoluta; DoA: dominância absoluta ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$); V: volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$).

A distribuição diamétrica apresentou o padrão preferencialmente unimodal, com baixa densidade nas menores classes, aumentando nas classes intermediárias e decrescendo nas classes maiores, com curva exponencial negativa somente a partir das seguintes classes: 45 cm para as UPAs 4 e 13; e 55 cm para as demais UPAs (Figura 2).

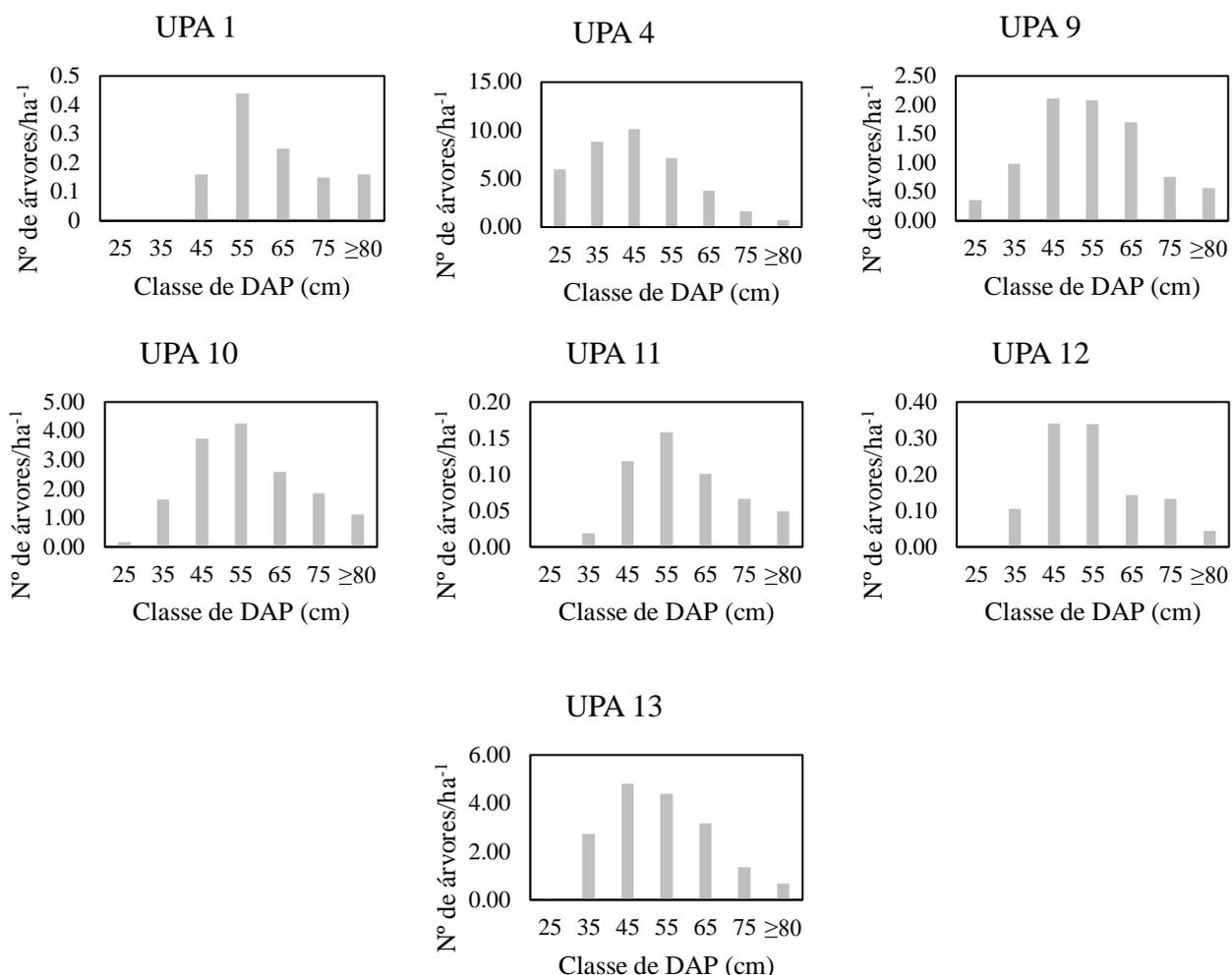


Figura 2. Distribuição diamétrica de densidade de árvores de *Carapa guianensis* (DAP ≥ 20 cm) por Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós.

Distribuição espacial de *Carapa guianensis* na FNT

O padrão de distribuição espacial para a população de *Carapa guianensis* foi predominante agregado para todas as UPAs. O padrão foi agregado para todas as escalas de distâncias nas UPAs 4, 9, 10 e 12; na UPA 1, o padrão foi agregado até aproximadamente 3200 m, mudando para aleatório em seguida; na UPA 11, foi aleatório

somente nos primeiros 5 m, depois seguiu o padrão agregado; enquanto que na UPA 13 variou de agregado (até 1200 m) a regular (a partir de 1500 m) (Figura 3).

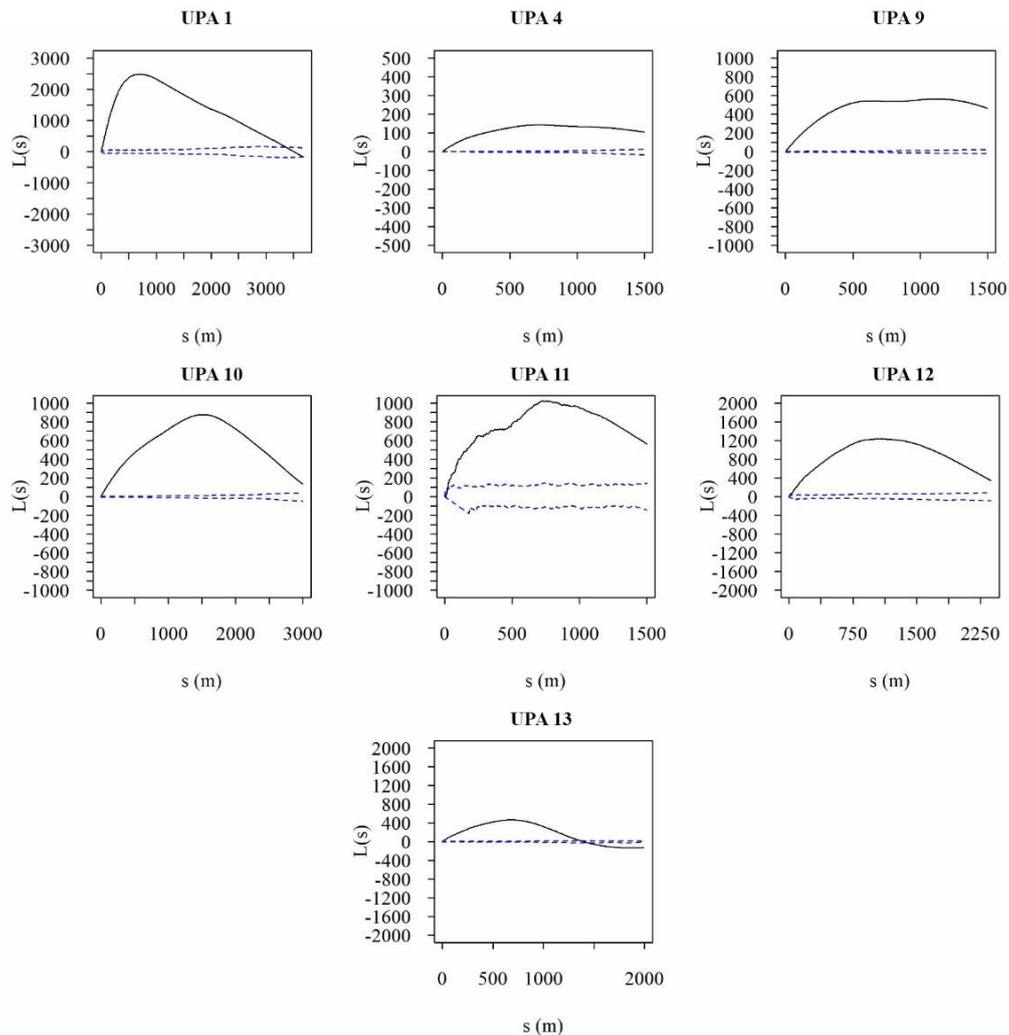


Figura 3. Resultado da função K de Ripley univariada e distribuição espacial de árvores de *Carapa guianensis* com DAP ≥ 20 cm por Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós.

Distribuição espacial de *Carapa guianensis* por classe de diâmetro

O número de árvores em cada classe de DAP por UPA variou de 4 a 2098. Algumas classes não fizeram parte da análise por possuírem menos de 70 árvores exigidos para a aplicação do método K de Ripley. São elas: classe I das UPAs 1, 11 e 12, por possuírem 16, 11 e 58 árvores, respectivamente; classe II da UPA 11, por possuir apenas 29 árvores; e classe III das UPAs 1, 4, 9, 11, 12 e 13, por possuírem respectivamente 16, 57, 51, 4, 5, e 27 árvores, respectivamente.

Avaliando a distribuição espacial por classe diamétrica, observa-se que o padrão agregado foi predominante entre as classes diamétricas avaliadas (Figura 4).

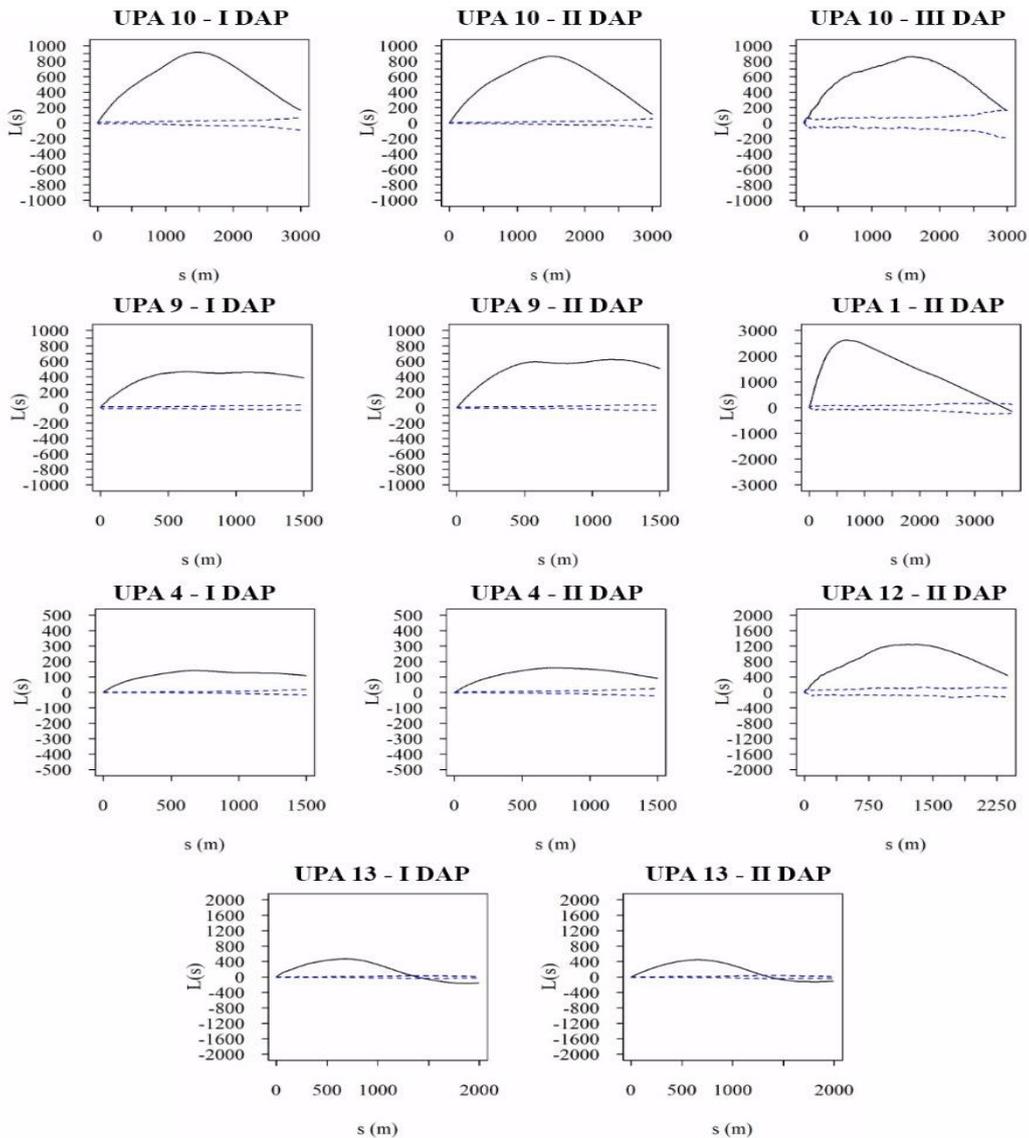


Figura 4. Padrão espacial utilizando a função K de Ripley univariada de *Carapa guianensis* das Unidades de Produção Anual 1, 4, 9, 10, 12 e 13 por classe de DAP I (20,0 cm a 49,9 cm), II - (50,0 cm a 79,9 cm) e III - (igual ou acima de 80,0 cm) na Floresta Nacional do Tapajós.

Mapeamento da estrutura populacional de *Carapa guianensis*

A distribuição espacial da densidade ($n \cdot ha^{-1}$) para a população (Figura 5) e por classe de DAP (Figura 6) e do volume para a população (Figura 7) e por classe de DAP (Figura 8) das árvores de *Carapa guianensis* evidenciam diferenças estruturais em cada UPA.

Levando em consideração os mapas de densidade de Kernel com a densidade das árvores e a localização das UPAs, nota-se que as UPAs 4 e 13, que são áreas contíguas, apresentam maior concentração de árvores e de volume de *Carapa guianensis* no sudoeste e noroeste (UPA 13) e no centro-leste (UPA 4), formando agregado de árvores em um local específico; o mesmo acontece com as UPAs 11 e 12, apresentando maior densidade à nordeste da UPA 12 e à sudeste da UPA 11, formando grande agregado; o mesmo comportamento se repetiu à sudeste da UPA 10 e à nordeste da UPA 1.

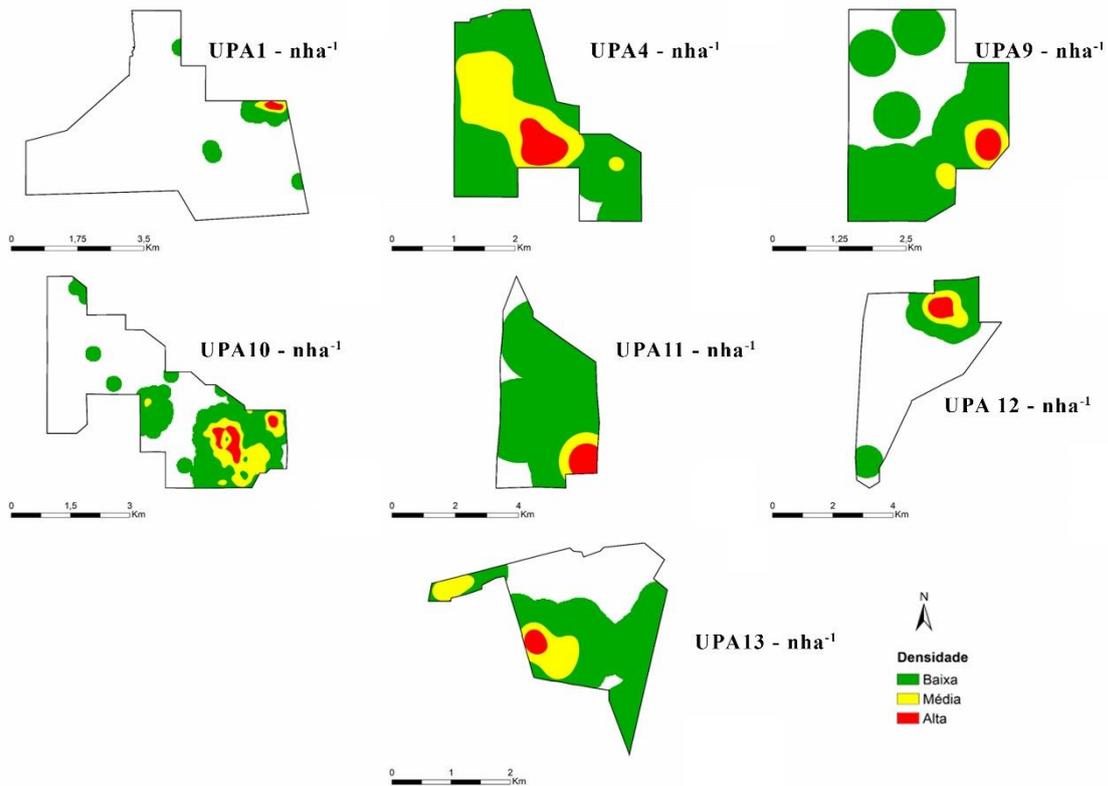


Figura 5. Distribuição espacial da densidade (n.ha⁻¹) de árvores de *Carapa guianensis* (DAP \geq 20 cm) por Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós. Em que: alta = entre 0,0273 e 0,0372 árv.ha⁻¹; média = entre 0,0174 e 0,0272 árv.ha⁻¹; baixa = entre 0,0075 e 0,0173 árv.ha⁻¹.

