



**RAFAEL LUCAS FIGUEIREDO DE SOUZA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE E  
ESTRUTURA ARBÓREA DE CASTANHAIS NATIVOS NA  
AMAZÔNIA ORIENTAL**

**LAVRAS - MG  
2021**

**RAFAEL LUCAS FIGUEIREDO DE SOUZA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE E ESTRUTURA ARBÓREA  
DE CASTANHAIS NATIVOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. José Márcio de Mello

Orientador

**LAVRAS – MG  
2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Souza, Rafael Lucas figueiredo de.

Variabilidade espacial da produtividade e estrutura arbórea de  
castanhais nativos na Amazônia oriental / Rafael Lucas figueiredo  
de Souza. - 2021.

88 p.: il.

Orientador(a): José Márcio de Mello.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Manejo Florestal. 2. Extrativismo. 3. Geoestatística. I. Mello,  
José Márcio de. II. Título.

**RAFAEL LUCAS FIGUEIREDO DE SOUZA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE E ESTRUTURA ARBÓREA  
DE CASTANHAIS NATIVOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

**SPATIAL VARIABILITY OF THE PRODUCTIVITY AND TREE STRUCTURE OF  
BRAZIL NUT STANDS IN EASTERN AMAZON**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA no dia 18 de fevereiro de 2021.

Dr. Marcelino Carneiro Guedes (Embrapa Amapá) membro titular  
Dra. Marcela de Castro Nunes Santos Terra (DEG/UFLA) membro titular

Prof. Dr. José Márcio de Mello  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2021**

*À minha mãe, Regina, por sempre ensinar a importância do conhecimento,  
Ao meu pai, Lucivaldo, por enfatizar a necessidade de sermos independentes  
Às minhas irmãs, Luciana e Luciane, pelo companheirismo,  
À minha sobrinha, Maria Luiza, por todo o amor e carinho.*

Dedico

*In memoriam  
José Albuquerque de Souza*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família, por todo o suporte que me foi dado para concluir essa etapa importantíssima da minha vida.

Ao meu avô, José Albuquerque de Souza, por nunca medir esforços para a criação de seus filhos e sempre ajudar seus netos e bisnetos (*In memoriam*).

Aos professores do laboratório de manejo da Universidade do Estado do Amapá (UEAP), por sempre acreditarem em mim, pelo apoio intelectual e grande amizade, em especial: Dr. Robson Lima (Kakaroto), Dra. Cinthia Pereira e Dr. Jadson Abreu.

As amigadas que se fortaleceram desde a graduação, na qual posso contar em todos os momentos, em especial: Carlos Roberto, Luís Rennan e Victor, obrigado por serem bons irmãos ao meu lado. Agradeço também a Anthoinny Vitória, pela amizade e parceria em publicações científicas no período do mestrado.

Agradeço imensamente a minha amiga Victoria Souza, pelas inúmeras vezes que me auxiliou no uso do *software* Qgis. Sem dúvida essa ajuda foi fundamental para construir o banco de dados para as análises espaciais. Estamos juntos na luta pelo uso dos softwares livres!

A Universidade Federal de Lavras, PPGEF/DCF/LEMAF e CNPq, pela estrutura oferecida e bolsa concedida.

A todos os professores do LEMAF/DCF/UFLA pelos ensinamentos que ampliaram meus horizontes sobre a ecologia e manejo florestal, em especial aos Professores: Marco Aurélio, Lucas Gomide, Marcelo (Passarinho), Fausto, Marcela e Ana Carolina.

Aos meus colegas de laboratório, Luiz e Natielle, pela parceria e recepção no tempo em que estive presente em Lavras.

A professora Marcela Terra, pela amizade e o tempo para discussões produtivas acerca de possíveis análises para a dissertação, sem dúvida esse contato contribuiu muito para o andamento deste trabalho.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. José Márcio de Mello, por me ensinar o significado de se tornar um mestre. Pela paciência, dedicação e suporte intelectual em análises geoestatísticas para aprofundar os estudos sobre a castanheira-da-amazônia, que possui grande importância para os povos da Amazônia, ou seja, para o meu povo.

Ao Anderson Pedro Bernardina Batista, que me orientou na graduação e que continuou colaborando com os meus trabalhos no mestrado. Sem dúvida, suas colaborações para o estudo da castanheira revelaram o interesse internacional pela espécie. Agradeço a amizade e pelos conselhos para a vida profissional e pessoal.

Ao Marcelino Carneiro Guedes, pela amizade e por me incluir nos estudos da castanheira e confiar no meu trabalho, sem dúvida ainda iremos desenvolver outros projetos no futuro. Também agradeço a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Amapá, no qual já tenho uma parceria que dura 5 anos e, neste tempo, pude participar de atividades na reserva extrativista do rio cajari (Resex Cajari), local onde este estudo foi realizado e por meio do Professor Marcelino, houve a concessão dos dados.

Às comunidades agroextrativistas da Resex Cajari, no qual pude frequentar suas casas e sempre fui recebido de forma calorosa e com muito carinho. Este trabalho não é somente fruto de análises computacionais ou de leitura de artigos, mas da forte ligação que os pesquisadores têm com as comunidades, que ultrapassa as fronteiras acadêmicas.

Aos irmãos que Lavras me deu, Dayane Nathália e Luis Schorr, que estiveram presentes em cada momento da minha estadia em Lavras, desde os compromissos acadêmicos até os momentos de alegria e diversão, das noites com jantares preparados pelo nosso “masterchef” Luis, pelas reuniões no postinho em cada fim de tarde. Com certeza essa convivência foi fundamental para suavizar as preocupações, pois como diria o filósofo Francis Bacon: “A amizade duplica as alegrias e divide as tristezas”.

Aos amigos que admiro muito, que fazem parte da república “puxadinho” e que também dividiram grandes momentos comigo: Bruno, Luis, Dayane, Matheus e “Buri”, o cachorro que é a alegria da galera. Agradeço também aos amigos que sempre compartilharam bons momentos conosco: Bruna, Dáfilla, Chimbinha, João, Mylena e Victor.

À Dayane Nathália, de forma especial, pela amizade que se estendeu desde a graduação e que se consolidou em Lavras, e que agora se perpetuará pelos anos. Sempre conte comigo!

À Mylena Mota, pela forte amizade e carinho, por ser alguém que posso contar sempre. Sem dúvidas uma das melhores pessoas que Lavras me permitiu conhecer, que nossa amizade permaneça independente da distância e do tempo. Sua ajuda foi fundamental para que eu pudesse qualificar o projeto de mestrado quando estive ausente de Lavras. Gratidão!

A presente dissertação foi resultado de muito trabalho, com troca de ideias e de imaginação. Sou profundamente grato a todos que estiveram do meu lado, que acreditam num futuro promissor e cheio de esperança para a sustentabilidade dos recursos florestais da amazônia. Devemos nos unir, pois como já dizia o Maluco Beleza:

“Um sonho que se sonha só, é só um sonho que se sonha só, mas um sonho que se sonha junto, é realidade”

Muito obrigado!

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”

**Antoine Lavoisier**

## APRESENTAÇÃO

A presente pesquisa buscou compreender como os castanhais nativos da Amazônia oriental estão estruturados espacialmente, com ênfase no sul do estado do Amapá. O estudo utilizou variáveis arbóreas referentes a população de castanheiras dentro dos castanhais, diâmetro, área basal e densidade, bem como variáveis produtivas como a produtividade e produção média, que se referem a produção de frutos por hectare e por árvore, respectivamente. Devido ao histórico de ocupação humana na região, também se buscou evidências históricas para compreender comportamento espacial dessas variáveis em relação às atividades extrativistas, realizadas pelas comunidades tradicionais, que praticam a coleta de frutos desde o início do século XX para comercialização.

A dissertação está dividida em dois capítulos. O primeiro capítulo conta com uma Introdução Geral, Revisão de Literatura, Considerações Gerais e Referências. Neste capítulo foram apresentadas as bibliografias referentes aos estudos realizados, para compor uma base sólida e coerente, a fim de revelar o problema da pesquisa e formular hipóteses. Dentro da revisão de literatura, apresentamos algumas informações de caráter consultivo, sobre a produtividade dos castanhais nas principais comunidades tradicionais da reserva extrativista do rio cajari (Resex Cajari), bem como informações da variação da produção de frutos em um período de dez anos, em três parcelas permanentes alocadas em castanhais pertencentes a alguns extrativistas da região.