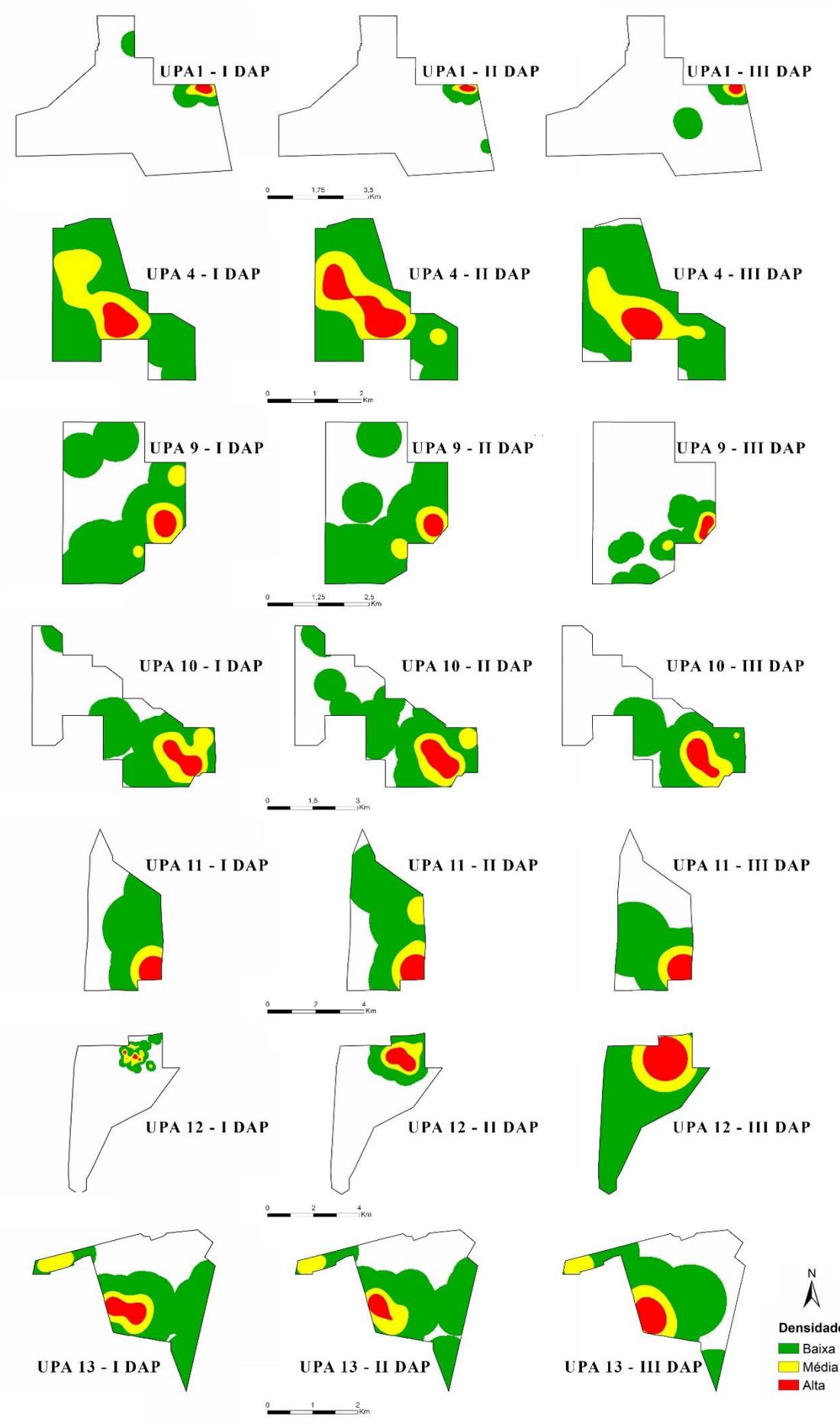


Figura 6. Distribuição espacial da densidade ($n.ha^{-1}$) de árvores de *Carapa guianensis* das Unidades de Produção Anual 1, 4, 9, 10, 11, 12 e 13 por classe de DAP I – (20,0 cm a 49,9 cm), II - (50,0 cm a 79,9 cm) e III - (igual ou acima de 80,0 cm) na Floresta Nacional do Tapajós. Em que: classe de DAP I (alta = entre 0,0346 e 0,0372 $árv.ha^{-1}$; média = entre 0,0101 e 0,0345 $árv.ha^{-1}$; baixa = entre 0,0075 e 0,0100 $árv.ha^{-1}$); classe de DAP II (alta = entre 0,0014 e 0,0029 $árv.ha^{-1}$; média = entre 0,00063 e 0,0013 $árv.ha^{-1}$); baixa = entre 0,0002 e 0,0005 $árv.ha^{-1}$); classe de DAP III (alta = entre 0,0083 e 0,0151 $árv.ha^{-1}$; média = entre 0,0036 e 0,0082 $árv.ha^{-1}$; baixa = entre 0,0003 e 0,0035 $árv.ha^{-1}$).

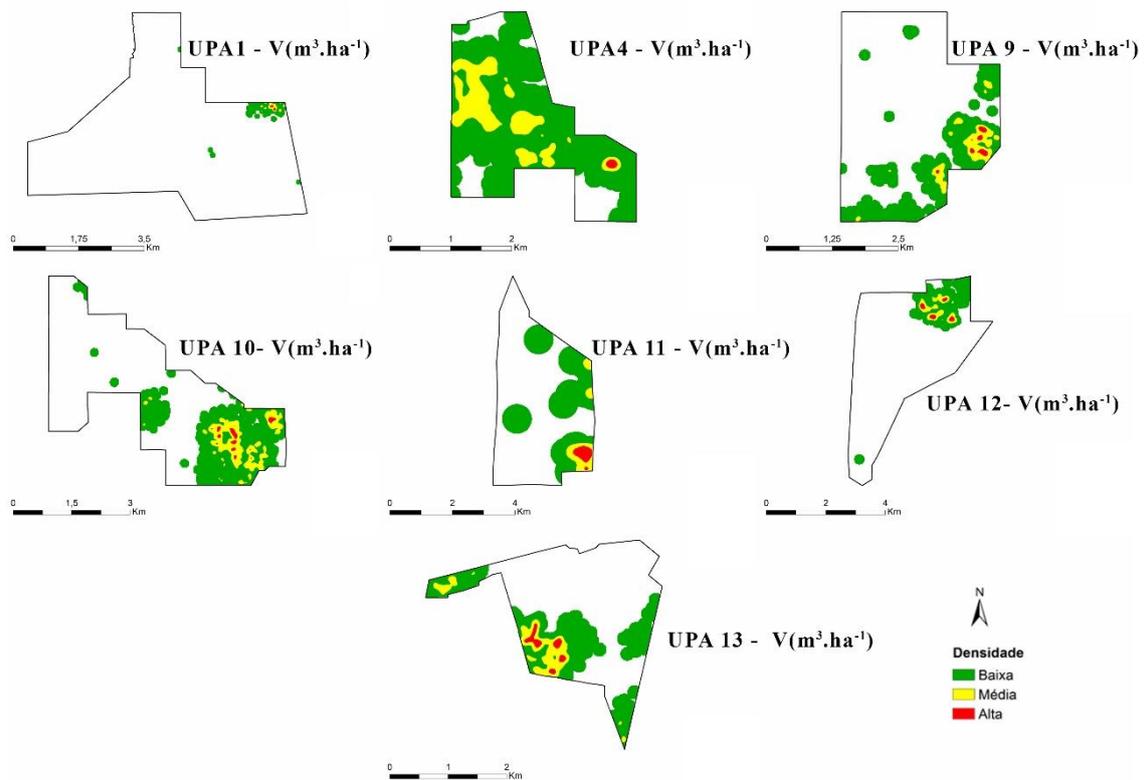


Figura 7. Distribuição espacial do volume ($m^3.ha^{-1}$) de árvores de *Carapa guianensis* ($DAP \geq 20$ cm) por Unidade de Produção Anual na Floresta Nacional do Tapajós. Em que: alta = entre 0,4714 e 0,7062 $m^3.ha^{-1}$; média = entre 0,2366 e 0,4713 $m^3.ha^{-1}$; baixa = 0,0018 e 0,2365 $m^3.ha^{-1}$.

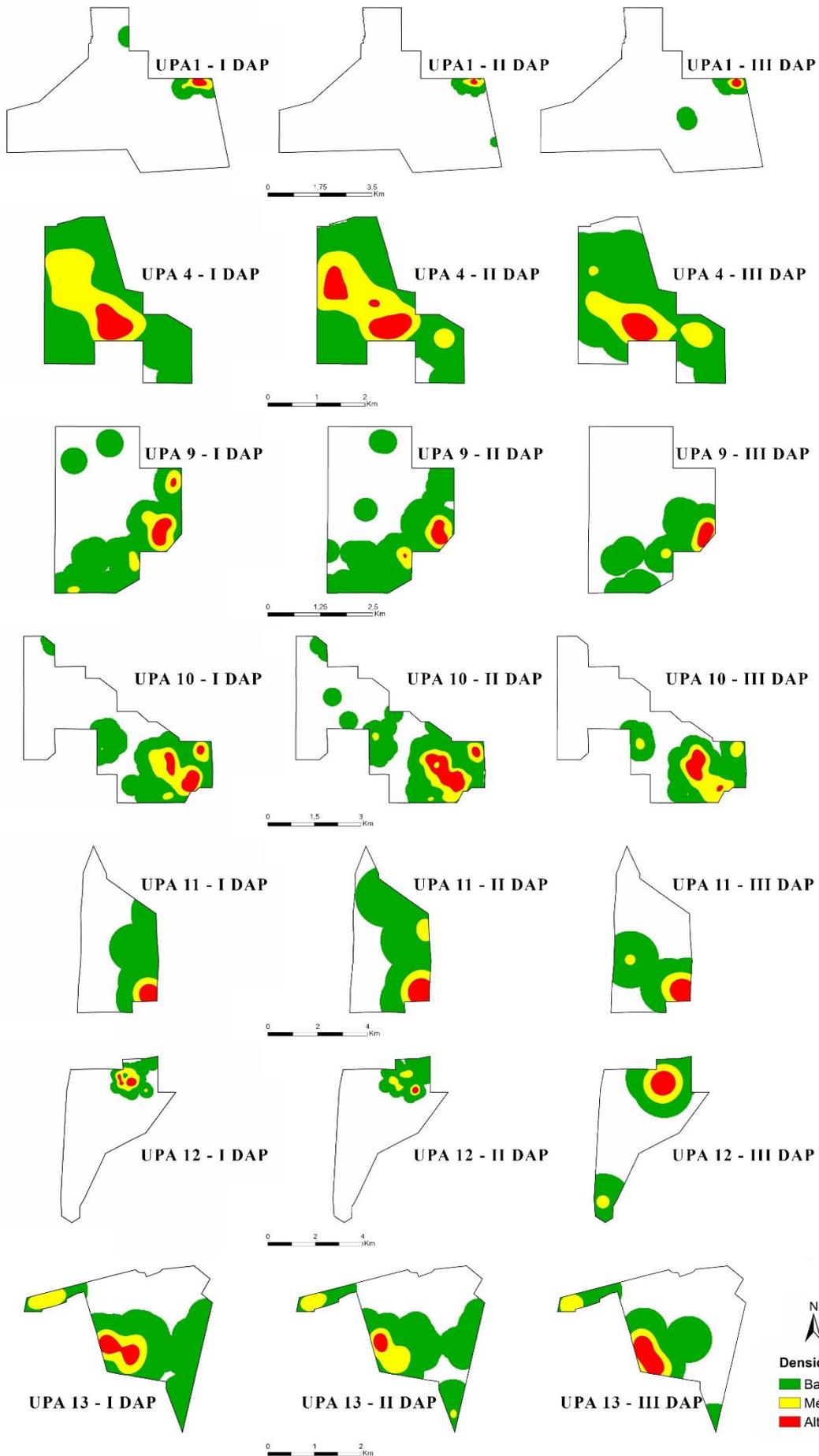


Figura 8. Distribuição espacial do volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) de árvores de *Carapa guianensis* ($\text{DAP} \geq 20$ cm) das Unidades de Produção Anual 1, 4, 9, 10, 11, 12 e 13 por classe de DAP I – (20,0 cm a 49,9 cm), II - (50,0 cm a 79,9 cm) e III - (igual ou acima de 80,0 cm) na Floresta Nacional do Tapajós. Em que: classe de DAP I (alta = entre 0,9196 e 1,3602 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; média = entre 0,4790 e 0,9195 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; baixa = entre 0,0384 e 0,4789 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$); classe de DAP II (alta = entre 1,8881 e 2,8011 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; média = entre 0,9752 e 1,8880 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$); baixa = entre 0,0623 e 0,9751 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; classe de DAP III (alta = entre 0,1350 e 0,1866 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; média = entre 0,0835 e 0,1349 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; baixa = entre 0,0319 e 0,0834 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

Discussão

Estrutura diamétrica e populacional

O padrão de distribuição diamétrica encontrado neste estudo pode ser atribuído ao fato de a vegetação estudada ter sido avaliada no inventário 100%, ou seja, na fase pré-exploratória, com a floresta madura e com pouca quantidade de luz atingindo o sub-bosque. Considerando que a *C. guianensis* é uma espécie que se desenvolve bem a pleno sol (MACIEL et al., 2003), devido às suas altas taxas fotossintéticas (AZEVEDO, 2014), ações de manejo florestal podem favorecer a regeneração de plantas desta espécie, pois proporcionam aumento gradual da radiação solar na área (AGUIAR et al., 2019).

Espécies com relativamente poucas árvores nas classes menores e maior concentração nas classes intermediárias ou maiores provavelmente tiveram mais árvores menores no passado (FELFILI, 1997). Possivelmente, as atuais árvores adultas se estabeleceram na floresta em um período passado, quando grandes clareiras foram mais frequentes (FELFILI, 1997). Isto reforça a ideia de que a atual estrutura e composição florística da comunidade arbórea na Amazônia é resultante de uma longa história de domesticação de plantas (CLEMENT et al., 2015; LEVIS et al., 2017).

Por isso, a atual escassez de plantas juvenis pode ser devido ao fornecimento insuficiente de luz para permitir a mesma taxa de estabelecimento. É por isso que algumas espécies podem necessitar de um período mais longo para se regenerarem (FELFILI, 1997).

Na Floresta Nacional do Tapajós, dois estudos mostraram resultados semelhantes: VIEIRA et al. (2018) observaram o mesmo padrão de distribuição diamétrica para árvores de *Carapa guianensis* ($\text{DAP} \geq 25$ cm), porém, em uma área muito menor (100 ha); e, no outro, VIEIRA et al. (2014), com dados de um inventário de prospecção de 200 ha,

verificaram ausência de andirobeiras nas classes de diâmetro de 15 a 35 cm. Este é padrão típico de espécies demandantes de luz.

Associado ao comportamento ecológico da espécie, a alta predação das sementes por roedores ou invertebrados, pode estar afetando a probabilidade de uma semente germinar e originar uma plântula (CASTILHO; TONINI; SOUZA, 2011). Além disso, as larvas de insetos do gênero *Hypsipyla* atacam as sementes de *Carapa guianensis*, formando galerias e danificando-as (FERRAZ; CAMARGO; SAMPAIO, 2002; PINTO et al., 2013), com relatos de ocorrência, inclusive, em condições naturais (DE JESUS-BARROS et al., 2015), prejudicando a regeneração natural desta espécie.

Outro fator que pode explicar a baixa densidade das árvores mais jovens é a coleta de sementes de *Carapa guianensis* na área para manejo não-madeireiro, sendo destinadas 40% das árvores da espécie em cada UPA para este fim, de acordo com os seus respectivos POAs.

Entretanto, a aplicação de técnicas de manejo florestal pode melhorar a regeneração de árvores de *Carapa guianensis* (AGUIAR et al., 2019), uma vez que a área de cada UPA analisada neste estudo já passou por extração madeireira.

Quanto à estrutura populacional, as UPAs 10, 9, 4 e 13 são as que apresentam maior estoque volumétrico e com as maiores densidades de árvores de *Carapa guianensis*, sendo que as 3 últimas estão localizadas muito próximas umas às outras, nos kms 67 e 72, indicando que esta área possui condições favoráveis para o desenvolvimento da espécie, em comparação com as outras UPAs localizadas no km 117.

Além disso, a densidade de árvores nessas UPAs é mais alta que em outros estudos realizados em áreas de terra firme na Amazônia (CLOUTIER et al., 2007; GOMES, 2010; GONÇALVES; SANTOS, 2008; MARTINS et al., 2012), comprovando o potencial de abundância desta espécie nestas UPAs da Floresta Nacional do Tapajós.

Por ser uma espécie de uso múltiplo e pelo manejo não-madeireiro estar atualmente sendo executado na Floresta Nacional do Tapajós, uma estratégia é conciliar as recomendações de manejo madeireiro com o não-madeireiro, por meio da quantificação da produção de frutos por árvore. Isto favoreceria a coleta de sementes e recomposição da regeneração natural dessas árvores, e as senescentes, com pouca ou nenhuma produção de sementes, poderiam ser selecionadas para corte.

Portanto, planejar o manejo madeireiro para atingir árvores com baixo índice de produção de sementes é uma forma de minimizar o impacto da colheita de madeira na densidade da espécie (KLIMAS; KAINER; WADT, 2012).

Além disso, uma vantagem do manejo de uso múltiplo é que combinar a extração de PFNMs (Produtos Florestais Não Madeireiros) com madeira para *Carapa guianensis* pode também fornecer renda contínua, enquanto as florestas recuperam volume entre colheitas de madeira (KLIMAS; KAINER; WADT, 2012).

Adicionalmente, do ponto de vista genético, a diversidade genética neutra, o nível de endogamia e o fluxo gênico não mudam de forma mensurável após a exploração seletiva das árvores desta espécie, sugerindo que sua polinização ocorra de maneira adequada após a colheita (CLOUTIER et al., 2007).

Distribuição espacial

As árvores de *Carapa guianensis* apresentaram padrão predominantemente agregado na distribuição espacial na Floresta Nacional do Tapajós, em todas as classes de diâmetro avaliadas neste estudo. Para as árvores das classes diamétricas maiores, do ponto de vista do manejo por espécie e pelo fato das árvores estarem mais próximas, o padrão de distribuição espacial agregado contribui para a adoção de práticas de manejo florestal, pois as atividades de colheita são mais facilitadas (KLIMAS; KAINER; WADT, 2007; MORAES et al., 2017). Ademais, por ser uma espécie de uso múltiplo, o extrativismo de PFNM é favorecido quando as árvores estão agrupadas, devido à facilidade logística para a coleta dos frutos (KLIMAS; KAINER; WADT, 2007).

Nas classes diamétricas inferiores, o padrão de distribuição agregado também facilita a aplicação de tratamentos silviculturais, com o objetivo de favorecer a regeneração de espécies. Clareiras abertas pela exploração madeireira legal e tratamentos silviculturais aumentam a quantidade de luz que chega na floresta e favorece o crescimento de árvores entre 5-45 cm de DAP na Floresta Nacional do Tapajós (CASTRO et al., 2021).

Esses tratamentos, tais como desbaste de liberação de copa (PEÑA-CLAROS et al., 2008; VILLEGAS et al., 2009) e plantio de enriquecimento em clareiras de exploração (NEVES et al., 2019; SCHWARTZ et al., 2017), são alternativas promissoras que podem acelerar a recuperação do estoque de volume (PUTZ et al., 2012; VILLEGAS et al., 2009) e aumentar a densidade e as taxas de crescimento da regeneração de espécies comerciais (PEÑA-CLAROS et al., 2008).

Do ponto de vista ecológico, o padrão agregado está associado aos processos de dispersão de sementes do tipo barocórica ou zoocórica (SVENNING, 2001). No primeiro tipo, há desenvolvimento de novos indivíduos próximos aos seus parentais, enquanto que no segundo, os animais podem carregar as sementes para nichos específicos, de maneira

a gerar a agregação em locais específicos (JANZEN, 1970), favorecendo a agregação em ambos os tipos de dispersão, que são encontrados para *Carapa guianensis* (BOUFLEUER, 2004).

Além disso, apesar das sementes de *Carapa guianensis* possuírem maior probabilidade de sobreviver devido às suas maiores reservas, elas ainda não conseguem superar a limitação de dispersão em longas distâncias, o que pode resultar em agregação (KLIMAS; KAINER; WADT, 2007).

Os mapas de densidade de Kernel refletiram os padrões de distribuição espacial, apresentados anteriormente pelo K de Ripley. A diferença é que esses mapas permitiram a espacialização das árvores, de acordo com as variáveis de interesse, subsidiando o planejamento e a execução das ações de manejo e tratamentos silviculturais adequados para a realidade de cada UPA, com maior precisão de localização.

Esta análise indica que, a nível macro, ou seja, levando em consideração todas as UPAs, há a formação de grandes agregados de árvores de *Carapa guianensis*, concentrados em locais específicos, o que reforça o padrão predominantemente agregado descrito pelo K de Ripley, favorecendo a aplicação de um planejamento tático e operacional das atividades de manejo para a espécie.

Na UPA 9, a maior concentração de árvores e de volume ocorre exatamente no sudeste da UPA e às margens da estrada, o que facilitaria o acesso à área de manejo e a execução das técnicas de exploração de impacto reduzido, como a extração e o transporte de madeira, além da aplicação de tratamentos silviculturais e de coleta de sementes para manejo de PFNM.

Os mapas da densidade de Kernel por classe de DAP permitiram fornecer subsídios ao manejador, em termos de planejamento adequados da aplicação das atividades de EIR. Para a UPA 4, por exemplo, onde o manejo foi indicado, no mapa com a classe III de DAP, há a identificação de áreas mais produtivas (em termos volumétricos), onde as atividades de manejo madeireiro podem ser concentradas; na classe II de DAP, mostra onde as atividades de coleta de sementes para o manejo não madeireiro podem ocorrer; na classe I de DAP, pode haver a aplicação de tratamentos silviculturais para o enriquecimento e favorecimento da regeneração natural da espécie na área.

Para as demais UPAs, é necessário que seja realizado um monitoramento do comportamento das árvores remanescentes após o manejo realizado, principalmente no que tange a regeneração natural da espécie, que, apresenta problemas de ingresso nas classes diamétricas menores.

Além disso, é possível que a exploração já realizada, com o desbaste de árvores próximas às áreas onde a densidade de andirobeiras é baixa, possa favorecer a regeneração natural e o crescimento de plantas de *Carapa guianensis*, sendo necessários estudos futuros para esta avaliação.

Nas classes intermediárias, nas quais pode estar havendo maior produção de sementes, as árvores devem ser reservadas como matrizes para regeneração da floresta e como produtoras de sementes, para a coleta e posterior extração do óleo.

Conclusão

O padrão de distribuição espacial de *Carapa guianensis* foi predominantemente agregado, sendo essencial para o planejamento e execução das atividades de colheita madeireira e não-madeireira para um possível futuro manejo da espécie.

Os mapas da densidade de Kernel mostraram-se ser uma ferramenta eficaz na capacidade de fornecer subsídios para o manejador planejar tanto a exploração madeireira de *Carapa guianensis*, levando em consideração as densidades e os estoques volumétricos das árvores, quanto a colheita de frutos para o manejo não-madeireiro, além de intervenções silviculturais nas árvores de classes diamétricas menores.

Entretanto, para aumentar o planejamento do manejo madeireiro desta espécie na Floresta Nacional do Tapajós, deve-se aliar a informação produzida neste estudo com dados de recrutamento, ingresso e mortalidade da espécie, a fim de conhecer sua dinâmica de crescimento e, assim, planejar um manejo adequado à realidade local.

Referências bibliográficas

AGUIAR, S. H. S. et al. Dinâmica da regeneração natural de espécies madeireiras durante três décadas da exploração florestal na Floresta Nacional do Tapajós, Brasil. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 47, n. 121, p. 157–166, 1 mar. 2019.

ANDRADE, D. F. et al. Do Mil ao Milhão: Estudo de Caso do Manejo Florestal Comunitário na Floresta Nacional do Tapajós. **Biodiversidade Brasileira - BioBrasil**, v. 12, n. 5, 1 nov. 2022.

APPANAH, S.; PUTZ, F. E. Climber abundance in virgin dipterocarp forest and the effect of pre-felling climber cutting on logging damage. **The Malaysian Forester**, v. 47, n. 4, p. 335–342, 1984.

AZEVEDO, G. F. DA C. Photosynthetic parameters and growth in seedlings of *Bertholletia excelsa* and *Carapa guianensis* in response to pre-acclimation to full sunlight and mild water stress. **Acta Amazonica**, v. 44, n. 1, p. 67–78, 2014.

- BAILEY, T. J.; GATRELL, A. C. **Interactive spatial data analysis**. Harlow: Longman Scientific and Technical, 1995. v. 1
- BASTOS, M. J. S. M. et al. Spatial distribution and associated flora of *Alcantarea nahoumii*, a vulnerable endemic species to rocky outcrops of the Serra da Jibóia, Bahia, Brazil. **Rodriguesia**, v. 69, n. 2, p. 503–514, 1 abr. 2018.
- BOLKER, B. M. Combining endogenous and exogenous spatial variability in analytical population models. **Theoretical Population Biology**, v. 64, n. 3, p. 255–270, 2003.
- BOUFLEUER, N. T. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E MANEJO DE RECURSOS NATURAIS**. Dissertação de mestrado—Rio Branco: Universidade Federal do Acre, 2004.
- BRAGA, D. P. P. et al. **Árvores do manejo florestal no Projeto de Desenvolvimento Sustentável Virola-Jatobá, Anapu, PA**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2021. v. 1
- BRASIL. **SNUC Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza**. Ministério do Meio Ambiente. Brasil, 2000.
- BRASIL. **Instrução Normativa MMA nº 6, de 15 de dezembro de 2006**. IBAMA, 2006.
- CARSE, L. E.; FREDERICKSEN, T. S.; LICONA, J. C. Liana Tree species associations in a Bolivian dry forest. **Tropical Ecology**, v. 41, n. 1, p. 1–10, 2000.
- CASTILHO, C. V. DE; TONINI, H.; SOUZA, J. C. DE. **Regeneração natural de andiroba (*Carapa guianensis*) em uma floresta no sul de Roraima**. [s.l: s.n.].
- CASTRO, T. DA C. et al. The continuous timber production over cutting cycles in the Brazilian Amazon depends on volumes of species not harvested in previous cuts. **Forest Ecology and Management**, v. 490, 15 jun. 2021.
- CLEMENT, C. R. et al. **The domestication of amazonia before european conquest**. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences** Royal Society of London, , 2015.
- CLOUTIER, D. et al. Impact of selective logging on inbreeding and gene dispersal in an Amazonian tree population of *Carapa guianensis* Aubl. **Molecular Ecology**, v. 16, n. 4, p. 797–809, fev. 2007.
- COELHO DE ABREU, J. et al. Estrutura e distribuição espacial de andirobeiras (*Carapa spp.*) em floresta de várzea do estuário amazônico. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 1009–1019, 2014.
- COSTA, D. L. DA et al. Estoque de árvores em uma área não manejada na Floresta Nacional do Tapajós, PA. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 2, 24 jul. 2019.

- COSTA, J. R.; MORAIS, R. R. DE. *Carapa guianensis* Aubl. (**Andirobeira**) em sistemas agroflorestais. Manaus: [s.n.]. Disponível em: <www.cpaa.embrapa.br>.
- CYSNEIROS, V. C. et al. Distribuição diamétrica de espécies da Floresta Ombrófila Densa no Sul do Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 89, p. 1–10, 31 mar. 2017.
- DANTAS, A. R. et al. Spatial distribution of population of *Pentaclethra macroloba* (Willd.) Kuntze in a floodplain forest of the Amazon estuary. **Revista Árvore**, v. 41, n. 4, p. 1–11, 19 abr. 2017.
- DE JESUS-BARROS, C. R. et al. Registro da ocorrência de *Hypsipyla ferrealis* e *Hypsipyla grandella* (Lepidoptera: Pyralidae) em frutos de andirobeiras (*Carapa guianensis*, Meliaceae) em Macapá– AP, Brasil. **Ciencia Florestal**, v. 25, n. 3, p. 765–769, 1 jul. 2015.
- DE LA CRUZ, M. et al. Nordic Society Oikos Where Do Seedlings Go? A Spatio-Temporal Analysis of Seedling Mortality in a Semi-Arid. **Maestre Source: Ecography**, v. 31, n. 6, p. 720–730, 2008.
- DEGEN, B.; ROUBIK, D. W. Effects of animal pollination on pollen dispersal, selfing, and effective population size of tropical trees: a simulation study. **Biotropica**, v. 36, n. 2, p. 165–179, 2004.
- DENSLOW, J. S. TROPICAL RAINFOREST GAPS AND TREE SPECIES DIVERSITY. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 18, n. 1, p. 431–451, 1987.
- DIGGLE, P. J. **Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns Third Edition**. 1. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2013. v. 1
- ESPADA, A. L. V. et al. **Manejo Florestal e Exploração de Impacto Reduzido em Florestas Naturais de Produção da Amazônia**. Belém: [s.n.].
- ESPÍRITO-SANTO, F. D. B. et al. Análise da composição florística e fitossociológica da floresta nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 1–20, 2006.
- FELFILI, J. M. Diameter and height distributions in a gallery forest tree community and some of its main species in central Brazil over a six-year period (1985-1991). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 20, n. 2, p. 155–162, 1997.
- FERRAZ, I.; CAMARGO, J. L.; SAMPAIO, P. DE T. Andiroba Meliaceae: *Carapa guianensis* Aubl. e *Carapa procera* D. C. Meliaceae. Em: **Manual de sementes da Amazônia**. [s.l: s.n.]. v. 1p. 1–6.

- FERRAZ, I. D. K.; CAMARGO, J. L. C.; SAMPAIO, P. DE T. B. Sementes e plântulas de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl. e *Carapa procera* D.C.): aspectos botânicos, ecológicos e tecnológicos. **Acta Amazonica**, v. 32, n. 4, p. 647–661, 2002b.
- FLETCHER, R.; FORTIN, M.-J. **Spatial Ecology and Conservation Modeling: Applications with R**. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2018. v. 1
- GOMES, H. S. R. **Estrutura populacional e produção de andiroba em terra firme e várzea no sul do Amapá**. Dissertação de mestrado—Macapá: Universidade Federal do Amapá, 2010.
- GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R. DOS. Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 2, p. 229–244, 2008.
- HAMMER, M. L. A.; JOHNS, E. A. Tapping an Amazonian plethora: four medicinal plants of Marajó Island, Pará (Brazil). **Journal of Ethnopharmacology**, v. 40, p. 53–75, 1993.
- HIGUCHI, P. et al. Spatial association among individuals of different species of *Miconia ruiz* (Melastomataceae). **Revista Arvore**, v. 35, n. 3, p. 381–389, 2011.
- HOLMES, T. P. et al. **Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon**. [s.l: s.n.].
- ICMBIO. **Plano de Manejo Floresta Nacional do Tapajós Volume I-Diagnóstico**. Belterra: [s.n.].
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- JANZEN, D. H. Herbivores and the number of tree species in tropical forests. Em: **THE AMERICAN NATURALIST**. Chicago: University of Chicago, 1970. v. 104p. 501–528.
- KLIMAS, C. A.; KAINER, K. A.; DE OLIVEIRA WADT, L. H. The economic value of sustainable seed and timber harvests of multi-use species: An example using *Carapa guianensis*. **Forest Ecology and Management**, v. 268, p. 81–91, 15 mar. 2012.
- KLIMAS, C. A.; KAINER, K. A.; WADT, L. H. O. Population structure of *Carapa guianensis* in two forest types in the southwestern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 250, n. 3, p. 256–265, 20 out. 2007.
- LAMEIRA, O. A. et al. *Carapa guianensis*: Andiroba. Em: CORANDIN, L.; CAMILLO, J.; VIEIRA, I. C. G. (Eds.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Norte**. 53. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2022. v. 1p. 1002–1012.