O segundo capítulo foi formado por um artigo científico. Neste artigo é realizado um amplo e pioneiro estudo, aplicando técnicas espaciais (geoestatística) em dados de variáveis arbóreas e produtivas dos castanhais em duas tipologias florestais na reserva extrativista: Floresta Ombrófila Aberta e Floresta Ombrófila Densa. Posteriormente, buscou-se compreender como a atividade extrativista pode estar beneficiando o crescimento e estabelecimento das castanheiras, tanto em tempos pretéritos quanto em dias atuais. Houve uma intensa busca por evidências históricas que comprovassem a movimentação dos extrativistas da região, como; a abertura de ramais e localização das comunidades extrativistas.

O artigo desenvolvido no segundo capítulo que está e/ou será submetido à publicação em revista científica, tal como recomenda a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF/UFLA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior (CAPES). O artigo possui uma formatação específica e diferenciada de acordo com as normas da revista científica selecionada.

## RESUMO GERAL

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl), é o produto florestal não-madeireiro (PFNM) mais importante da América Latina. A espécie possui grande relevância ecológica e socioeconômica. No sul do Amapá, a espécie pode ser encontrada em florestas densas (FD) e, principalmente, em florestas abertas (FA). As tipologias florestais de ocorrência são determinantes para o estabelecimento dos castanhais, por conta das diferentes disponibilidades de luz e do manejo voluntário realizado pelos extrativistas. Essas influências podem modificar a estrutura dos castanhais, deixando uma assinatura espacial na paisagem. A geoestatística é uma ferramenta que pode auxiliar na detecção dessa componente espacial nos castanhais, podendo expressar a relação entre as variáveis e os locais de ocorrência. O objetivo geral desta dissertação foi verificar a existência de dependência espacial de variáveis arbóreas e produtivas em castanhais nativos da Amazônia, comparando as respostas entre duas tipologias florestais. O estudo foi realizado na reserva extrativista do Rio Cajari, localizada no sudoeste do Amapá. Foram utilizados dados do inventário 100% realizado pela Embrapa. Desta base foram extraídas variáveis dendrométricas e de produtividade. Foi realizado a variografia para as variáveis e, posteriormente, o ajuste e seleção de modelos amplamente utilizados na literatura. Após a seleção dos modelos, foi utilizada a krigagem ordinária para interpolação em mapas temáticos. Para verificar a relação entre as variáveis com a produtividade, foi utilizado o coeficiente de desvio relativo (CDR). As populações de castanheiras apresentaram distribuições do tipo platicúrticas e concentração de árvores em classes intermediárias de diâmetro a 1,30 m do solo ( $50\text{cm} \leq \text{DAP} \leq 150\text{ cm}$ ) nas tipologias. Na FA houve maior concentração na classe 50cm - 100cm, enquanto na FD foi na de 100cm-150cm. Nas duas tipologias, as variáveis foram classificadas com dependência espacial moderada e forte. Entretanto, em FA houve maior alcance da variação da estrutura espacial, enquanto em FD o alcance caiu pela metade, revelando a forte presença de fatores aleatórios. Nos mapas de krigagem, a maior produtividade acompanha as áreas com castanhais mais densos em FA, enquanto o diâmetro médio é maior em áreas com menor densidade. Em FD, os mapas não apresentaram um padrão, as maiores classes parecem sempre ocorrer em locais específicos, nas bordas da mancha. O CDR indicou que tanto em FA quanto FD, a densidade e a área basal são os mapas mais semelhantes em relação à produtividade. Isso indica que a produtividade de castanhais na Amazônia oriental depende mais da densidade de castanheiras do que da sua capacidade produtiva individual. O tipo de distribuição observada é característico de castanhais com intensa coleta de sementes e atividades humanas. A dependência espacial encontrada em FA indica que o ambiente, com bastante iluminação direta e áreas abertas, favoreceu o desenvolvimento da espécie em tempos pretéritos. Em FD, a prática extrativista pode modificar a estrutura da floresta e perturbar, de forma positiva, o crescimento da castanheira. Os distúrbios humanos causados pela abertura de picadas, retirada de madeira, dispersão involuntária dos frutos, limpeza da base das árvores, podem ter beneficiado a castanheira, principalmente em ambiente de floresta densa.

**Palavras-chave:** Manejo florestal; extrativismo; geoestatística; PFNM.

## ABSTRACT

The brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl) is a non-timber forest resource more relevant in the south America, the species has great ecological, economic, social and cultural relevance. In southern Amapá, the species can be found in dense forests (FD) and, mainly, in open forests (FA). The forest typologies of occurrence are determinant for the growth and establishment of the brazil nut trees, because of the different availability of light and the involuntary management carried out by extractivists. The natural and human influence can modify the brazil nut trees structure, leaving a spatial signature in the landscape. Geostatistics is a tool that can help in the detection of this spatial component in the brazil nut stands, being able to express the relationship between variables and places of occurrence. Therefore, the dissertation main point was to verify the spatial dependence existence of tree and productive variables in native Amazonian brazil nut stands, comparing the responses between two forest typologies. The study was carried out in the extractive reserve of the Cajari River, located in the southwest of Amapá. Data from the 100% inventory carried out by Embrapa were used. Dendrometric and productivity variables were extracted from this base. Variography was performed for the variables and, later, the adjustment and selection of models widely used in the literature. After the models selection, the ordinary kriging was used for interpolation in thematic maps. Verifying the relationship between the variables and productivity, the relative deviation coefficient (CDR) was used. The brazil nut populations presented platycurtic distributions and tree concentration in intermediate classes of diameter ( $50\text{cm} \leq \text{DAP} \leq 150\text{ cm}$ ) in typologies. In AF there was higher concentration in the class 50cm-100cm, while in the DF it was in the 100cm-150m class. In both typologies, the variables were classified as moderate and strong spatial dependence. However, in AF there was a greater range of spatial structure variation, while in DF the range fell in half, revealing the strong presence of random factors. In kriging maps, the highest productivity follows the areas with the densest chestnut snot in AF, while the average diameter is larger in areas with lower density. In FD, the maps did not present a pattern, the largest classes seem to always occur in specific locations, on the edges of the stain. The CDR indicated that both in AF and DF, density and basal area are the most similar maps in relation to productivity. This indicates that the productivity of brazil nut trees in the eastern Amazon depends more on the density of brazil nut trees than on their individual productive capacity. The type of distribution observed is characteristic of brazil nut trees with intense seed collection and human activities. The spatial dependence found in AF indicates that the environment, with a lot of direct lighting and open areas, favored the development of the species in times of the future. In DF, extractive practice can modify the structure of the forest and positively disturb the growth of the brazil nut tree. Human disturbances caused by the opening of bites, removal of wood, involuntary dispersion of fruits, cleaning of the base of trees, may have benefited the chestnut tree, especially in a dense forest environment.

**Key-words:** Human occupation; extractivism; geostatistics; space signature, PFNM.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Castanheira-da-amazônia (<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.) e a importância do extrativismo ...</b>	<b>4</b>
<b>2.2 A ocupação e extrativismo em castanhais nativos na Resex Cajari.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Tipologias produtivas e variação da produção de castanha.....</b>	<b>8</b>
<b>2.4 Tipologias florestais e ocorrência da castanheira.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5 Geoestatística.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.1 Semivariograma .....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.2 Métodos de ajuste, seleção dos modelos e krigagem .....</b>	<b>19</b>
<b>2.5.3 Erro Médio Reduzido e Desvio Padrão dos Erros.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5.4 Grau de dependência espacial.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5.5 Krigagem.....</b>	<b>22</b>
<b>3. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....</b>	<b>23</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>28</b>
<b>Descobrimo a dependência espacial, a produtividade e relações antrópicas em castanhais nativos na Amazônia oriental.....</b>	<b>28</b>

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, os estudos arqueológicos e paleontológicos na pan-amazônia (brasileira e andina), nos ajudaram a compreender como a floresta amazônica coevoluiu com a presença humana em seu interior. O termo “floresta cultural” vem sendo introduzido no meio científico, a fim de divulgar a importância de enxergarmos a Amazônia não como um ambiente intocado, mas sim como o resultado de milhares de anos de manejo voluntário por parte de povos ameríndios, que evoluíram desde o período pleistoceno, chegando ao homem moderno.

Em meados do século XIX, os olhos do mundo se voltaram para a Amazônia brasileira, o intenso e conflituoso ciclo da borracha movimentou a economia na região e, para os povos tradicionais, era uma alternativa de introduzir uma nova fonte de renda. Entretanto, outras espécies também tinham grande interesse econômico, como a castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl), já que sua amêndoa era comercializada no Brasil e no exterior.