- LEVIS, C. et al. Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. **Science**, v. 6328, n. 355, p. 925–931, nov. 2017.
- LOPES, S. DE F. et al. CARACTERIZAÇÃO ECOLÓGICA E DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DA VEGETAÇÃO ARBÓREA EM UM REMANESCENTE DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL, NA FAZENDA EXPERIMENTAL DO GLÓRIA, UBERLÂNDIA, MG. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 2, p. 322–335, 2011.
- LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F. DA; ALENCAR, J. DA C. **Essências madeireiras da Amazônia**. INPA/SUFRAMA ed. Manaus: [s.n.]. v. 1
- MACIEL, M. DE N. M. et al. Classificação ecológica das espécies arbóreas. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, v. 1, n. 2, p. 69–78, 2003.
- MARTINS, K. et al. Pollen and seed flow patterns of *Carapa guianensis* Aublet. (Meliaceae) in two types of Amazonian forest. **Genetics and Molecular Biology**, v. 35, n. 4, p. 818–826, 2012.
- MORAES, G. et al. Mudanças na estrutura diamétrica e no arranjo espacial de *Manilkara elata* em área manejada na Floresta Nacional do Tapajós. **Enciclopédia Biosfera**, v. 14, n. 25, p. 950–959, 20 jun. 2017.
- MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. **Aims and methods of Vegetation Ecology**. New York: John Wiley & Sons, 1974. v. 1
- MUÑOZ BRAZ, E. et al. Taxa de corte sustentável para manejo das florestas tropicais. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 1, p. 137–145, 2012.
- NEVES, R. L. P. et al. Post-harvesting silvicultural treatments in canopy logging gaps: Medium-term responses of commercial tree species under tending and enrichment planting. **Forest Ecology and Management**, v. 451, 1 nov. 2019.
- PEÑA-CLAROS, M. et al. Regeneration of commercial tree species following silvicultural treatments in a moist tropical forest. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 3–4, p. 1283–1293, 20 mar. 2008.
- PINTO, A. A. et al. Predação de sementes de andiroba [*Carapa guianensis* Aubl. e *Carapa procera* DC. (Meliaceae)] por insetos na Amazônia. n. 6, p. 1115–1123, 2013.
- POTTKER, G. S. **Distribuição espacial de espécies da Floresta Ombrófila Mista na Flona de Irati, Paraná**. Dissertação de mestrado—Irati: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2012.
- PUTZ, F. E. Silvicultural effects of lianas. Em: **The biology of vines**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. v. 1p. 493–501.

- PUTZ, F. E. et al. Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: The attained and the attainable. **Conservation Letters**, v. 5, n. 4, p. 296–303, 2012.
- QUANZ, B. et al. Exploração florestal de impacto reduzido não afeta a florística do banco de sementes do solo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 55, n. 3, p. 204–211, 2012.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. , 2023. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 15 abr. 2023
- REIS, L. P. et al. Avaliação do potencial madeireiro na Floresta Nacional do Tapajós após 28 anos da exploração florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 265–281, 27 dez. 2010.
- RIPLEY, B. D. Modelling Spatial Patterns. **Source: Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 39, n. 2, p. 172–212, 1977.
- RIPLEY, B. D. Tests of “Randomness” for Spatial Point Patterns. **J. R. Statist. Soc. B**, v. 41, n. 3, p. 368–374, 1979.
- ROWLINGSON, B. S.; DIGGLE, P. J. Splancs: Spatial pattern analysis code in S-plus. **Computers & Geosciences**, v. 19, n. 5, p. 627–655, 1993.
- RUBIN, B. D.; MANION, P. D.; FABER-LANGENDOEN, D. Diameter distributions and structural sustainability in forests. **Forest Ecology and Management**, v. 222, n. 1–3, p. 427–438, 15 fev. 2006.
- SANTOS, Z. J. C. G. DOS. **Governança dos recursos florestais em unidades de conservação na Amazônia: o manejo florestal comunitário na Floresta Nacional do Tapajós**. Tese de doutorado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- SCHWARTZ, G. et al. Disturbance level determines the regeneration of commercial tree species in the eastern Amazon. **Biotropica**, v. 46, n. 2, p. 148–156, mar. 2014.
- SCHWARTZ, G. et al. Enrichment planting in logging gaps with *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby: A financially profitable alternative for degraded tropical forests in the Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 390, p. 166–172, 15 abr. 2017.
- SEBBENN, A. M. et al. Modelling the long-term impacts of selective logging on genetic diversity and demographic structure of four tropical tree species in the Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, v. 254, n. 2, p. 335–349, 25 jan. 2008.
- SHANLEY, P.; LONDRES, M. Andiroba (*Carapa guianensis*). Em: **Fruit trees and useful plants in Amazonian life**. [s.l: s.n.]. v. 2p. 29–38.

- SILVA, D. A. S. DA; SILVA, G. F. DA; CHICHORRO, J. F. **Regulação de florestas inequidistantes sob manejo florestal comunitário na Amazônia.** [s.l.: s.n.].
- SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P. DE; LOPES, J. DO C. A. Inventário florestal de uma área experimental na Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 1, n. 10, p. 38–110, 1985.
- SILVA JUNIOR, C. H. L. et al. **The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade.** *Nature Ecology and Evolution* Nature Research, , 1 fev. 2021.
- SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis.** [s.l.] Chapman & Hall, 1986. v. 1
- SIST, P. Reduced-impact logging in the tropics : objectives, principles and impacts. **International Forestry Review**, v. 2, n. 1, p. 3, 2000.
- SIST, P. et al. Reduced-impact logging in Indonesian Borneo: Some results confirming the need for new silvicultural prescriptions. **Forest Ecology and Management**, v. 179, n. 1–3, p. 415–427, 3 jul. 2003.
- SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas Natvas: estrutura, dinâmica e manejo.** 1. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2013. v. 1
- SVENNING, J. C. Environmental heterogeneity, recruitment limitation and the mesoscale distribution of palms in a tropical montane rain forest (Maquipucuna, Ecuador). **Journal of Tropical Ecology**, v. 17, n. 1, p. 97–113, 2001.
- SWAINE, M. D.; WHITMORE, T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. **Vegetation**, v. 75, n. 1, p. 81–86, 1988.
- TONINI, H. Variações na produção de sementes e recomendações para o manejo de uso múltiplo da andirobeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 563–568, 29 dez. 2017.
- VAN GARDINGEN, P. R.; VALLE, D.; THOMPSON, I. Evaluation of yield regulation options for primary forest in Tapajós National Forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 231, n. 1–3, p. 184–195, 1 ago. 2006.
- VIDAL, E.; WEST, T. A. P.; PUTZ, F. E. Recovery of biomass and merchantable timber volumes twenty years after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 376, p. 1–8, 15 set. 2016.
- VIEIRA, D. D. S. et al. Estrutura diamétrica e espacial de espécies madeiras de importância econômica na Amazônia. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 49, n. 129, p. 1–15, 2021.

VIEIRA, D. DOS S. et al. Estrutura, distribuição espacial e volumetria de *Carapa guianensis* Aubl. na Floresta Nacional do Tapajós. **Nature and Conservation**, v. 6, n. 2, p. 18–25, 31 jan. 2014.

VIEIRA, D. DOS S. et al. Sampling processes for *Carapa guianensis* Aubl. in the Amazon. **Cerne**, v. 24, n. 3, p. 169–179, 1 jul. 2018.

VILLEGAS, Z. et al. Silvicultural treatments enhance growth rates of future crop trees in a tropical dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 6, p. 971–977, 5 set. 2009.

WEST, T. A. P.; VIDAL, E.; PUTZ, F. E. Forest biomass recovery after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 314, p. 59–63, 15 fev. 2014.

WIEGAND, T.; MOLONEY, K. A. **Handbook of Spatial Point-Pattern Analysis in Ecology**. Boca Raton: CRC Pressed., 2014.

Capítulo 2 – Uso da dendrocronologia para definir ciclo e diâmetro mínimo de corte para o manejo madeireiro de *Carapa guianensis* Aublet na Amazônia Oriental

Resumo

O objetivo deste trabalho foi definir diâmetro mínimo de corte (DMC) e ciclo de corte (CC) para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós, com o intuito de prospectar ações de manejo madeireiro para a referida espécie. Foram selecionadas aleatoriamente 30 árvores, localizadas nas Unidades de Produção Anual (UPAs) 4 e 10 em áreas de florestas manejadas pela COOMFLONA (Cooperativa Mista da Floresta Nacional do Tapajós) na Floresta Nacional do Tapajós. Com o uso de uma sonda de 400 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro de núcleo, foram coletadas, a uma altura de 1,3 m do solo, de 2 a 3 amostras radiais por árvore, em diferentes sentidos, totalizando 85 baguetas. Para a modelagem do crescimento das árvores, foi aplicado o método GOL (*Growth-Oriented Logging*), com a construção de curvas de diâmetro, área basal e volume. O valor do incremento corrente anual (ICA) e do incremento médio anual (IMA) do DAP das árvores sem casca foi obtido a partir do crescimento cumulativo nos diferentes anos. O DMC correspondeu ao diâmetro na idade em que a árvore atingiu o maior incremento corrente em volume. O ciclo de corte foi determinado levando em consideração a estimativa do tempo médio de passagem pelas classes diamétricas de 10 cm, até atingir o DMC específico calculado. Os resultados mostram que a espécie *Carapa guianensis* apresenta anéis de crescimento anuais distintos, cuja análise permitiu modelar padrões de crescimento em diâmetro, volume e área basal, permitindo com que critérios específicos de manejo fossem estabelecidos. Para que se tenha um manejo sustentável, é necessário que o DMC seja de 50 cm, com ciclo de corte 14,8 anos. Além disso, é necessário quantificar a produção de sementes por classe de DAP para que o manejo madeireiro possa iniciar na classe de DAP que a produção de sementes diminuir, de forma a implantar o manejo de uso múltiplo para a referida espécie.

Palavras-chave: Anéis de crescimento; Incremento; Diâmetro Mínimo de Corte

Introdução

A floresta Amazônica apresenta alta diversidade de espécies arbóreas que podem ter potencial para a produção madeireira. Logo, seria possível promover a sustentabilidade dessa produção por meio do manejo próprio de cada espécie, respeitando a sua autoecologia e garantindo a conservação e a manutenção da produção contínua (CUNHA; FINGER, 2013). Nesse contexto, a execução do manejo florestal, que leva em consideração a capacidade da floresta em produzir, ao longo do tempo, um estoque

compatível ao colhido, é o principal desafio no manejo de florestas nativas, no qual se busca a continuidade da produção (SEYDACK, 2012; SOUZA et al., 2015).

Um dos requisitos para a regulação da produção madeireira em florestas tropicais e subtropicais é a definição de em que momento do seu ciclo de vida, as árvores podem ser incluídas no estoque de colheita. Para isso, é comum levar em consideração o seu diâmetro, conhecido como DMC (Diâmetro Mínimo de Corte), a partir do qual as árvores podem ser selecionadas para corte (SEYDACK, 2012).

A questão é que a definição de limites de corte geralmente é estabelecida de acordo com as tecnologias de processamento da madeira e com as demandas de mercado, em vez de considerar as características biológicas das espécies colhidas (SIST et al., 2003b). Essa negligência significa dizer que os critérios atuais de definição dos DMCs são improváveis de fornecer manejo florestal ecologicamente sustentável (JENNINGS et al., 2001; PUTZ et al., 2000; SHEIL; VAN HEIST, 2000; SIST et al., 1998), pois as espécies possuem taxas de crescimento diferentes, o que resulta em erros de estimativas da produção (BRAZ; MATTOS; CANETTI, 2021)

Como exemplo disso, a legislação brasileira federal e a do estado do Pará estabelecem o DMC de 50 cm para todas as espécies comerciais, para as quais ainda não se estabeleceu o DMC específico (BRASIL, 2006; SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO PARÁ, 2015). A consequência é que isso pode causar uma extração em excesso das espécies de crescimento mais lento e uma baixa eficiência de uso nas espécies de crescimento mais rápido (SCHÖNGART, 2008b). Ademais, a legislação superestima o crescimento de espécies madeireiras comerciais e pode estar incompatível com a capacidade de restabelecimento da floresta (ARAUJO, 2018), colocando em risco a sustentabilidade do manejo.

Em virtude disso, o planejamento da colheita florestal deve considerar, entre outros fatores, o DMC por espécie (SIST et al., 2003b), uma vez que todas as espécies madeireiras possuem diâmetro de máxima produção, após o qual, o incremento começa a decair drasticamente, como observado em curvas de crescimento de seres vivos (ODUM, 1988).

Assim, cortar antes do ponto de inflexão, ou seja, durante o período de maior crescimento, implica em perda de maior volume, pois a capacidade de regeneração da espécie será diminuída (SOUZA; SOARES, 2013). No entanto, cortar depois deste ponto implicará em cortar quando o incremento já reduziu e a mortalidade aumentou, tendo implicações econômicas negativas (SCHÖNGART, 2008b). Além disso, cortar depois

acarretará em não colher árvores que morrerão naturalmente, ou seja, o manejo deve explorar a faixa ótima de estoque (SOUZA; SOARES, 2013).

Do mesmo modo, não é possível definir a produção ótima de toda uma floresta, por meio da definição arbitrária de apenas um ciclo ou um diâmetro de corte, uma vez que cada espécie possui um diâmetro que maximiza seu incremento em volume em um determinado sítio. Portanto, a taxa de corte deveria ser a composição dos volumes relativos a estes diâmetros ótimos por espécie. Assim, a determinação do diâmetro ótimo de corte de cada espécie é uma ferramenta que precisa ser implementada, para se conhecer o máximo incremento da floresta de produção (BRAZ; MATTOS, 2015).

A própria legislação brasileira salienta que, para a determinação do DMC por espécie comercial manejada, é necessário que sejam realizados estudos que observem as diretrizes técnicas disponíveis, considerando: a distribuição diamétrica do número de árvores com diâmetro à altura do peito (DAP), medido a 1,3 m do solo, maior ou igual a 10 cm, por unidade de área (n/ha), resultante de inventário florestal realizado na UMF (Unidade de Manejo Florestal); o uso a que se destina; e outras características ecológicas que sejam relevantes para a sua regeneração natural (BRASIL, 2006; SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO PARÁ, 2015).

Dentre as espécies madeireiras comerciais, *Carapa guianensis* Aubl., destaca-se pela sua importância social e econômica. Sua madeira é apontada como sucedânea de *Swietenia macrophylla* (SHANLEY; MEDINA, 2005), com boa aceitação no mercado (KLIMAS; KAINER; DE OLIVEIRA WADT, 2012b), especialmente o externo (SHANLEY; MEDINA, 2005), além de possuir ótima qualidade, coloração diferenciada, devido aos flavonoides e alta durabilidade, o que garante valor econômico à espécie (BAUCH; DUNISCH, 2000).

Assim, as seguintes hipóteses foram estabelecidas para este estudo: (1) é possível definir DMC (Diâmetro Mínimo de Corte) e CC (Ciclo de Corte) para *Carapa guianensis*, por meio do incremento registrado em seus anéis de crescimento; e que (2) o DMC e CC atualmente estabelecidos na legislação brasileira para todas as espécies não são os mesmos para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós.

Com isso, o objetivo deste trabalho foi definir DMC e CC para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós, com o intuito de prospectar ações de manejo madeireiro para a referida espécie.

Material e métodos

Área de estudo

A Floresta Nacional do Tapajós está localizada no estado do Pará, entre os paralelos de 2° 45' e 4° 10' de latitude sul e entre os meridianos de 54° 45' e 55° 30' de longitude oeste. Limita-se ao norte, com o paralelo que cruza o km 50 da rodovia Cuiabá-Santarém (BR-163); ao sul, com a Rodovia Transamazônica e os rios Cupari e Cuparitinga ou Santa Cruz; a leste, com a BR-163; e a oeste com o rio Tapajós (ESPÍRITO-SANTO et al., 2006).