O ciclo da borracha impactou na migração de milhares de brasileiros, sobretudo nordestinos, para o interior das vastas e densas florestas amazônicas. No estado do Amapá, essa realidade não foi diferente, milhares de migrantes se estabeleceram na região sul do estado, onde habitavam indígenas Apalai e Waiano. Os indígenas realizam o cultivo de espécies florestais de interesse, para fins medicinais, alimentícios e para a construção de canoas para o transporte fluvial. A prática agrícola conhecida como derruba-e-queima também fazia parte da rotina dos indígenas, e tal prática também foi adotada pelos migrantes nordestinos que, com o tempo, abriram roçados na floresta e realizavam o extrativismo da castanha.

Em primórdios do século XX, as práticas agroextrativistas já eram consolidadas na região. Com a atividade econômica significativa para as famílias e, após um longo período de conflitos entre extrativistas, grileiros e grandes empresas que se estabeleceram no sul do estado, as comunidades se organizaram social e politicamente, culminando na criação da Reserva Extrativista do Rio Cajari (Resex Cajari).

Com a castanheira sendo o centro de um ambiente com diversas movimentações sociais, políticas e econômicas, é fundamental a realização de esforços por meio da pesquisa, para a compreensão da ecologia e ocorrência da espécie nas florestas habitadas

pelas comunidades tradicionais, a fim de reunir informações que possam aprimorar o manejo da espécie e potencializar a produtividade de frutos, que reflete diretamente na condição social das comunidades.

Na Resex Cajari, as castanheiras ocorrem em maior proporção nas florestas abertas, apesar da região possuir predomínio de floresta densa. Para as castanheiras, ambientes abertos são mais favoráveis à sua germinação, pois a espécie tem grande necessidade por luz e abertura do dossel, para o crescimento de sua copa. Em florestas densas, a espécie pode germinar e chegar numa altura limite como vareta (1,5 metros). Entretanto, nesse ambiente, os eventos aleatórios são fundamentais para permitir o estabelecimento da castanheira, como a abertura de clareiras devido à queda de uma grande árvore e incêndios naturais.

Apesar da característica singular de cada tipologia, é necessário considerar o fator humano na região. Quatorze comunidades realizam a coleta de frutos da castanheira anualmente e a retirada de madeira para subsistência no interior das florestas, e estas atividades causam impactos na paisagem e podem ser detectados ao longo do tempo. A abertura de ramais para transporte, a retirada de madeira, caça aos dispersores naturais e tempo de permanência dos extrativistas na floresta são as principais atividades envolvidas no manejo da castanheira.

A região da reserva possui mais de 300 castanhais registrados, onde centenas de famílias realizam a coleta de frutos e outras atividades durante décadas. Logo, podemos pensar na seguinte pergunta: a influência humana pode causar alterações na estrutura dos castanhais dentro de uma tipologia florestal, beneficiando direta e indiretamente o estabelecimento das castanheiras? Essa resposta pode ser respondida por métodos que expressem espacialmente a influência do local (posição) na ocorrência de uma variável de interesse, como a geoestatística.

A geoestatística utiliza variáveis regionalizadas para detectar o efeito da distância na variabilidade natural de uma variável, que pode ser relacionada ao solo, água e até mesmo as da floresta, como o diâmetro, altura, área basal e densidade, desde que estas ocorram de forma contínua no espaço. A lógica fundamental da teoria das variáveis regionalizadas é: valores próximos tendem a ser semelhantes e os distantes tendem a ser diferentes. Logo, o local pode ou não influenciar na variância dos dados das de variáveis interesse.

Aplicações geoestatísticas na região amazônica são escassas, devido à grande variação dos dados que, às vezes, pode mascarar a estrutura dependência espacial, ou,

gerar uma falsa dependência espacial. Entretanto, uma análise exploratória dos dados pode prever se é possível analisar os dados no contexto espacial, com a detecção de valores atípicos que confundem a real variação das informações. Logo, a geoestatística pode ser uma importante ferramenta para o estudo de castanhais nativos na Amazônia.

Compreender como os castanhais estão estruturados espacialmente pode responder perguntas relacionadas a produtividade, pois a necessidade de compreender os fatores que afetam a produção de frutos é de grande relevância para o futuro da espécie e das comunidades tradicionais. Com isso, a presente dissertação tem como principais objetivos:

- Detectar a estrutura de dependência espacial das seguintes variáveis: produtividade, produção média, densidade, área basal e diâmetro, em castanhais nativos em duas tipologias florestais: Floresta Ombrófila Aberta e Floresta Ombrófila Densa.
- Elaborar mapas de krigagem das variáveis, provenientes do processo de interpolação espacialmente conhecido como krigagem ordinária.
- Correlacionar os mapas de krigagem, a fim de verificar quais variáveis possuem maior relação com a produtividade de frutos nos castanhais nativos da Amazônia oriental.
- Buscar evidências históricas que sustentem a hipótese de que o extrativismo da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl) influencia na estrutura e formação dos castanhais, principalmente em floresta densa.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) e a importância do extrativismo

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) é uma espécie pertencente à família Lecythidaceae, é popularmente conhecida como castanha-do-pará ou castanha-do-Brasil, mas estudos antigos também revelaram nomes indígenas como *eraí* (Índios Caruchis), *iniá* (Índios Chipayas) e *tocary* (Índios Parecis) (LOUREIRO, 1979).

A sua distribuição geográfica ocorre em toda a pan-amazônia, em países como Brasil, Venezuela, Colômbia, Peru, Bolívia e Guiana. Estudos recentes apontam que a dispersão da espécie nesses países tenha origem antrópica, sendo resultado de práticas de condução da regeneração natural em sistemas de cultivo do tipo derruba-e-queima, praticado por tribos indígenas no passado (CLEMENT et al., 2010; SHEPARD; RAMIREZ, 2011; THOMAS et al., 2015), mas também sofreu influência da dispersão zoocórica de roedores.

A castanheira é uma espécie de grande porte que pode atingir mais de 60 metros de altura e 4 metros de diâmetro (ARIAS NINÁN, RONDÓN RANGEL, 2013), se desenvolve em regiões de clima tropical quente e úmido, situadas nas áreas de terra firme com solo argilosos ou argilo-arenosos, mas ocorrendo também em concrecionário laterítico (TONINI; COSTA; KAMISKI, 2008).

A polinização é feita por abelhas grandes, robustas e de língua comprida da família Apidae, pertencentes ao gênero *Bombus* (Bombini), *Centris* e *Epicharis* (Centridini), *Eulaema* (Euglossini) e *Xylocopa* (Xylocopini) (SANTOS; ABSY, 2010). Os frutos da castanheira são grandes e podem pesar até 1,5 kg, são indeiscentes e contêm um pericarpo bastante espesso e caem no chão próximo a árvore mãe (IVANOV, 2008). As amêndoas são consumidas por roedores caviomorfos do gênero *Dasyprocta* sp. (HAUGAASEN et al., 2010; MARTINS et al., 2012).

As amêndoas são ricas em proteínas, lipídios e fibras, possuem tiamina, riboflavina, niacina e vitaminas do complexo B1 e B2, além de altos teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio, são pobres em sódio e não possuem colesterol (BOUVIE et al., 2016). A amêndoa também é rica em selênio, que tem poder rejuvenescedor e aumenta

a regeneração celular, podendo aumentar a longevidade da pele. Logo, a amêndoa é muito utilizada na indústria de cosméticos.

É uma espécie com tendência a formar adensamentos regularmente extensos, intercalados por áreas de baixa densidade de indivíduos. São conhecidos pelos povos tradicionais como castanhais e são associadas a outras espécies de grande porte (SANTOS et al., 2006; SCOLES; GRIBEL; KLEIN, 2011). É considerada hiperdominante dentro da floresta e a terceira que mais contribui com o estoque de carbono na Amazônia (FAUSET et al., 2015; ANDRADE, 2017; TER STEEGE et al., 2013).

A castanheira é uma espécie de alto valor econômico, logo, obter um máximo nível de frutificação e uma mínima variação interanual são fatores desejáveis para o sucesso comercial (KAINER, 2007) e, conseqüentemente, na valorização desse recurso florestal não-madeireiro.

A produção de frutos de árvores de castanha-da-amazônia é muito variável, e os principais fatores que influenciam nessa variabilidade são: tamanho da árvore (principalmente o diâmetro do tronco – DAP); atributos da copa, posição sociológica e infestação por cipós; variações temporais inerentes a própria planta; fatores climáticos, como a precipitação; nutrição (níveis de fósforo), além de fatores genéticos e interações com polinizadores, predadores e dispersores. (BOOT; ZUIDEMA, 2002; WADT; KAINER; GOMES-SILVA, 2005; PEDROZO et al., 2015, TONINI, 2013; HELENA et al., 2015).

O extrativismo é uma atividade histórica, posterior à domesticação de plantas e animais pelo homem. A coleta e a caça sempre estiveram presentes quando os povos ainda eram nômades e esta atividade ancestral persiste principalmente em comunidades próximas aos recursos naturais, como florestas, oceanos e rios (HOMMA, 2014). Segundo estudos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) o extrativismo de PFM (Produtos Florestais Não-Madeireiros) no Brasil ainda é uma atividade que gera riqueza por meio da comercialização de uma série de produtos, de diversas categorias, que são extraídos em todo o território nacional (FIEDLER et al., 2008).

Com a morte do líder seringueiro Chico Mendes, em dezembro de 1988 no Estado do Acre, a ideia de que o extrativismo de PFM é uma das formas de preservar a floresta surge com maior frequência na literatura nacional e internacional durante esta década. Fearnside (1989) defende esta ideia e continua até hoje, como visto em Almeida et al. (2009c e 2009d), Afonso (2008 e 2012), que afirmam que o desenvolvimento do mercado

de PFNMs possibilita a geração de uma receita anual considerável para o produto interno bruto do país (PIB) e renda para as populações produtoras e a conservação do meio ambiente e manejo dos recursos naturais, conciliando desenvolvimento e preservação ambiental.

Clement (1991) afirma que para obter êxito nas tentativas de desacelerar o desmatamento, preservar a biodiversidade e garantir o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, deve-se reconhecer que é necessário mudanças radicais no nosso modelo econômico. Segundo ele, considerando o modelo econômico atual, para se alcançar a viabilidade econômica das reservas extrativistas, em longo prazo, deve ser produzida “commodities” em grande quantidade para exportação a preços competitivos no mercado nacional e internacional, ou depender do altruísmo dos consumidores "verdes".

Seguramente, com a castanheira e os demais recursos provenientes do extrativismo são fundamentais para o desenvolvimento de diversas regiões, contribuindo cada vez mais de forma significativa para o crescimento econômico e social da Amazônia.

No Estado do Amapá o extrativismo da castanha-da-amazônia justificou a criação de duas unidades de conservação de uso direto, a Reserva de desenvolvimento Sustentável (RDS) do Rio Iratapuru e a Reserva Extrativista do Rio Cajari (Resex Cajari). No entanto, são poucas as informações a respeito das tipologias florestais de ocorrência da espécie, representando uma janela no conhecimento científico a respeito da ecologia e potencial produtivo. Os esforços provenientes de diversas pesquisas na Amazônia brasileira têm sido de grande relevância para gerar alternativas de manejo florestal sustentável.

## **2.2 A ocupação e extrativismo em castanhais nativos na Resex Cajari**

Originalmente habitada por índios Waiano e Apalai, a região atraiu imigrantes, sobretudo nordestinos, para trabalharem na extração da borracha (*Hevea brasiliensis*). Com o declínio da atividade, muitos destes migrantes continuaram na floresta, em especial no sul do Amapá, passando a tirar seu sustento dos castanhais nativos da região (FILOCREÃO, 2007).

As terras da região foram submetidas à grilagem, principalmente pelo coronel José Júlio de Andrade, seringalista que durante seus mandatos de deputado e senador acumulou em manobras cartoriais a extensão de 4.356.000 hectares. A fazenda Saracura, como foi registrada, abrangia terras no Estado do Pará e no que viria a ser o Estado do

Amapá (PINTO, 2005). O coronel mantinha o controle sobre os extrativistas da região por meio de um sistema de servidão por dívida, utilizando sua milícia para garantir a cobrança (LIMA, 2008).

Em 1948 a fazenda Saracura foi comprada por um grupo português. Estes tinham como objetivo desenvolver a agricultura e parte da autonomia dos extrativistas, com os quais estabeleceram relações de troca. Em 1967, o empresário norte-americano Daniel Ludwig comprou toda a área e instalou seu ambicioso projeto Jari Celulose. O projeto consistia em um consórcio de atividades industriais, silviculturais, agropecuárias e de mineração (LINS, 1991).

Para ter o controle tantas terras, a empresa Jari criou sua própria segurança armada, que passou a perseguir a população local no exercício das atividades extrativistas dentro de seus domínios. O funcionamento do Projeto Jari causou o abandono ou a desarticulação do extrativismo tradicional e profundas transformações ambientais e sociais em uma região até então voltada à extração de produtos florestais não madeireiros (PICANÇO, 2005).

Em 1981, a empresa de Ludwig passou a ser administrada por um grupo de empresários brasileiros. Estes expandiram a produção de minérios e os plantios de pinheiros e eucaliptos para a produção de cavacos para a indústria de celulose (PORTO, 2006). O grupo procurou legitimar a situação fundiária de suas terras, até então baseada em títulos de posse. Em decisão polêmica, o Tribunal de Justiça do Estado do Pará reconheceu a solicitação da empresa e declarou-a como “proprietária legítima da fazenda Saracura” (PINTO, 2005).

Mesmo sem ter sido capaz de legitimar a propriedade para a região do Cajari, a empresa emitia autorizações escritas, outorgando concessões de uso dos castanhais aos extrativistas. O documento ressaltava que não receberiam indenizações por benfeitorias construídas, caso a empresa viesse a precisar da área. Apesar de não ter valor jurídico, foi o bastante para criar um efeito psicológico da suposta propriedade da empresa (FILOCREÃO, 2002).

Enquanto o controle da região passava de um patrão a outro, os extrativistas se politizavam, organizavam associações e conquistavam direitos. Em 1985, a associação dos extrativistas juntamente com o Conselho Nacional dos Seringueiros e o Sindicato de Trabalhadores Rurais de Macapá propuseram a criação de áreas exclusivas para as atividades extrativistas, na forma de projetos de assentamentos agroextrativistas (PAE). A demanda recebeu apoio das instituições federais responsáveis pelas políticas agrárias

(INCRA) e ambientais (IBAMA), e culminou com a criação de três PAEs no ano de 1989 e da Reserva Extrativista do Rio Cajari (RESEX Cajari) no ano de 1990 (IBAMA/SEMA-AP, 2004).

Os castanhais, colocações ou pontas de castanha são áreas de floresta com alta concentração de castanheiras produtivas com direito de uso privado e hereditário. Os limites das colocações são definidos por acidentes geográficos como vertentes, vales e igarapés, outras formações vegetais, ou espaços de floresta em que não existem castanheiras (FILOCREÃO, 2002).

A divisão dos castanhais por herança tende a diminuir o tamanho das colocações. O filho que não tem suas necessidades atendidas com a parte do castanhal que recebeu do pai emprega sua mão-de-obra e aplica a renda na ampliação dos roçados que se tornam cada vez mais importantes para as famílias residentes (SOUSA, 2006).

Em um estudo realizado em uma comunidade indígena no médio Solimões, Pereira e Lescure (1994) compararam a viabilidade econômica do extrativismo de castanha contra a renda da agricultura familiar e observaram uma tendência econômica do extrativismo de castanha contra a renda da agricultura familiar e observaram uma tendência à valorização e especialização na produção comercial, “traduzidas pela reduzida biodiversidade das roças e pela redução do período de pousio, como adequação do sistema tradicional e indígena à economia de mercado”.

### **2. 3 Tipologias produtivas e variação da produção de castanha**

Como unidade de conservação, a RESEX Cajari se enquadra na categoria de uso sustentável. Segundo o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). O objetivo da reserva é proteger os meios de vida e a cultura dessas populações, bem como assegurar o uso sustentável dos recursos naturais da unidade de conservação (BRASIL, 1990).

O extrativismo vegetal é representado por diferentes espécies, conforme a macrorregião da reserva. Os tipos de culturas plantadas pelo número total de agricultores são: mandioca e a macaxeira, laranja e limão, abacaxi, cará, batata-doce, milho, cupuaçu e arroz. Nas várzeas do baixo Cajari extrai-se andiroba, o palmito e os frutos do açaí (*Euterpe oleracea*). Nas terras firmes do alto Cajari extrai-se o cipó-titica (*Heteropsis flexuosa*), andiroba (*Carapa guianensis*) e principalmente a castanha da Amazônia (MMA, 2008).

Atualmente, a Resex Cajari possui mais de 70 mil castanheiras produtivas. A soma da produção em 2018 foi equivalente a 438 (t), ou seja, 50,11% da produção total do Estado, representando também 2,57% da produção total da região norte que foi de 31.991 (t), chegando a uma receita de R\$ 130.911,00 (IGBE, 2019).