O clima da região, pela classificação de Koppen, é do tipo Am, caracterizado como clima tropical com temperatura média do dia mais fria do ano superior a 18°C. A concentração de chuvas ocorre entre janeiro e maio, com precipitação média anual de 1820 mm (ALVARES et al., 2013). Os solos são altamente intemperizados, profundos, bem drenados, caulíníticos e classificados por Oliveira Junior e Correa (2001) como Latossolos Amarelos Distróficos e Argissolos Amarelos Distróficos na Taxonomia Brasileira (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2015).

A Floresta Nacional do Tapajós situa-se, em escala regional, na zona de Floresta Ombrófila Densa, tipo de vegetação dominante no norte do país e que abrange a maior parte dos estados do Pará, Amazonas, Amapá e Roraima (VELOSO; RANGEL FILHO; LIMA, 1991). Este tipo de vegetação caracteriza-se pela dominância de árvores de grande porte, sob regime climático de temperaturas elevadas e intensas precipitações distribuídas ao longo do ano, podendo ocorrer período seco de até 60 dias (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2012).

Coleta, preparo e análise das amostras

Foram selecionadas 30 árvores de *Carapa guianensis* do banco de dados do inventário 100% em áreas de florestas manejadas pela COOMFLONA na Floresta Nacional do Tapajós, sendo 9 árvores na UPA 4 e 21 árvores na UPA 10 (Figura 9), divididas em 3 classes de diâmetro: I – (DAP 30 – 49,9 cm); II – (DAP 50 – 69,9 cm); III – (DAP \geq 70 cm) e com 10 árvores em cada classe (Tabela 4). Nestas árvores, foram medidos o DAP a 1,3 m do solo com o auxílio de uma fita diamétrica e a altura comercial (até a primeira bifurcação do fuste), medida com o auxílio do hipsômetro Trupulse 360°.

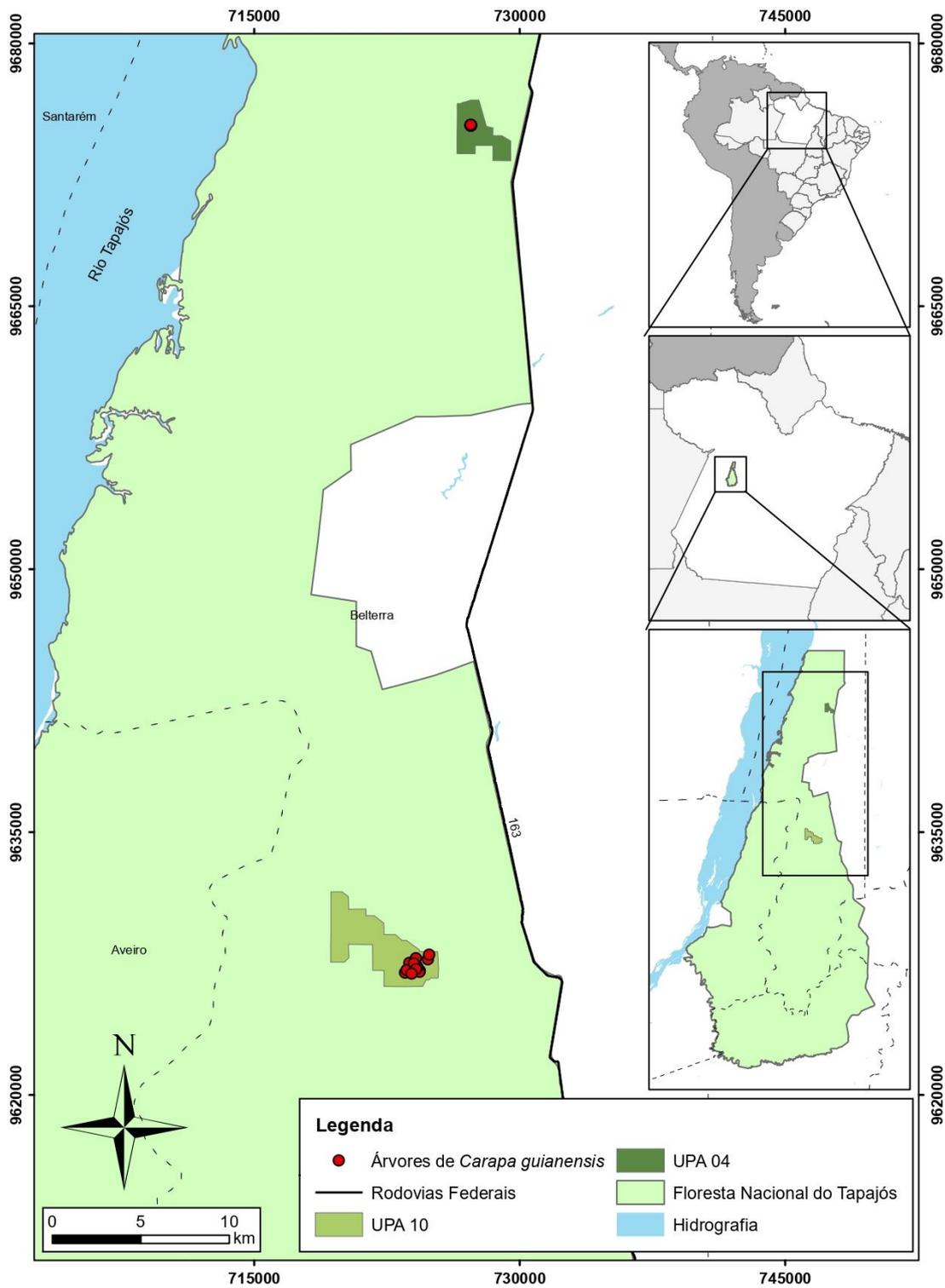


Figura 9. Localização das árvores de *Carapa guianensis* nas Unidades de Produção Anual 4 e 10 na Floresta Nacional do Tapajós.

Tabela 4. Quantidade de árvores de *Carapa guianensis* utilizadas para as análises pelos anéis de crescimento nas UPAs 4 e 10 na Floresta Nacional do Tapajós.

Origem	Classes diamétricas (cm)			Total
	I (30-49,9)	II (50-69,9)	III (≥ 70)	
UPA 4	8	1	0	9
UPA 10	2	9	10	21
Total	10	10	10	30

A coleta de amostras do lenho para análises dos anéis de crescimento foi realizada nas 30 árvores. O método de coleta empregado neste estudo foi o direto e não destrutivo, no qual o fuste da árvore é preservado e apenas uma porção do lenho é retirada, com uma sonda metálica e extrator motorizado. Este método permite a retirada de pequenas amostras de madeira sob a forma de baguetas, nas quais os limites dos anéis de crescimento podem ser visualizados, possuindo como principal vantagem a manutenção da integridade da árvore em seu ecossistema natural (Figura 10).



Figura 10. Extração das baguetas de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós.

Portanto, com o uso de uma sonda de 400 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro de núcleo, foram coletadas, a uma altura de 1,3 m do solo (DAP), de 2 a 3 amostras radiais por árvore, em diferentes sentidos, totalizando 85 baguetas (Figura 11).

Para as árvores com DAP > 60 cm, foi utilizado um extensor de 200 mm acoplado à broca da sonda, a fim de possibilitar a retirada das amostras.

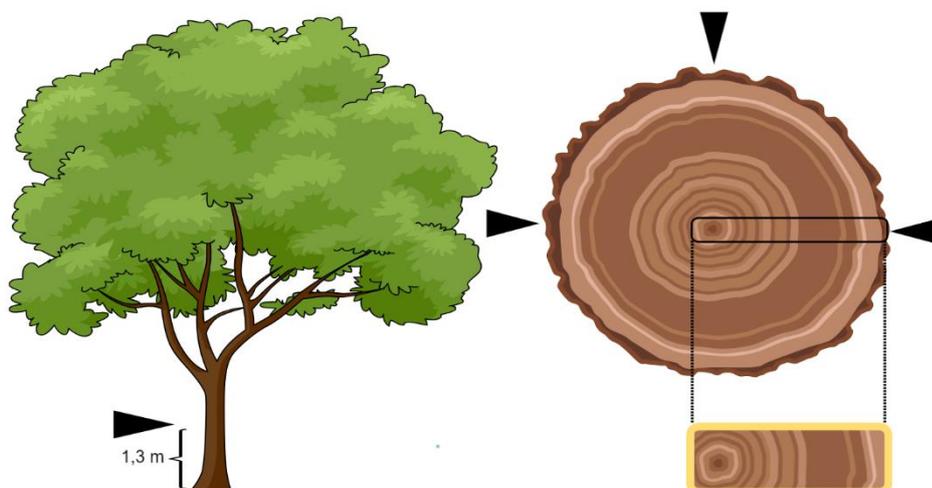


Figura 11. Coleta das amostras (baguetas) pelo método não destrutivo a 1,3 m de altura do solo e em 2 ou 3 diferentes direções nas árvores de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. As setas pretas indicam as diferentes direções em que as amostras foram retiradas.

Após a coleta das amostras, uma tinta antifúngica à base de calda bordalesa foi aplicada nas incisões para prevenir ataque biológico às árvores e cavilhas de madeira foram inseridas para vedar as incisões, garantindo sua sanidade.

As baguetas foram fixadas em suportes de madeira para secagem e posterior polimento e manuseio, com as fibras orientadas no sentido vertical e sua seção transversal foi polida com lixas de diferentes gramaturas (36, 50, 120, 150, 220, 320, 400, 800 e 1200 grãos/polegada²), a fim de possibilitar o contraste dos elementos anatômicos, principalmente a visualização dos anéis de crescimento (Figura 12).

Os anéis de crescimento foram demarcados e mensurados com precisão de 0,01 mm na mesa de mensuração LINTAB, equipada com um estereomicroscópio de luz incidente Leica S4E.

Os valores mensurados foram registrados e os gráficos exibidos com o auxílio do software TSAP-Win - *Time Series Analysis and Presentation*, versão 4.64, (Rinntech, Heidelberg, Germany). Os resultados forneceram curvas de incremento radial individual para cada raio.

Para as amostras que não apresentaram medula, foi aplicado um método que consiste na medição do espaço entre o primeiro anel mensurado até a possível posição da medula, seguindo o sentido do raio e o valor obtido foi dividido pela média dos dez

primeiros anéis mensurados, resultando na quantidade de anéis respectivos a esta área (HIETZ, 2011).



Figura 12. Baguetas de *Carapa guianensis* coletadas na Floresta Nacional do Tapajós.

As baguetas foram digitalizadas com resolução de 1200 dpi (*scanner HP LaserJet Pro MFP M125nw*) para a realização da datação cruzada com a sincronização visual das imagens. Nesta etapa, foram identificadas as partes síncronas entre os raios da mesma árvore e a identificação de falsos anéis, que foram excluídos das séries de larguras no TSAP-WinTM.

Além da datação cruzada visual, todas as séries de larguras de anéis também passaram por datação cruzada estatística (COOK; KAIRIUKSTIS, 1990). Dois indicadores estatísticos foram utilizados para avaliar a correspondência entre as séries temporais: o GLK (*gleichläufigkeit*), que reflete a porcentagem de concordância ano a ano nas oscilações de duas curvas (SCHWEINGRUBER, 1988) e o valor t de Student, que indica o grau de similaridade entre duas curvas (BAILLIE; PILCHER, 1973). Essas duas estatísticas foram usadas para selecionar as melhores séries correlacionadas que foram incluídas nas cronologias construídas (BATISTA; SCHÖNGART, 2018; BOAKYE et al., 2016; GEBREKIRSTOS et al., 2008; TROUET; ESPER; BEECKMAN, 2010).

Para que a datação cruzada fosse considerada bem-sucedida, os seguintes valores mínimos foram estipulados: valor do teste t de 2 ($p < 0,05$) e GLK de 60%, que são valores mínimos de referência para espécies tropicais (TROUET; ESPER; BEECKMAN, 2010).

Em seguida, as melhores séries temporais individuais, ou seja, as que obtiveram as melhores sincronizações por árvore, foram selecionadas para a construção da série

temporal média (cronologia), deixando as 2 melhores séries de largura por árvore, totalizando assim, 60 séries de largura ao todo. A média dessas 2 séries representou o crescimento de cada árvore.

A caracterização qualitativa da anatomia macroscópica dos anéis de crescimento foi realizada de acordo com as normas e procedimentos em estudos de anatomia da madeira (ALFONSO et al., 1989). A estimativa da idade se deu pela contagem dos anéis de crescimento e as taxas de incremento em diâmetro por meio da largura dos anéis de crescimento medidos e sincronizados.

Modelagem do crescimento

Para a modelagem do crescimento, foi aplicado o método GOL (*Growth-Oriented Logging*), que consiste na determinação de intervenções de colheita madeireira, baseando-se nas taxas de crescimento de espécies tropicais madeireiras e nos estoques volumétricos, definindo diâmetro mínimo de corte e ciclo de corte para cada espécie (SCHÖNGART, 2008b).

Para isso, foram construídas curvas cumulativas diametrais por árvore, tendo como base as medições do incremento radial corrente (SCHÖNGART et al., 2007). Com a elaboração das curvas individuais, as curvas cumulativas médias foram construídas, sendo indicada, portanto, a relação entre diâmetro (DAP) e idade.

Em seguida, as idades das árvores estimadas pela contagem de anéis foram relacionadas ao DAP correspondente das árvores. As relações idade-diâmetro foram ajustadas a uma função sigmoideal, usando o diâmetro como variável independente (SCHÖNGART, 2008b) (Equação 3).

$$(3) \quad DAP = \frac{a}{(1+(b/idade)^c)}$$

Em que:

DAP = diâmetro à altura do peito (m);

a, b, c = coeficientes obtidos no ajuste da regressão não linear.

Assim, um diâmetro respectivo para cada idade estimada foi gerado. A relação entre diâmetro e idade possibilitou construir curvas de incremento corrente e médio em diâmetro em função da idade.

O modelo de crescimento em diâmetro foi ajustado no *software* Xact (SciLab) e averiguado pelo coeficiente de correlação.

A partir dos dados de área basal individual, foi gerada uma área transversal respectiva para cada idade estimada. Dessa forma, foram construídas curvas de incremento corrente e médio em área basal em função da idade.

O volume das árvores foi calculado a partir do modelo de Schumacher-Hall logaritimizado (RIBEIRO; GAMA; MELO, 2014) ajustado para a Floresta Nacional do Tapajós (Equação 4), para que houvesse um volume respectivo para cada idade estimada, com o diâmetro obtido na equação 3. Assim, foram construídas curvas de incremento corrente e médio de volume em função da idade.

$$(4) \quad \ln(V) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(DAP) + \beta_2 * \ln(Hc) + \varepsilon$$

O valor do incremento corrente anual (ICA) e do incremento médio anual (IMA) do DAP das árvores sem casca foi obtido a partir do crescimento cumulativo (CrC) nos diferentes anos (t) (Equações 5 e 6) (Schöngart 2008).

$$(5) \quad ICA = CrC_{(t+1)} - CrC_{(t)}$$

Em que:

ICA = incremento corrente anual em diâmetro, em área basal e em volume do fuste;

CrC = crescimento cumulativo do fuste nos diferentes anos;

t = idade da árvore.

$$(6) \quad IMA = \frac{CrC_t}{t}$$

Em que:

IMA = incremento médio anual em diâmetro, em área basal e em volume do fuste;

CrC = crescimento cumulativo do fuste até uma determinada idade t;

t = idade da árvore.

O DMC correspondeu ao diâmetro na idade em que a árvore atingiu o maior incremento corrente em volume, sendo o volume constituído pelo modelo volumétrico citado anteriormente.

Após o conhecimento do valor de DMC, o ciclo de corte foi determinado levando em consideração a estimativa do tempo médio de passagem pelas classes diamétricas de 10 cm, até atingir o DMC específico calculado (Equação 7).

$$(7) \quad \text{Ciclo de corte} = \frac{\text{Idade}_{(DMC)}}{DMC * 0.1}$$

Em que:

DMC = diâmetro mínimo de corte (m);

0.1 = classes de diâmetro de 10 cm.

Para ilustrar todo o procedimento de coleta e processamento de dados, foi elaborado um fluxograma, a fim de facilitar o entendimento das atividades desenvolvidas (Figura 13).

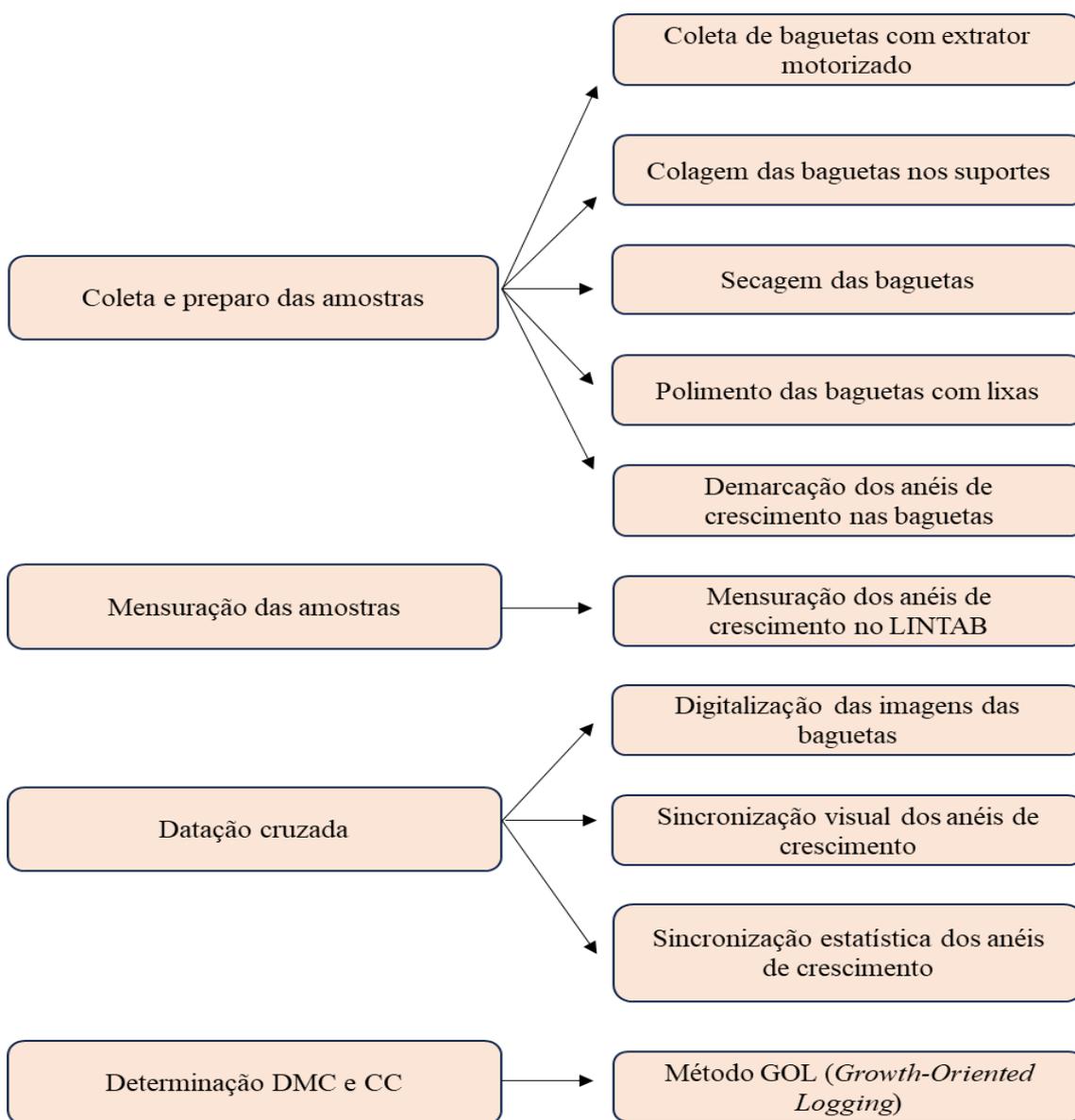


Figura 13. Fluxograma da coleta e processamento dos dados. Em que: DMC: Diâmetro Mínimo de Corte e CC: Ciclo de corte.

Resultados

Estrutura anatômica dos anéis de crescimento do lenho das árvores

A análise macroscópica da estrutura anatômica provou que as camadas de crescimento de *Carapa guianensis* são distintas apenas sob lente e individualizadas por faixas estreitas e irregularmente espaçadas de parênquima axial marginal, associado ou não aos vasos (Figura 14).



Figura 14. Anéis de crescimento de *Carapa guianensis*. As faixas azuis indicam as faixas de parênquima axial marginal que delimitam os anéis de crescimento da espécie.

Construção das séries de largura dos anéis de crescimento

As 60 séries de largura dos anéis de crescimento de *Carapa guianensis* apresentaram uma largura média de 2,91 mm, compreendendo os anos de 1895 a 2020, sendo que as idades estimadas das árvores pelos anéis de crescimento variaram entre 44 e 126 anos.

O procedimento de datação cruzada entre as séries de largura da mesma árvore foi bem-sucedido, pois os valores de GLK e do teste t de Student encontram-se acima dos limites aceitáveis para o padrão de espécies tropicais, com média de 78,4% e 11,5, respectivamente.

A datação cruzada possibilitou a identificação de falsos anéis, observados principalmente nas seguintes formas: onde se apresentavam com faixas de parênquima muito estreitas e muito próximas entre si, com agrupamento e maior densidade de vasos entre as faixas (Figura 15); quando as faixas de parênquima eram tão estreitas, que ficavam sobrepostas, formando uma faixa contínua e espessa (Figura 16); e quando ocorriam anéis convergentes, que seguiam paralelos e depois convergiam, formando uma única faixa ou vice-versa (Figura 17).



Figura 15. A seta branca refere-se a agrupamento/densidade de vasos devido à faixas de parênquima muito estreitas e muito próximas entre si, indicando um falso anel de crescimento em *Carapa guianensis*.

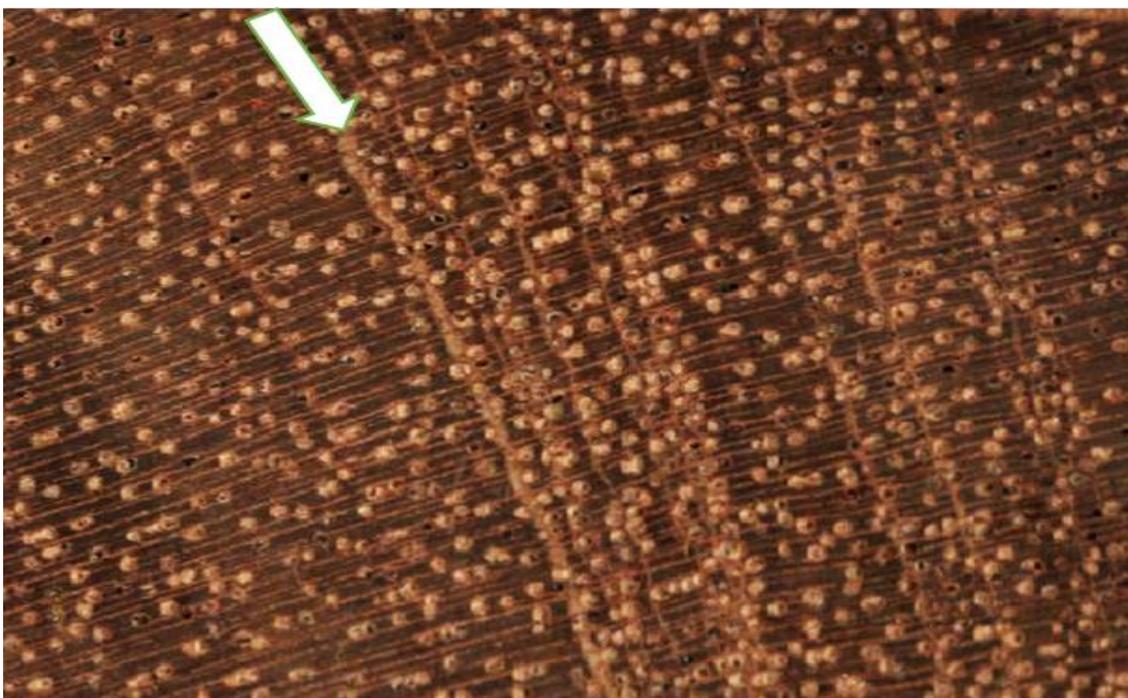


Figura 16. A seta branca refere-se a um conjunto de faixas de parênquima muito estreitas e sobrepostas, formando uma faixa contínua e indicando um falso anel de crescimento em *Carapa guianensis*.

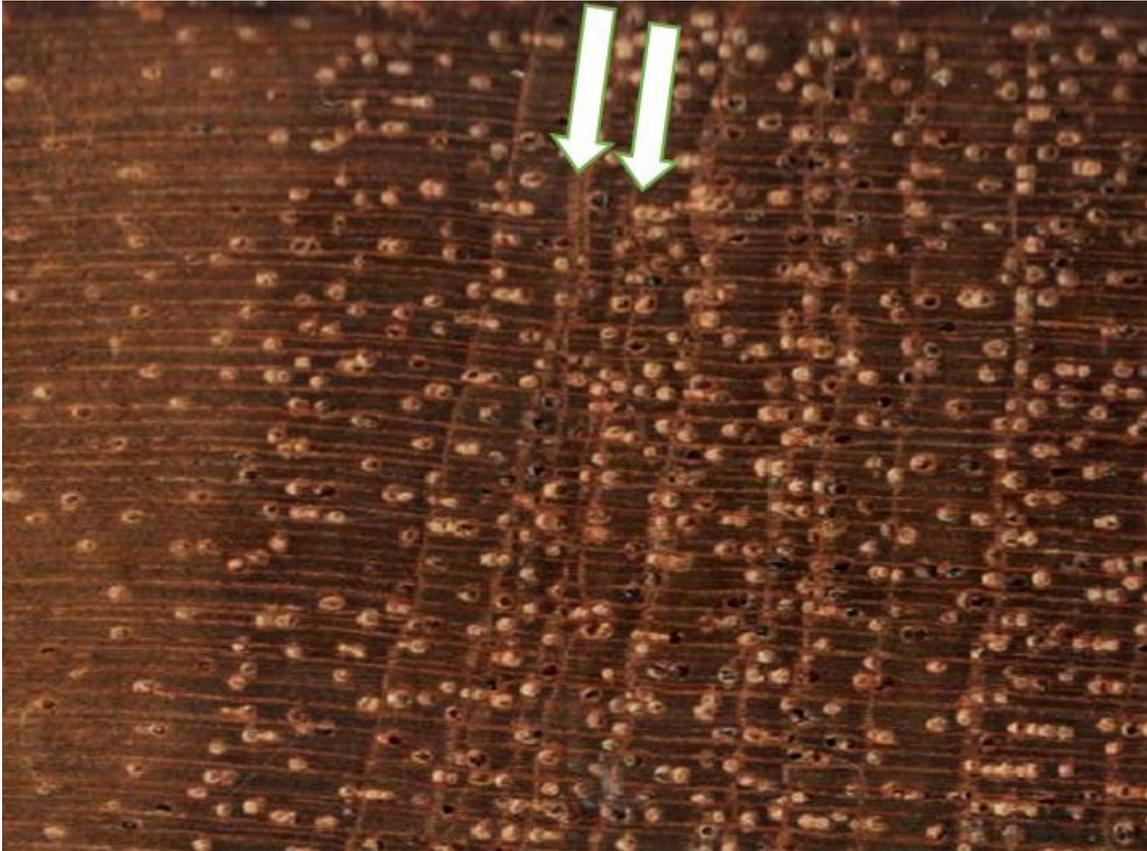


Figura 17. As setas brancas referem-se a anéis convergentes, indicando um falso anel de crescimento em *Carapa guianensis*.

Curvas de crescimento das árvores construídas pelos anéis de crescimento

A regressão entre diâmetro e idade foi significativa para *Carapa guianensis* (Figura 18), que permitiu com que o crescimento diamétrico fosse modelado ($r=0,66$; $p<0,00001$). Assim, os parâmetros para o modelo ajustado entre diâmetro e idade foram: $a = 128,7052$; $b = 105,4954$; $c = 1,2743$.

O modelo de crescimento indica que o máximo incremento corrente diamétrico ocorre aos 21 anos de idade, com $0,79 \text{ cm.ano}^{-1}$ e com uma taxa média de incremento corrente de $0,54 \text{ cm.ano}^{-1}$ (Figura 19).

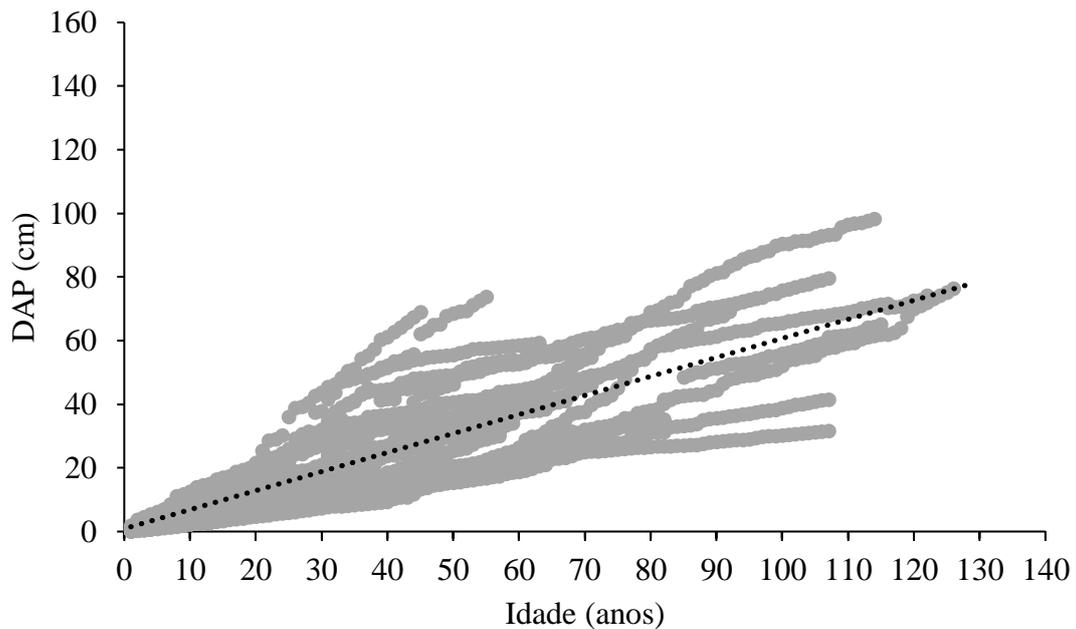


Figura 18. Curvas de crescimento cumulativo em diâmetro em função da idade de 30 árvores de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós.

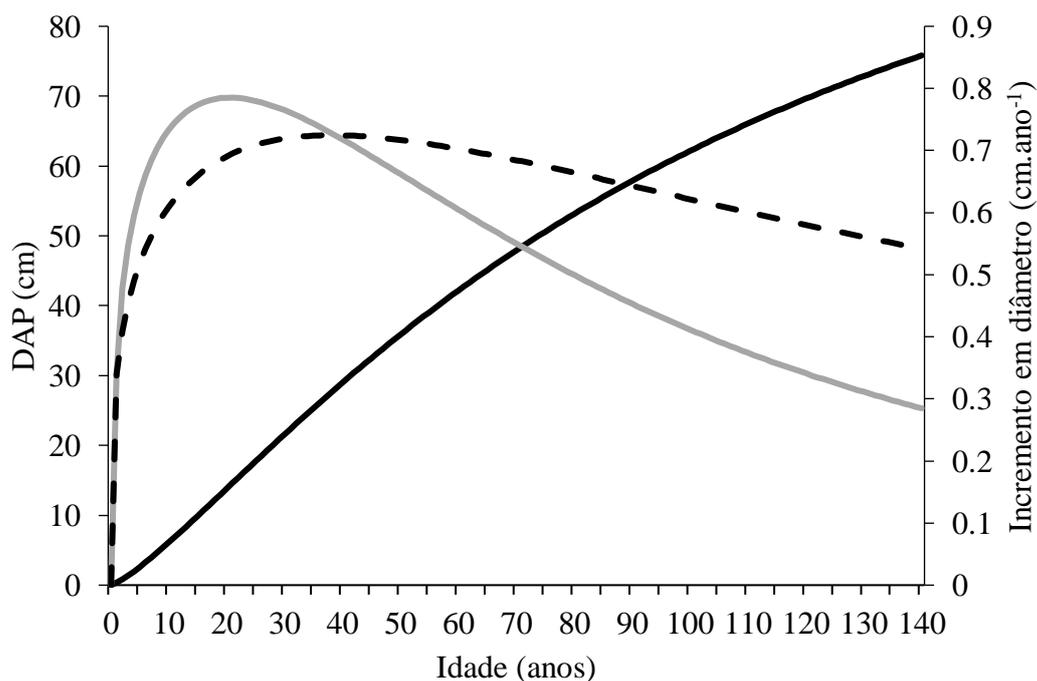


Figura 19. Curvas de crescimento em diâmetro para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. A linha preta contínua representa o crescimento cumulativo em diâmetro; a linha cinza representa o incremento corrente anual em diâmetro; a linha preta tracejada representa o incremento médio anual em diâmetro.