Nos últimos anos houve grande variação da produção de castanha na região norte, o Estado do Acre apresentou uma produção de 8,7 mil (t) em 2015, uma queda de 37,7% (SOUZA & SOUZA, 2019). O Estado de Manaus produziu em 2016 quase 15 mil (t) e mesmo com uma redução de 16,3% nesse ano o estado passou a ser o maior produtor de castanha do país (PACHECO, 2018). A queda na produção na região amazônica fez o preço da lata (11 kg) subir 31%, em média de R\$ 50 para R\$ 120,00 em algumas regiões como o Acre, onde a produção caiu de 150 para 70 mil latas.

Em 2017, o Estado do Amapá teve queda de 70% na produção de frutos de castanha, foi a menor safra em 11 anos. O preço da saca de castanha com 100 hectolitros atingiu de R\$ 350 até R\$ 750, correspondendo a um aumento de mais de 100%, segundo informações da Embrapa Amapá. Os principais fatores relacionados a queda na produtividade podem ser atribuídos a oscilações e eventos climáticos extremos, redução no período de chuvas, morte de polinizadores e pragas (NOGUEIRA; SANTANA, 2018; WADT et al., 2018).

A castanheira possui alta variação na produção de frutos entre indivíduos de uma mesma população e no mesmo indivíduo entre anos diferentes (LAMBERS; CHAPIN II; PONS, 1998). Essas variações têm caráter sazonal e podem mudar de 2 a 3 anos, este fato não é considerado vantajoso por afetar diretamente o preço e a viabilidade econômica do produto (GARCIA et al., 2018).

Nos últimos anos, na região amazônica, estão sendo elaborados e executados projetos objetivando compreender a distribuição das castanheiras e as interações com as tipologias florestais onde elas estão inseridas. Um desses projetos foi o Carbono Cajari – Comunidade e Agroextrativismo da Castanha na Resex-CA, na qual a concessão dos dados foi disponibilizada para a elaboração dessa dissertação. Esse projeto foi desenvolvido no sul do Estado do Amapá e patrocinado pelo programa Petrobras Ambiental, tendo como proponente a Associação dos Trabalhadores Agroextrativistas do Alto Cajari (ASTEX-CA) e como co-executores a Embrapa Amapá e o Instituto Estadual de Florestas do Amapá.

Utilizando os dados do projeto Carbono Cajari, identificamos as principais comunidades localizadas na Resex Cajari e a respectiva capacidade produtiva dos seus

castanhais, além da densidade e produção média por árvore para o ano de 2012. O monitoramento é realizado em parcelas permanentes de 300 m x 300 m (9 ha) em cada castanhal.

Na figura 2, observamos que as comunidades que apresentaram os castanhais mais densos também tiveram maior produtividade, principalmente para as comunidades Acampamento (3000 hl) e Santarém (2700 hl), seguidos por Água Branca (2100 hl) e Sorocaba (1800 hl). Esses valores podem representar até 550 toneladas de castanha para comercialização no ano de 2012, que garantiu a subsistência dessas comunidades e movimentou a economia local.

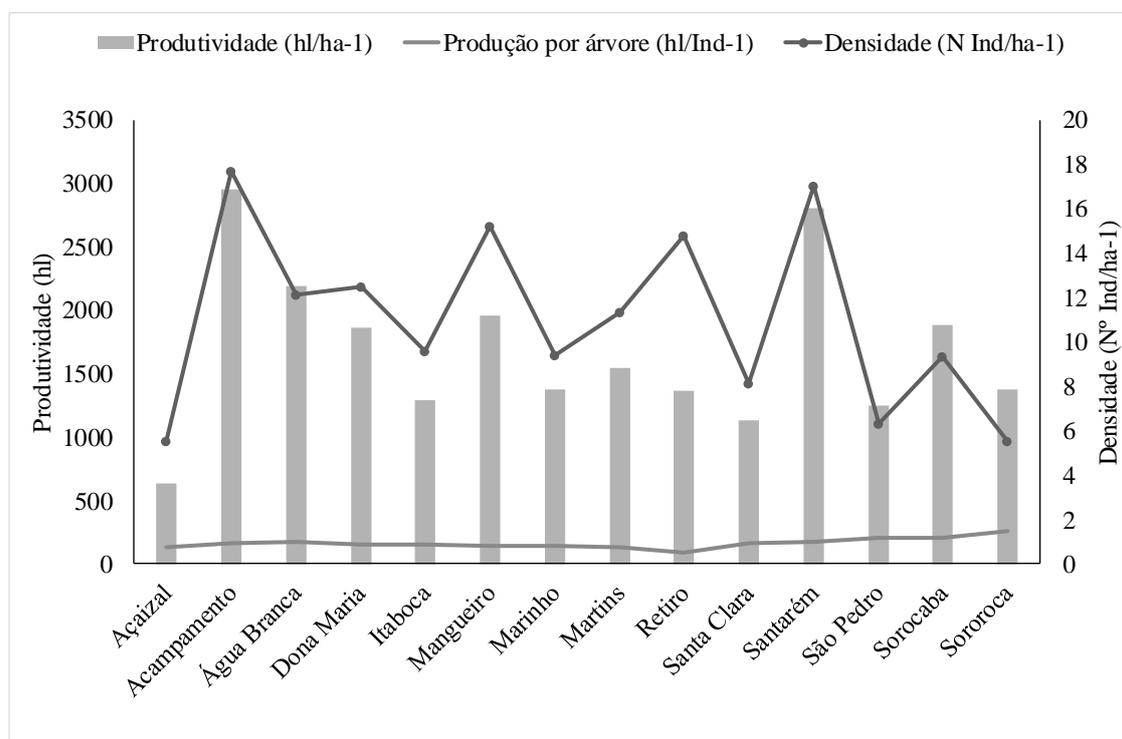


Figura 2: Valores médios de produtividade, produção média e densidade para os castanhais pertencentes às quatorze comunidades extrativistas residentes na Resex Cajari, no sul do Amapá. Os valores são referentes ao ano de 2012 e podem refletir o cenário econômico dessa parte da população que tem como o extrativismo da castanha uma das suas principais fontes de renda.

Para termos um panorama sobre a variação na produção de frutos entre os extrativistas, utilizamos dados de parcela de monitoramento da produção de frutos ao longo de 10 anos de três extrativistas da região (Figura 3). Estes são conhecidos pela região como Cláudio, K7 e Natanael, e aqui serão chamados de castanhal (P1, P2 e P3), respectivamente. Os anos em que a produtividade foi zero (0), sinaliza que o monitoramento não foi realizado.

O castanhal P2 localiza-se em área de transição (floresta-cerrado) e apresentou a maior coeficiente variação da produção de frutos entre os anos ( $CV = 68,22\%$ ). A média entre os anos foi de 773 frutos por hectare e sua máxima produtividade no período foi no ano de 2018.

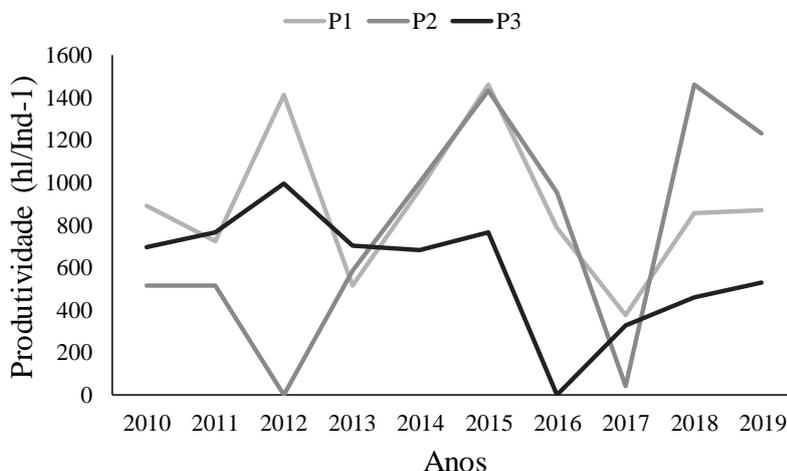


Figura 3: Variação na produtividade de frutos de castanhais nativos presentes na Resex Cajari, com foco em três produtores que participam da coleta de frutos anual junto a Embrapa Amapá (Dados disponíveis no prelo em Pastana et al., 2019).

O castanhal P3 ocorre em ambiente de floresta madura, apresentou a segunda maior variação ( $CV = 47,01\%$ ) e com a maior produção em 2012, 997 frutos por hectare. Este castanhal (P3) apresentou a menor produtividade média entre os anos avaliados, com 592 frutos por hectare. O castanhal P1, que também ocorre em ambiente de floresta madura, apresentou a menor variação entre os anos ( $CV = 36,62\%$ ), com a maior média de produção anual, chegando a 886 frutos por hectare.

Ainda na Figura 3, foi possível observar um padrão de 2 anos na produtividade. Após um período de queda, em 2012 houve um aumento na produtividade, com exceção do castanhal P2. Houve um aumento para todos os castanhais em 2015, seguido de uma nova queda em 2017. Até 2019, a produtividade tende a aumentar. Estes resultados já são esperados e foram observados em diversos castanhais em toda a Amazônia.

Na Figura 4 abaixo, são apresentados a média de produção individual das castanheiras, para os mesmos castanhais em acompanhamento. Nota-se que a produção seguiu o padrão anterior, com o aumento e diminuição da produção a cada 2 anos. Entretanto, a partir de 2015 a produção individual teve uma queda considerável e ainda parece se “reerguer” até o ano de 2019. Este resultado pode estar associado as flutuações climáticas que aconteceram na época, com a ocorrência de um forte El Niño,

que resultou em uma seca generalizada na região Amazônia, afetando árvores de grande porte como a castanheira.

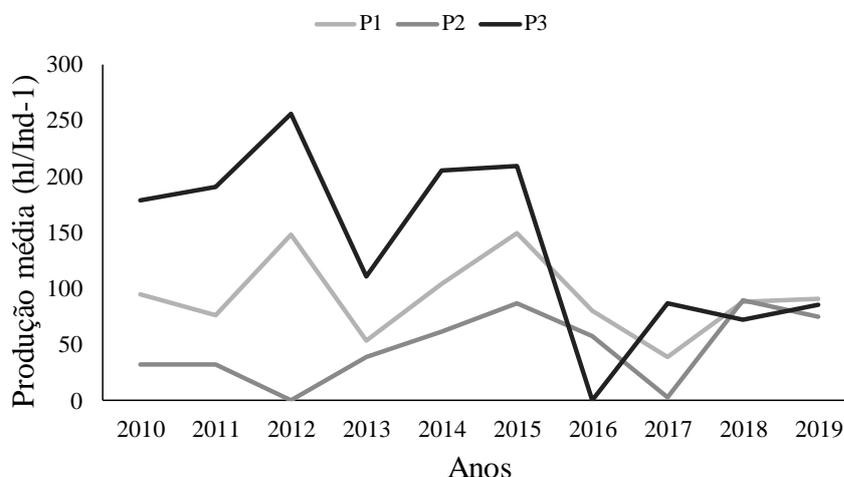


Figura 4: Variação na produção média individual das castanheiras no período monitorado, em castanhais nativos da Resex Cajari (Dados disponíveis no prelo em Pastana et al., 2019).

## 2.4 Tipologias florestais e ocorrência da castanheira

A extensa área da reserva extrativista do rio cajari pode ser dividida em três macrorregiões que coincidem aproximadamente com a cota topográfica e seus domínios florestais.

O baixo Cajari recebe influência do estuário amazônico, é coberto por floresta densa aluvial (várzeas) e formações pioneiras com influência aluvial ou lacustre (campos inundáveis). O médio Cajari é representado pelas áreas de contato florístico, com predomínio de floresta ombrófila densa das terras baixas, floresta ombrófila aluvial e savana parque sem floresta de galeria (campos naturais). No alto Cajari, onde ocorrem as castanheiras, predominam a floresta ombrófila densa submontana, a floresta ombrófila aberta e, na região noroeste, uma extensão de savana graminho-lenhosa ou florestada (cerrados) (IBGE, 2004).

Apesar da importância ecológica e socioeconômica da castanheira, ainda é necessário preencher janelas sobre os locais de ocorrência e desenvolvimento da espécie. Obter informações sobre como os castanhais se estabelecem, quais relações que estes

podem ter com diferentes tipologias florestais são questões relevantes para a comunidade científica.

Ainda não existe consenso sobre quais as tipologias florestais podem ser determinantes para a ocorrência da espécie. Acredita-se, ainda, que a castanheira só ocorre em florestas primárias conservadas, enquanto os resultados encontrados por (PAIVA et al., 2011; GUEDES et al., 2014) mostram que a espécie pode colonizar áreas abertas e possui elevada abundância em florestas secundárias, além de áreas de transição com o cerrado.

Ainda com o banco de dados do projeto Carbono Cajari, foi possível obter alguns resultados preliminares em relação a ocorrência dos castanhais por tipologia florestal, conforme a figura (1) abaixo. Dos castanhais mapeados na região, 48,38% ocorreram em ambiente de floresta ombrófila aberta (Asc); 15,16% em floresta ombrófila densa das terras baixas com dossel emergente (Dbe); 25,16% em floresta ombrófila densa submontana com dossel emergente (Dse); 8,06% em floresta ombrófila aberta submontana com dossel uniforme (Dsu) e 3,22% ocorreram em savana parque sem floresta-de-galeria (Sps). Ao todo foram 310 castanhais estudados na reserva Cajari. As simbologias foram padronizadas pelo banco de dados do instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE).

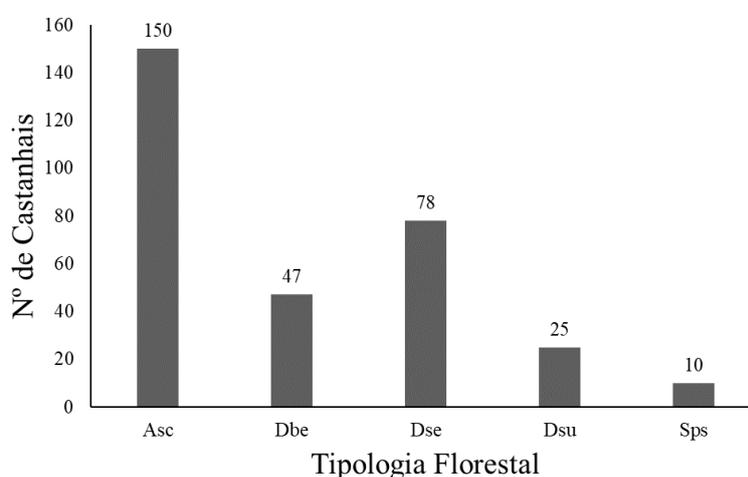


Figura 1: Número de castanhais estabelecidos por tipologia florestal, na reserva extrativista do Rio Cajari (Resex Cajari) no sul do Amapá.

Nota-se que, as proporções de castanhais em floresta densa (Dbe, Dse e Dsu), se somadas, igualam a proporção de castanhais em floresta aberta (48,38%). Logo, é possível verificar uma preferência pelo estabelecimento dos castanhais em florestas mais

abertas. Entretanto, ainda são poucos os estudos relacionando os locais de ocorrência da espécie com a produtividade e estrutura arbórea dos castanhais a nível de tipologia.

Devido a ocorrência da espécie a nível de tipologia, este processo pode deixar uma “assinatura espacial” ao longo da paisagem, que pode ser analisada por métodos espaciais. Compreender o comportamento da castanheira entre populações e a matriz florestal de ocorrência sempre gerou perguntas entre os cientistas. Os estudos espaciais envolvendo a espécie no contexto espacial surgiram com (GUERREIRO et al., 2017; BATISTA et al., 2019), mas ainda há a necessidade de buscar compreender essas relações a nível de tipologia.

A presente dissertação pode analisar o comportamento espacial dos castanhais nativos no sul do Amapá. É uma das etapas cruciais para estabelecer uma compreensão mais aprofundada da ecologia das castanheiras entre a sua floresta de entorno. Esse fato torna-se mais expressivo quando se trata de uma grande extensão da reserva extrativista, e que trabalhos retratando o tema são escassos até o momento. Além do mais, o retorno proporcionado pelo manejo adequado da espécie é importante, ao exercerem funções reguladoras dos recursos florestais.

## **2.5 Geoestatística**

Em meados do século XX, o engenheiro de mina Daniel G. Krige e o estatístico H. S. Sichel trabalharam com dados de mineração de ouro na África do sul. Eles observaram que os valores estimados quando comparados com os dados obtidos após a exploração da jazida, não eram coerentes com aqueles calculados pelos estimadores clássicos. Diante deste problema, eles verificaram que os dados apresentavam uma estruturação e constataram a necessidade de considerar as distâncias entre as amostras para melhoria das estimativas das concentrações do minério e, sendo assim, aplicaram a média móvel para mitigar o efeito dos erros de estimativa. Posteriormente, G. Matheron, no início dos anos 60, na França, abonou tratamento formal, pelo nome de Geoestatística, para seu estudo das chamadas variáveis regionalizadas, ou seja, variáveis com condicionamento espacial (CLARK, 1979).