A maior taxa de incremento corrente em área basal individual ocorreu aos 79 anos de idade, com $0,004148 \text{ m}^2.\text{ano}^{-1}$, com uma taxa média de incremento corrente de $0,0032 \text{ m}^2.\text{ano}^{-1}$ (Figura 20).

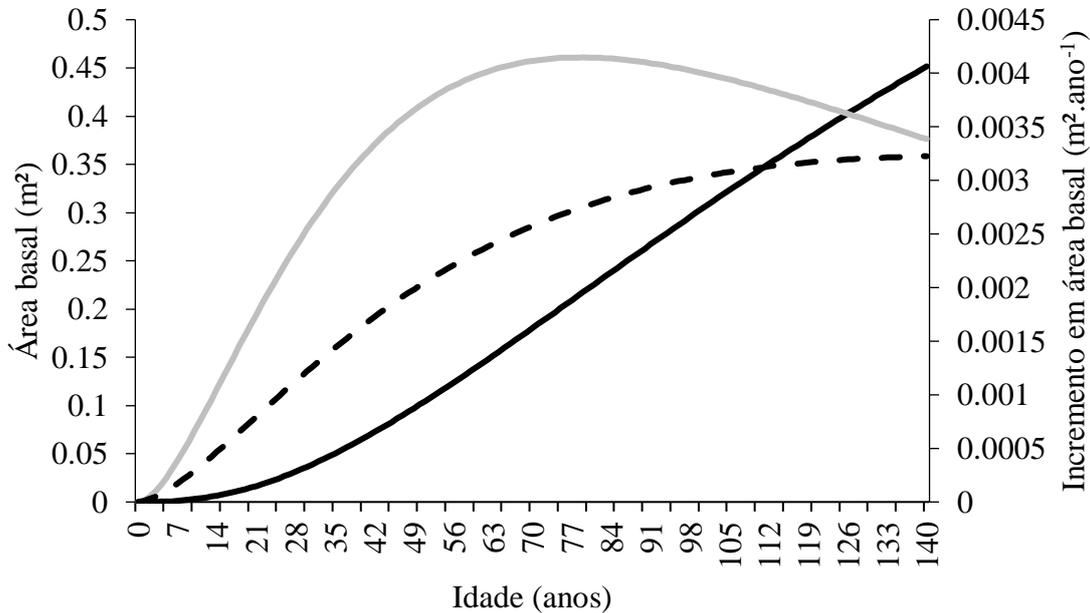


Figura 20. Curvas de crescimento em área basal para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. A linha preta contínua representa o crescimento cumulativo em área basal; a linha cinza representa o incremento corrente em área basal; a linha preta tracejada representa o incremento médio em área basal.

A correlação entre altura e diâmetro foi considerada positiva ($r=0,32$; $p=0,08358$), permitindo a modelagem. Assim, os parâmetros para o modelo ajustado entre diâmetro e idade foram: $d = 20,8693$; $e = 20,705$.

A curva de crescimento em volume foi construída usando as relações entre idade-diâmetro e, com base nisso, o período ótimo de corte foi determinado. O máximo incremento corrente anual em volume de *Carapa guianensis* foi atingido aos 74 anos de idade, com $0,0395 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ (Figura 21) e com diâmetro de 50,06 cm, sendo este, portanto, o DMC.

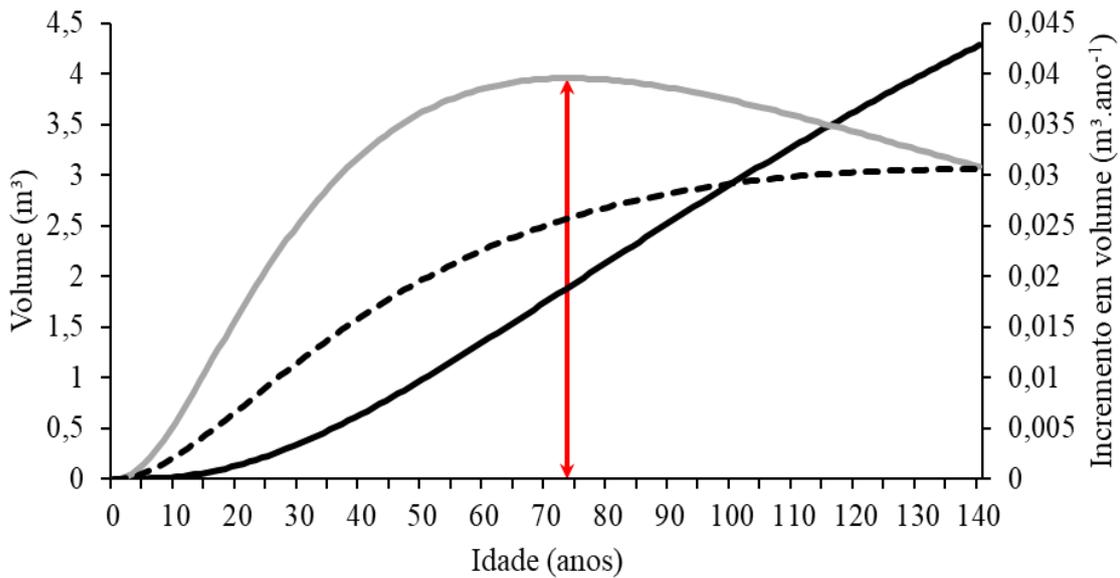


Figura 21. Curvas de crescimento em volume para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. A linha preta contínua representa o crescimento cumulativo em volume; a linha cinza representa o incremento corrente em volume; a linha preta tracejada representa o incremento médio em volume; a seta vermelha indica o ponto de máximo incremento em volume.

O ciclo de corte foi estimado em 14,8 anos, representando, portanto, o tempo necessário para que a população abaixo do DMC passe por classes de DAP de 10 cm até atingir o diâmetro ideal para corte (Figura 22).

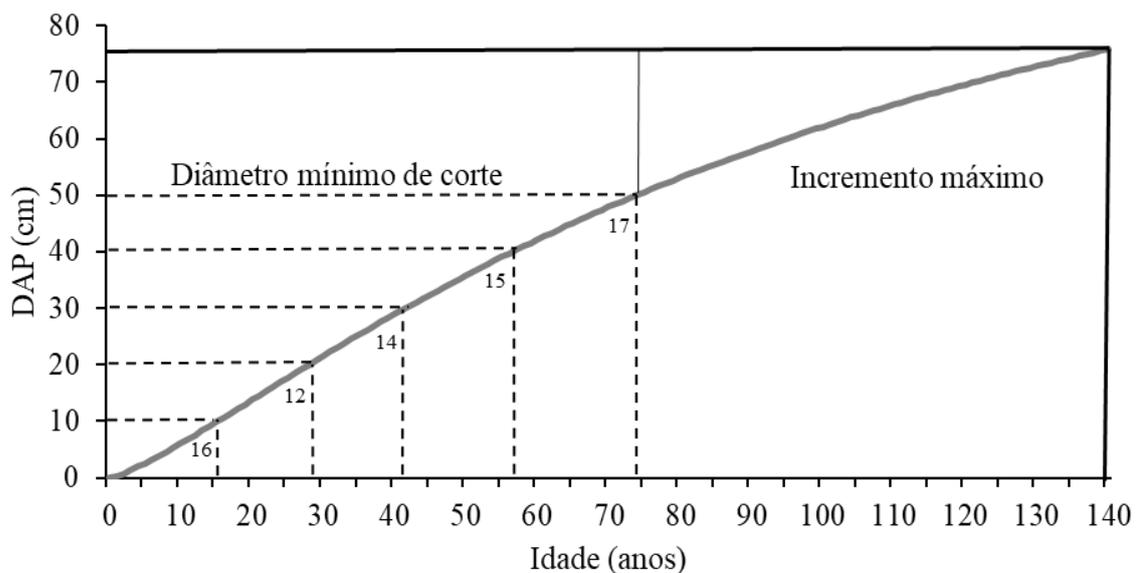


Figura 22. Relação entre diâmetro e idade para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós e o tempo de passagem (anos) que a espécie necessitou para atingir cada classe de 10 cm de diâmetro até alcançar o diâmetro mínimo de corte (DMC) de 50 cm.

Discussão

Estrutura anatômica dos anéis de crescimento do lenho das árvores

A marcação dos anéis de crescimento do tipo parênquima marginal em *Carapa guianensis* é bastante comum não só em outras espécies da família Meliaceae, como *Cedrela fissilis* Vell. (MARCATI et al., 2006) e *Cedrela odorata* L., como também em espécies de outras famílias, como *Copaifera* sp. e *Hymenaea courbaril* L. (TREVIZOR, 2011).

Uma estação seca de 2 ou 3 meses e pelo menos 60 mm de precipitação mensal pode induzir a formação de anéis de crescimento em espécies tropicais (WORBES, 1995). Entretanto, mesmo em regiões onde as taxas de precipitação são maiores que 60 mm ao longo do ano (sem estação seca), a espécie *Carapa guianensis* apresentou sazonalidade na atividade cambial, com consequente formação dos anéis de crescimento anuais (DÜNISCH et al., 2002), alertando para o fato de que o ritmo periódico é anual e independe da existência de períodos de seca (CALLADO et al., 2014).

Entretanto, é preciso ressaltar que a sincronização entre as amostras deve ser feita de forma cautelosa, pois a presença de falsos anéis mostrou-se evidente na análise da estrutura anatômica do lenho nesta espécie.

Falsos anéis são o resultado de mudanças na atividade cambial que interrompem o curso de crescimento de uma espécie durante o seu período de crescimento (WIMMER; STRUMIA; HOLAWA, 2000). Eles podem dificultar as avaliações do crescimento das árvores, pois interferem no processo de datação cruzada, na datação de curvas de largura de anéis de árvores e na construção de uma cronologia confiável (DE MICCO et al., 2016). Portanto, caracterizá-los e identificá-los facilita a correta demarcação de limites de crescimento e é fundamental para a realização de estudos dendrocronológicos (BLAGITZ et al., 2019).

Além disso, a ocorrência de falsos anéis em espécies tropicais está relacionada com flutuações nas condições climáticas dentro de uma mesma estação (VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2015), como por exemplo, chuvas durante o período seco e secas durante o período chuvoso (PRIYA; BHAT, 1998), além dos fatores endógenos, como genótipo, sexo, tamanho, idade, atividade fotossintética e reserva de carboidratos (DE MICCO et al., 2016).

Anéis de crescimento falsos também já foram detectados em um plantio de *Carapa guianensis* de 4 anos de idade, na qual as árvores apresentaram de 11 a 15 zonas de incremento (BAUCH; DUNISCH, 2000). Isto ocorre porque a formação dos anéis de

crescimento não se dá apenas em função da precipitação, mas também dos períodos de seca e inundação, podendo ocorrer dois ou mais ciclos em um único ano (WORBES, 1995).

Além disso, espécies da família Meliaceae podem apresentar canais de resina de natureza traumática, que podem ocorrer em resposta a danos no tronco ou pelo ataque da broca *Hypsiphylia grandella* ou de outro inseto no meristema apical das árvores, formando anéis que podem ser considerados verdadeiros, porém, não correspondem à camada de crescimento anual (DÜNISCH; BAAS, 2006).

Uma das características identificadas como falsos anéis neste estudo foi a formação de faixas de parênquima axial marginal muito estreitas entre anéis de crescimento verdadeiros, similar ao que foi observado em outras espécies, como *Cabralea canjerana*, *Trichilia claussenii* e *Prunus myrtifolia* (BLAGITZ et al., 2019), sendo as duas primeiras também pertencentes à família Meliaceae.

Além deste padrão, os anéis convergentes apresentados nas árvores de *Carapa guianensis* neste estudo podem estar ocorrendo devido a uma falha na atividade cambial em certas posições do fuste, o que leva à fusão dos limites desse anel (WORBES; FICHTLER, 2011).

Outra explicação para a ocorrência de anéis de crescimento convergentes é que eles se desenvolvem quando uma árvore muda sua direção de crescimento em relação à fonte de luz, devido à competição com as árvores circundantes (SCHWEINGRUBER, 1988; WORBES; FICHTLER, 2011). Essa mudança de direção leva a diferenças locais no fornecimento de carboidratos, água, elementos minerais e fitohormônios (DÜNISCH et al., 1999).

Apesar disso, os parâmetros da datação cruzada avaliados neste estudo (GLK e teste T de Student) mostraram-se acima dos limites estipulados para espécies tropicais (TROUET; ESPER; BEECKMAN, 2010), além de também serem maiores do que outras espécies tropicais, como é o caso de *Azelia africana*, *Anogeissus leiocarpus* (BOAKYE et al., 2016), *Juniperus procera* (COURALET et al., 2005), *Aidia ochroleuca*, *Corynanthe paniculata* e *Xylopia wilwerthii* (COURALET et al., 2010).

Modelagem do crescimento

O método GOL, apesar de ter sido desenvolvido utilizando dados de anéis de crescimento em áreas de várzea, também já foi utilizado para árvores em terra firme (ANDRADE et al., 2019b; PINTO, 2020; SOUSA, 2019). Seu uso para *Carapa*

guianensis já havia sido recomendado (MIRANDA et al., 2017), porém ainda não havia sido utilizado em estudos científicos.

Com isso, este estudo demonstrou que a distinção dos anéis de crescimento em *Carapa guianensis* e a possibilidade de utilizá-los em estudos dendrocronológicos de modelagem do crescimento para fins de manejo florestal, provou-se ser uma alternativa viável para a espécie, com a definição de DMC e CC específicos, visando aumentar a sustentabilidade dos planos de manejo florestal.

O DMC estabelecido na legislação brasileira para todas as espécies (BRASIL, 2006) é o mesmo também para *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós, porém este estudo mostra que o ciclo de corte menor (de cerca de 15 anos), o que reduziria o tempo atual de intervenções de futuras colheitas desta espécie em uma mesma área de produção, que atualmente varia entre 25 e 35 anos, para planos de manejo florestais plenos.

O DMC de *Carapa guianensis* em 50 cm significa que é neste tamanho que ela atinge o seu máximo incremento corrente em volume. Estudos sugerem que estimativas baseadas no volume são mais confiáveis, uma vez que este parâmetro de crescimento atinge seu máximo incremento mais tarde que a altura, diâmetro e área basal (DE RIDDER et al., 2013; PRETZSCH, 2010) e é uma medida mais realística da produtividade das espécies, já que a colheita também é planejada em função do volume (ANDRADE et al., 2019b).

Mesmo que o DMC calculado neste trabalho tenha sido o mesmo sugerido para as demais espécies amazônicas, o seu cálculo deve ser realizado para cada espécie e em cada sítio, pois o conhecimento do padrão de crescimento das espécies florestais comerciais auxilia na tomada de decisão para desenvolver sistemas de manejo adequados à realidade local. Isto ocorre em virtude dos diferentes padrões de comportamento de espécies diferentes ou da mesma espécie em diferentes ambientes.

Como exemplo disso, o método GOL foi aplicado, utilizando os dados de anéis de crescimento presentes nas seções transversais do lenho da madeira de *Hymenaea courbaril* L. com DAP > 50 cm, tanto na Floresta Nacional do Tapajós, no estado do Pará (SOUSA, 2019), quanto em uma área de concessão florestal, próximo ao município de Novo Aripuanã, no estado do Amazonas (ANDRADE et al., 2019b), com diferentes resultados. Na primeira, o DMC foi de 56,84 cm com um ciclo de corte de 19 anos, enquanto que na segunda área, o DMC foi de 64,9 cm com ciclo de corte de 24,2 anos.