Conforme a Teoria das variáveis regionalizadas, cada dado é modelado como uma variável aleatória, que pode ser expressa pela soma de três componentes: componente estrutural associado a um valor médio constante ou a uma tendência; um componente aleatório espacialmente estruturado; e um erro aleatório.

A geoestatística apresenta várias técnicas usadas para análise e inferência de uma variável espacialmente estruturada (variáveis regionalizadas). Considera a localização geográfica e a dependência (ou auto-correlação) espacial entre amostras (ALMEIDA; GUIMARÃES, 2016). Assim, os mapas temáticos, construídos para as variáveis regionalizadas, são de grande importância para a avaliação do comportamento da variável na área de estudo. O estudo geoestatístico possui um grande potencial, pois com o conhecimento da amplitude da dependência entre as amostras é possível planejar de maneira mais eficaz a implantação de zoneamento de áreas.

Na análise exploratória de dados espaciais, Ribeiro Jr. (1995) destaca que o gráfico *box-plot* é um método para a avaliação da característica descritiva dos dados. Nesse tipo de gráfico, cada parcela do experimento está classificada segundo os valores correspondentes aos seus inter-quartis (mínimo até 1º quartil; 1º quartil até mediana; mediana até 3º quartil; 3º quartil até valor máximo). Desse modo, são definidos quatro intervalos em que aparecem concentrações de tonalidades iguais, indicando a existência de sub-regiões no mapa.

Utilizando métodos geoestatísticos, é possível extrair da distribuição dos dados da variável regionalizada, uma imagem da sua variabilidade e uma medida da correlação existente entre os valores tomados em pontos distintos no espaço. Esse método é conhecido como análise da estrutura espacial dos dados. A geoestatística possibilita também o estudo da estrutura de dependência espacial utilizando, dentre outros, os métodos analíticos como o da máxima verossimilhança e o bayesiano (DIGGLE; RIBEIRO JR., 2001).

Conforme Isaaks e Srivastava (1989), o semivariograma é o método geoestatístico utilizado para diagnosticar a presença da correlação espacial entre as unidades amostradas. Para caracterizar a estrutura de continuidade espacial, pelo semivariograma, deve-se considerar que a variância das diferenças entre dois pontos amostrais, depende apenas da distância que separa os pontos (hipótese intrínseca), sendo a mesma para toda a área avaliada (estacionaridade) (VIEIRA, 2000; JOURNAL; HUIJBREGTS, 2003; MELLO et al., 2005).

### **2.5.1 Semivariograma**

O semivariograma, definido como o gráfico da função semivariância *versus* a distância  $h$ , é uma técnica usada para medir a dependência entre pontos amostrais,

distribuídos segundo um sistema espacial de referência e para a interpolação de valores necessários à construção de mapas de isolinhas (ÁVILA, 2010).

A semivariância é uma função de distância  $h$ , que é estimada somente em um conjunto discreto de distâncias (*lags*). A partir dessa estimativa, ajusta-se um modelo que depende de parâmetros desconhecidos a serem determinados e com características espaciais (MOTA, 2008), conforme equação (1). Em termos práticos, é a técnica estatística que permite estudar a dispersão natural das variáveis regionalizadas. Cada semivariograma construído para uma direção fixa é chamado de semivariograma direcional.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que  $Z(x_i)$  é o valor da variável medida, e  $(h)$ , a distância que separa duas amostras. Assim, o semivariograma experimental é um gráfico de dispersão de  $\gamma(h)$  em função de  $h$  que permite uma análise variográfica do comportamento de  $Z(s)$ .

Para Mc Bratney & Webster (1986) a técnica mais usada para descrever a dependência espacial na Geoestatística é o semivariograma, o qual descreve a associação espacial dos pontos amostrais em função das distâncias entre eles. É uma técnica exploratória que auxilia os métodos geoestatísticos, contribuindo na modelagem da dependência espacial, determinando os parâmetros básicos do modelo: alcance, efeito pepita e patamar. Conforme Teixeira (2013) os principais estimadores utilizados na construção de semivariogramas são os de Matheron, Cressie e Hawkins, Pairwise e New1 e New2.

Segundo Faraco (2008), o semivariograma teórico é aquele que tem suas propriedades conhecidas, as quais são aproveitadas na análise do semivariograma. Os variogramas têm de ser definidos positivos, para que se tenham soluções no processo de Krigagem. Esta condição limita a escolha dos modelos teóricos a um conjunto de funções autorizadas. Dentre os distintos modelos teóricos existentes sobressaem-se: o semivariograma esférico, exponencial e gaussiano, que são comumente usados na literatura.

**Modelo esférico:** Segundo Andriotti (2003), este é o modelo mais comumente utilizado nas variáveis em geociências. Apresenta um crescimento rápido na origem, onde tem um comportamento linear, conforme a equação 2 abaixo.

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ \frac{3}{2} \left[ \frac{h}{a} \right] - \left[ \frac{1}{2} \right] \left[ \frac{h}{a} \right]^3 \right] \quad \text{Se } h \leq a \text{ Eq. (2)}$$

**Modelo exponencial:** Este modelo apresenta comportamento linear na origem. O alcance tem significado puramente analítico, sendo o patamar alcançado pela curva de forma assintótica, ou seja, teoricamente, quando  $h$  tende a infinito (ANDRIOTTI, 2003), conforme equação (3) abaixo. Apesar de o modelo crescer junto na origem mais rápido que o modelo esférico, as estruturas apresentam uma maior continuidade espacial, isto é, maiores prolongamentos, resultantes das maiores correlações espaciais a grandes distâncias de  $h$ .

$$\gamma(h) = C_0 + C \left( 1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) \quad \text{Eq. (3)}$$

**Modelo gaussiano:** Tem comportamento parabólico nas vizinhanças da origem e reflete em grande continuidade da variável estudada, devido ao seu crescimento suave (Equação 4) O modelo gaussiano é um modelo transitivo, muitas vezes utilizado para modelar fenômenos extremamente contínuos.

$$\gamma(h) = C_0 + C \left( 1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right) \quad \text{Se } h \leq a \text{ Eq. (4)}$$

Conforme Ávila (2010) o objetivo fundamental de um estudo estrutural ou estudo de semivariograma é decidir qual o semivariograma teórico que melhor se ajusta ao semivariograma experimental, de tal modo que a partir deste modelo teórico, possam ser feitas inferências em relação ao semivariograma verdadeiro.  $C_0$

Vieira (1998) destaca que o ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes da Teoria das Variáveis Regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambiguidades e polêmicas nessas aplicações. O estudo da estrutura espacial dada pela análise da função de semivariância, utilizando o semivariograma, não constitui o objetivo final da análise espacial. É necessário estimar os valores em locais não amostrados, para se obter o conhecimento da distribuição espacial da variável regionalizada. Dessa forma, a análise da estrutura de dependência espacial deve ser vista como um passo fundamental que precede as técnicas de estimação de qualquer valor em qualquer posição da área de estudo (VIEIRA; CARVALHO, 2001).

Na figura 5 é ilustrado um semivariograma que apresenta características ideais. Como medições mais próximas umas das outras devem ser mais parecidas do que aquelas separadas por grandes distâncias,  $\gamma(h)$  aumenta à medida que  $h$  cresce, até atingir um valor máximo no qual se estabiliza. O valor de  $h$  no qual  $\gamma(h)$  se estabiliza é chamado alcance ( $a$ ) que é o raio de dependência espacial. Embora, por definição, seja igual à zero para  $h$  igual a zero, na prática é comum que, à medida que  $h$  tende a zero,  $\gamma(h)$  se aproxime de um valor positivo. Tal valor positivo, usualmente denotado por  $C_0$ , é conhecido como efeito pepita (nugget effect), que representa erros de medição ou de variabilidade em pequena escala (BASTOS, 2017).

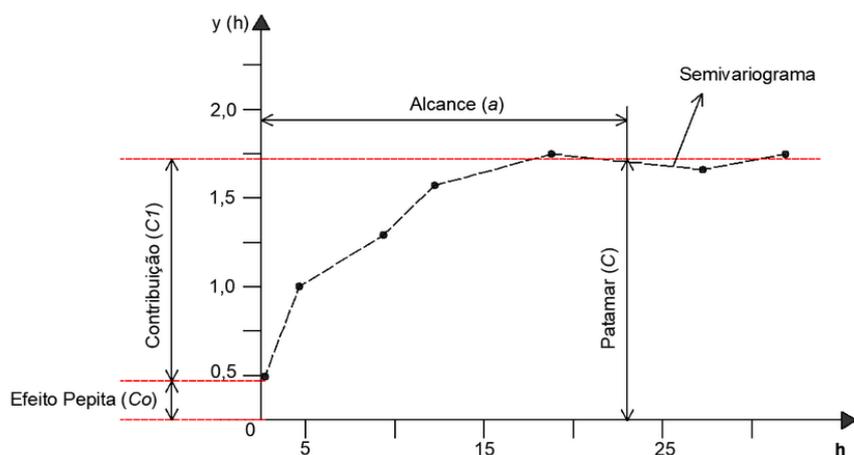


Figura 5: Semivariograma experimental e seus respectivos parâmetros.