A informação do DMC de 50 cm deve levar em consideração que na Floresta Nacional do Tapajós é atualmente realizado o manejo não madeireiro desta espécie e que, para planejar o seu manejo de uso múltiplo, a informação da quantificação de frutos por classe de DAP deve ser conhecida. Esta informação permitiria planejar o manejo madeireiro a partir da classe de DAP em que a produção de frutos começa a diminuir (KLIMAS; KAINER; DE OLIVEIRA WADT, 2012b).

A maior produção de frutos por classe de DAP para esta espécie varia muito, podendo se concentrar nas classes de 40-50 no Acre (KLIMAS; KAINER; DE OLIVEIRA WADT, 2012b) até a classe de 70 cm em Roraima (TONINI, 2017b). Em virtude da produção variar muito, a quantificação de frutos por árvore de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós permitiria seu manejo de uso múltiplo de forma ecologicamente equilibrada.

Este estudo sugere que para *Carapa guianensis*, na Floresta Nacional do Tapajós, deve ser aplicado um ciclo de corte menor do que o atualmente estabelecido na legislação brasileira. Isto quer dizer que a população desta espécie abaixo do DMC precisa em média de 14,8 anos para passar por cada classe de DAP de 10 cm até repor o estoque explorado e manter, portanto, a sua capacidade produtiva neste local.

A antecipação do ciclo de corte encontrado neste estudo pode estar relacionada à sua densidade básica da madeira, uma vez que baixo ciclo de corte e densidade básica são significativamente correlacionadas, pois espécies florestais com densidades de até $0,60 \text{ g.cm}^{-3}$ costumam ter ciclos de corte menores (até 13,9 anos) que espécies mais densas (SCHÖNGART, 2008b). Os valores de densidade básica variam bastante conforme o ambiente, mas para a *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós, é de $0,59 \text{ g.cm}^{-3}$ (NASCIMENTO, 1993).

O incremento médio em diâmetro neste estudo de $0,54 \text{ cm.ano}^{-1}$ é similar ao encontrado com parcelas permanentes na Floresta Nacional do Tapajós, com nível de inclusão de 5 cm de DAP, sendo $0,6 \text{ cm.ano}^{-1}$ (7 anos após a exploração) e $0,5 \text{ cm.ano}^{-1}$ (13 anos após a exploração) (SILVA et al., 1996). Deve-se levar em consideração que as UPAs 4 e 10 avaliadas nesta pesquisa também sofreram exploração seletiva de madeira 11 e 5 anos antes da coleta das baguetas, respectivamente. Além disso, o incremento médio de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós em uma área não manejada foi de $0,3 \text{ cm.ano}^{-1}$ (SILVA et al., 1996), provando que aberturas no dossel provenientes de extração seletiva de madeira favorecem o crescimento da referida espécie, devido à maior disponibilidade de luz.

Por fim, as diferenças nas taxas de incremento em volume, diâmetro e área basal mostram que sistemas policíclicos, operando com apenas um único diâmetro mínimo de corte e ciclo de corte para colheita de diversas espécies madeireiras, não levam em consideração o potencial de crescimento das espécies e poderia comprometer a eficiência do manejo florestal desta espécie na Floresta Nacional do Tapajós.

Conclusão

Carapa guianensis apresenta anéis de crescimento anuais distintos, cuja análise permitiu modelar padrões de crescimento em diâmetro, volume e área basal, permitindo com que critérios específicos de manejo fossem estabelecidos.

Com base na modelagem do crescimento de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós, para que se tenha um manejo sustentável, é necessário que o DMC seja de 50 cm, bem como estabelecido na atual legislação brasileira, porém o ciclo de corte pode ser menor (14,8 anos), para que a referida espécie consiga recuperar o estoque colhido em futuras colheitas.

Além disso, é necessário quantificar a produção de sementes por classe de DAP para que o manejo madeireiro possa iniciar na classe de DAP que a produção de sementes decair, de forma a implantar o manejo de uso múltiplo para a referida espécie.

Referências bibliográficas

- ALFONSO, A. V. et al. **IAWA LIST OF MICROSCOPIC FEATURES FOR HARDWOOD IDENTIFICATION with an Appendix on non-anatomical information IAWA Committee IAWA Bulletin n. s.** [s.l: s.n.].
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE, V. H. F. et al. Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 215–223, 15 abr. 2019a.
- ARAUJO, H. J. B. DE. **Crescimento de Espécies Madeireiras Comerciais em Florestas no Acre**. 1. ed. Rio Branco: Embrapa Acre, 2018. v. 1
- BAILLIE, M. G. L.; PILCHER, J. R. A simple cross-dating program for tree-ring research. **Tree-Ring Bulletin**, v. 33, n. 1, p. 1–9, 1973.
- BATISTA, E. S.; SCHÖNGART, J. Dendroecology of *Macaranga acaciifolia* (Fabaceae) in central Amazonian floodplain forests. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 4, p. 311–320, 1 out. 2018.

- BAUCH, J.; DUNISCH, O. Comparison of growth dynamics and wood characteristics of plantation-grown and primary forest *Carapa guianensis* in Central Amazonia. **IAWA Journal**, v. 21, n. 3, p. 321–333, 2000.
- BLAGITZ, M. et al. Tree rings in tree species of a seasonal semi-deciduous forest in southern Brazil: wood anatomical markers, annual formation and radial growth dynamic. **Dendrochronologia**, v. 55, p. 93–104, 1 jun. 2019.
- BOAKYE, E. A. et al. Influence of climatic factors on tree growth in riparian forests in the humid and dry savannas of the Volta basin, Ghana. **Trees - Structure and Function**, v. 30, n. 5, p. 1695–1709, 1 out. 2016.
- BOUFLEUER, N. T. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E MANEJO DE RECURSOS NATURAIS**. Dissertação de mestrado—Rio Branco: Universidade Federal do Acre, 2004a.
- BRASIL. **Instrução Normativa MMA nº 6, de 15 de dezembro de 2006**. IBAMA, 2006.
- BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P. DE; CANETTI, A. **Manejo de espécies madeireiras da Floresta Amazônica: critérios e procedimentos**. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2021. v. 1
- BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P. Manejo de produção em florestas naturais da Amazônia: mitos e verdades. **Nativa**, v. 3, n. 4, p. 292–295, 20 dez. 2015.
- BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. **Journal of Ecology**, v. 94, n. 2, p. 481–493, mar. 2006.
- CALLADO, C. H. et al. Studies on cambial activity: Advances and challenges in the knowledge of growth dynamics of Brazilian woody species. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 86, n. 1, p. 277–283, mar. 2014.
- COOK, E. R.; KAIRIUKSTIS, L. A. **Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences**. 1. ed. [s.l.] Springer, 1990. v. 1
- COURALET, C. et al. Combining dendrochronology and matrix modelling in demographic studies: An evaluation for *Juniperus procera* in Ethiopia. **Forest Ecology and Management**, v. 216, n. 1–3, p. 317–330, 12 set. 2005.
- COURALET, C. et al. Species-specific growth responses to climate variations in understory trees of a central African rain forest. **Biotropica**, v. 42, n. 4, p. 503–511, jul. 2010.

- CUNHA, T. A. DA; FINGER, C. A. G. Competição assimétrica e o incremento diamétrico de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Amazônia ocidental. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 9–18, 2013.
- DE MICCO, V. et al. Intra-annual density fluctuations in tree rings: How, when, where, and why? **IAWA Journal**, v. 37, n. 2, p. 232–259, 7 jul. 2016.
- DE RIDDER, M. et al. Tree-ring analysis of an African long-lived pioneer species as a tool for sustainable forest management. **Forest Ecology and Management**, v. 304, p. 417–426, 5 set. 2013.
- DÜNISCH, O. et al. Growth dynamics in wood formation of plantation-grown *Swietenia macrophylla* King and *Carapa guianensis* Aubl. . **Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg**, v. 193, n. 1, p. 79–96, 1999.
- DÜNISCH, O. et al. Light, water, and nutrient demand for the growth of three high quality timber species (Meliaceae) of the Amazon. **Journal of Applied Botany**, v. 76, n. 1, p. 29–40, 2002.
- DÜNISCH, O.; BAAS, P. On the origin of intercellular canals in the secondary xylem of selected Meliaceae species. **IAWA Journal**, v. 27, n. 3, p. 281–297, 2006.
- ESPÍRITO-SANTO, F. D. B. et al. Análise da composição florística e fitossociológica da floresta nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 1–20, 2006.
- GEBREKIRSTOS, A. et al. Climate-growth relationships of the dominant tree species from semi-arid savanna woodland in Ethiopia. **Trees - Structure and Function**, v. 22, n. 5, p. 631–641, out. 2008.
- HIETZ, P. A simple program to measure and analyse tree rings using Excel, R and SigmaScan. **Dendrochronologia**, v. 29, n. 4, p. 245–250, 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- JENNINGS, S. B. et al. Ecology provides a pragmatic solution to the maintenance of genetic diversity in sustainably managed tropical rain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 154, n. 1, p. 1–10, 2001.
- KLIMAS, C. A.; KAINER, K. A.; DE OLIVEIRA WADT, L. H. The economic value of sustainable seed and timber harvests of multi-use species: An example using *Carapa guianensis*. **Forest Ecology and Management**, v. 268, p. 81–91, 15 mar. 2012.

MIRANDA, Z. P. et al. Volume increment modeling and subsidies for the management of the tree *Mora paraensis* (Ducke) Ducke based on the study of growth rings. **Trees - Structure and Function**, v. 32, n. 1, p. 277–286, 1 fev. 2017.

NASCIMENTO, C. C. **VARIABILIDADE DA DENSIDADE BÁSICA E DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA AMAZÔNIA**. Dissertação de mestrado— Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de Sao Paulo, 1993.

ODUM, E. P. **Fundamentos de ecologia**. 6. ed. [s.l.] Fundação Calouste Gulbenkian, 1988. v. 1

PINTO, L. A. DE A. FOREST MANAGEMENT CRITERIA FOR *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. (Sapotaceae) IN UPLAND FORESTS OF CENTRAL AMAZON BASED ON DENDROCHRONOLOGICAL STUDY. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 15, n. 1, p. 1–9, 2020.

PRETZSCH, H. **Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model**. 1. ed. München: Springer Berlin Heidelberg, 2010. v. 1

PRIYA, P. B.; BHAT, K. M. False ring formation in teak (*Tectona grandis* L.f.) and the influence of environmental factors. **Forest Ecology and Management**, v. 108, n. 1, p. 215–222, 1998.

PUTZ, F. E. et al. **Biodiversity Conservation in the Context of Tropical Forest Management**. 1. ed. Washington: The International Bank for Reconstruction and Development, 2000. v. 1

RIBEIRO, R. B. DA S.; GAMA, J. R. V.; MELO, L. DE O. SECCIONAMENTO PARA CUBAGEM E ESCOLHA DE EQUAÇÕES DE VOLUME PARA A FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 605–612, 1 out. 2014.

SCHÖNGART, J. et al. Management criteria for *Ficus insipida* Willd. (Moraceae) in Amazonian white-water floodplain forests defined by tree-ring analysis. **Annals of Forest Science**, v. 64, n. 6, p. 657–664, set. 2007.

SCHÖNGART, J. Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 1–2, p. 46–58, 10 jul. 2008.

SCHWEINGRUBER, F. H. **Tree Rings**. [s.l.] Springer Netherlands, 1988.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO PARÁ. **Instrução Normativa SEMA Nº 5 DE 10/09/2015. Diário Oficial do Pará. Brasil.**
<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=303363>, , 2015.

- SEYDACK, A. H. W. Regulation of timber yield sustainability for tropical and subtropical moist forests: Ecosilvicultural paradigms and economic constraints. Em: PUKKALA, T.; VON GADOW, K. (Eds.). **Continuous Cover Forestry**. Managing Forest Ecosystems. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. v. 23p. 1–297.
- SHANLEY, P.; MEDINA, G. **Frutíferas e plantas úteis na vida amazônica**. 1. ed. Belém: CIFOR, Imazon, 2005. v. 1
- SHEIL, D.; VAN HEIST, M. Ecology for tropical forest management. **International Forestry Review**, v. 4, n. 2, p. 1–10, 2000.
- SILVA, J. N. M. et al. Growth and yield studies in the Tapajós region, Central Brazilian Amazon. **Commonwealth Forestry Review**, v. 75, n. 4, p. 325–329, 1996.
- SIST, P. et al. Harvesting intensity versus sustainability in Indonesia. **Forest Ecology and Management**, v. 108, n. 1, p. 251–260, 1998.
- SIST, P. et al. Towards sustainable management of mixed dipterocarp forests of Southeast Asia: Moving beyond minimum diameter cutting limits. **Environmental Conservation**, v. 30, n. 4, p. 364–374, dez. 2003.
- SOUSA, L. K. V. DOS S. **Dendrocronologia aplicada no manejo de árvores de cedro (*Cedrela odorata*) L. e jatobá (*Hymenaea courbaril*) L. ocorrentes na FLONA Tapajós, PA**. Tese de doutorado—Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2019.
- SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas Natvas: estrutura, dinâmica e manejo**. 1. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2013. v. 1
- SOUZA, D. V. et al. Crescimento de espécies arbóreas em uma floresta natural de terra firme após a colheita de madeira e tratamentos silviculturais, no município de Paragominas, Pará, Brasil. **Ciencia Florestal**, v. 25, n. 4, p. 873–883, 1 out. 2015.
- TONINI, H. Variações na produção de sementes e recomendações para o manejo de uso múltiplo da andirobeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 563–568, 29 dez. 2017.
- TROUET, V.; ESPER, J.; BEECKMAN, H. Climate/growth relationships of *Brachystegia spiciformis* from the miombo woodland in south central Africa. **Dendrochronologia**, v. 28, n. 3, p. 161–171, 2010.
- VELOSO, H. PIMENTA.; RANGEL FILHO, A. L. ROSA.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Economia, Fazenda e Planejamento, Fundação Instituto Brasileiro

de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. v. 1

VENEGAS-GONZÁLEZ, A. et al. Plasticity in xylem anatomical traits of two tropical species in response to intra-seasonal climate variability. **Trees - Structure and Function**, v. 29, n. 2, p. 423–435, 1 abr. 2015.

WIMMER, R.; STRUMIA, G.; HOLAWÉ, F. Use of false rings in Austrian pine to reconstruct early growing season precipitation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, n. 1, p. 1691–1697, 2000.

WORBES, M. HOW TO MEASURE GROWTH DYNAMICS IN TROPICAL TREES A REVIEW. **IAWA Journal**, v. 16, n. 4, p. 337–351, 1995.

WORBES, M.; FICHTLER, E. Wood anatomy and tree-ring structure and their importance for tropical dendrochronology. Em: **Ecological Studies: Analysis and Synthesis**. 1. ed. Plön: Springer, 2011. v. 210p. 329–346.

CONCLUSÕES GERAIS

Esta tese traz informações ecológicas e de crescimento importantes que podem auxiliar na tomada de decisões para um possível futuro manejo de *Carapa guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós.

Os resultados mostram que o padrão de distribuição espacial predominantemente agregado de *Carapa guianensis* facilita as atividades de manejo e aplicação de tratamentos silviculturais e que os mapas da densidade de Kernel fornecem subsídios para o manejador planejar tanto a exploração madeireira, quanto a colheita de frutos para o manejo não-madeireiro desta espécie.

Além disso, esta tese traz evidências de que os critérios de manejo madeireiro devem ser ajustados por espécie e devem levar em consideração suas características específicas em uma determinada área, uma vez que particularidades locais podem interferir no comportamento e conseqüentemente no seu padrão de crescimento. Portanto, o DMC de 50 cm e o ciclo de corte de 14,8 anos encontrados neste estudo para *Carapa guianensis* podem não ser os mesmos para a mesma espécie em outras áreas.

O ajuste de critérios específicos de manejo, como a definição de diâmetros mínimos de corte e de ciclos de corte exclusivos para cada espécie promove o aumento da sustentabilidade do manejo florestal praticado em florestas tropicais, pois leva em consideração o ponto em que ela atinge seu incremento máximo, a partir do qual, não há mais incremento líquido.

A dendrocronologia provou ser um método eficaz para se atingir este objetivo para a espécie *Carapa guianensis* e também pode ser uma alternativa para outras espécies, principalmente quando não se dispõe de dados históricos de medições sucessivas do diâmetro (monitoramento do crescimento por parcelas permanentes).

Espera-se que os resultados aqui apresentados tenham implicações para a formulação de políticas públicas e que estudos dessa natureza possam ser realizados para outras espécies com potencial de manejo, respeitando seus padrões de crescimento.