O patamar ( $C$ ), o alcance ( $a$ ) e o efeito pepita ( $C_0$ ) são os parâmetros do semivariograma, isto é, são os parâmetros, por meio dos quais, em conjunto com o modelo ajustado, busca-se quantificar a dependência espacial da variável regionalizada em estudo.

O patamar ( $C$ ) representa o valor máximo no qual  $\gamma(h)$  estabiliza, tornando-se independente à variação de  $h$ . Esse valor de  $h$  é representado pelo alcance ( $a$ ) e é um parâmetro importante no estudo da variabilidade espacial, pois é a distância limite na escolha entre utilizar a geoestatística e a estatística clássica (SEIDEL e OLIVEIRA, 2014). Nas distâncias menores que o alcance, as observações amostrais são espacialmente dependentes e usa-se a Geoestatística. Para as distâncias maiores que o alcance, pode-se considerar que os dados são independentes, encaixando-se perfeitamente nas hipóteses da estatística clássica.

## 2.5.2 Métodos de ajuste, seleção dos modelos e krigagem

### Métodos dos Quadrados Mínimos Ordinários e Quadrados Mínimos Ponderados

Os estimadores baseados nos princípios dos quadrados mínimos são um dos mais utilizados em estatística (Bussab & Moretin, 2002) e foram introduzidos por Gauss em 1809. O método consiste na obtenção dos parâmetros de um modelo que minimizam a soma do quadrado da diferença entre os valores reais e observados, como podemos ver na equação (5) abaixo:

$$Q(\theta) = \sum_{i=1}^k [\hat{g}(h_i) - \gamma(h_i; \theta)]^2 \quad \text{Eq. (5)}$$

em que  $\theta$  representa o vetor de parâmetros estimados que definem completamente o semivariograma, sendo cada estimativa denotada por  $\hat{g}(h_i)$  e  $k$  refere-se ao número de “lags” do semivariograma experimental. A quantidade  $\gamma(h_i; \theta)$  é a semivariância calculada pelo modelo e depende dos parâmetros estimados  $\theta$  e após minimização, a função  $\hat{g}(h_i)$  se torna a estimativa  $\hat{y}(h_i)$  de quadrados mínimos. A divisão do erro quadrático pelo número de pares de pontos em cada distância do semivariograma  $m(h_i)$ , conforme David (1977), implica na seguinte expressão:

$$Q(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^k [\hat{g}(h_j) - \gamma(h_j; \theta)]^2}{m(h_i)} \quad \text{Eq. (6)}$$

Com isso, é possível ponderar a semivariância, uma vez que tal ponderação não é conhecida. Este procedimento sumariza o que é conhecido como Método dos Quadrados Mínimos Ponderados e o ajuste dos modelos teóricos ocorre no semivariograma experimental.

### Método da Máxima Verossimilhança

Este método de ajuste é utilizado com frequência devido suas propriedades assintóticas (Wonnacott & Wonnacott, 1972). A ideia central desse método é obter a partir de uma amostra o estimador mais verossímil (semelhante com a verdade) dos parâmetros de um modelo probabilístico. Considerando as observações de uma variável qualquer ( $Z_1, \dots, Z_n$ ) obtidas a partir de um modelo linear gaussiano, a variável em questão pode ser explicada pela soma de três componentes, conforme expresso abaixo:

$$Z_i = \mu(x_i) + S(x_i) + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad \text{Eq. (7)}$$

Na equação (7),  $\mu(x_i)$  é uma componente completamente determinística e é determinada pelo modelo linear:

$$\mu(x_i) = \sum_{k=1}^p f_k(x_i)\beta_k \quad \text{Eq. (8)}$$

onde,  $(f_1, \dots, f_p)$  é um conjunto de  $p$  funções que descrevem deterministicamente a variável  $Z$  a partir das coordenadas espaciais  $(x_i, \dots, x_n)$ . Nesta mesma equação,  $S(x_i)$  é uma componente aleatória entendida como um processo estocástico gaussiano autocorrelacionado. A esperança de  $S(x_i)$  é igual a zero e a variância constante ( $\sigma^2$ ). Esta componente é que confere continuidade espacial aleatória à variável  $Z$ , isto é,  $S(x)$  é que possui a correlação espacial. A correlação espacial entre dois pontos segue uma função autorizada, para qual no presente trabalho, foram avaliados os modelos exponenciais e Matérn. A componente  $\varepsilon_i$  é a parte totalmente aleatória do modelo, sendo  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$  independentes, identicamente distribuídos, com média zero e variância  $\tau^2$ , denominada de nugget ou efeito pepita (Diggle & Ribeiro Júnior, 2000).

### Seleção de Modelos

No passado, o ajuste do semivariograma era feito visualmente, e por esta razão era chamado de “ajuste a sentimento”. Entretanto recomenda-se que sejam realizadas algumas técnicas existentes que ajudam na adequação da escolha de um modelo.

As técnicas de autovalidação consistem em fazer comparações entre os valores amostrados e os valores estimados provenientes das interpolações espaciais.

Vieira (2001) afirma que, na análise geoestatística, existe sempre certo grau de incerteza sobre as hipóteses assumidas ou sobre os parâmetros ajustados nos modelos utilizados e tal incerteza é o erro de estimativa. O erro de estimativa pode ser avaliado pelo procedimento de autovalidação ou “Jack-Knifing”. Essa técnica consiste em ignorar, um por um, cada valor já amostrado e predizer um valor interpolado pela técnica de Krigagem, utilizando-se de um modelo proposto. Segundo esse mesmo autor, a execução do “jack-knifing” permite verificar se a Krigagem é mesmo representativa da variabilidade e se as hipóteses assumidas são verdadeiras. Então, pode-se escolher o melhor modelo, dentre os modelos propostos, comparando os valores preditos e amostrados por meio de diferentes procedimentos. A seguir apresentam-se dois deles:

### 2.5.3 Erro Médio Reduzido e Desvio Padrão dos Erros

Com os valores estimados provenientes da autovalidação e os dados amostrados, pode-se conhecer a variância total da estimativa, isso permite o cálculo do erro de estimação, o Erro Médio. O erro médio indicará a eficácia do ajuste dos modelos de semivariograma, baseando-se no fato de que os erros, provenientes do processo de Krigagem otimizado, apresentam média nula e variância mínima (AMARAL, 2010). A equação (9) se refere ao cálculo do erro médio reduzido.

$$EMR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z(x_i) - z^*(x_i)}{\sigma_i(x_i)} \right\} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde  $\sigma_i(x_i)$  é o desvio padrão da Krigagem na posição  $x_i$ , não sendo considerada a observação  $Z(x_i)$ . O  $z^*(x_i)$  se refere ao valor estimado pelo modelo espacial na posição  $(x_i)$ . Outro parâmetro importante, para as análises de qualidade de modelos de semivariograma por meio da autovalidação, é o desvio padrão dos erros, obtido pela equação (10):

$$DEM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(Z(x_i) - z^*(x_i))^2}{\sigma_i(x_i)} \right\}} \quad \text{Eq. (10)}$$

Dentre os modelos testados, o de melhor desempenho é aquele que teve o EMR próximo de zero e o DEM próximo de 1 (GARCIA, 2015).

### 2.5.4 Grau de dependência espacial

O pesquisador geoestatístico, na observação do semivariograma modelado, pode determinar o grau de dependência espacial da variável em estudo. O grau de dependência espacial (GDE - Equação 11), segundo Biondi et al. (1994), é simples e diretamente a razão entre a variância espacial  $C$  e o patamar  $C_0 + C_1$ , dado em porcentagem.

$$GDE\% = \left( \frac{C}{C_0 + C} \right) \times 100 \quad \text{Eq. (11)}$$

Os autores classificam o GDE da seguinte maneira: Fraco até 25%; moderado entre 25 e 75% e maior que 75% como Forte.

### 2.5.5 Krigagem

Segundo Gaetan e Guyon (2009), o ponto central da geoestatística é a predição de  $Z(x_i)$  em toda região de estudo  $R$  utilizando apenas um número finito de observações. Para Franklin (2019), a Krigagem é um método de predição espacial para pontos não amostrados que se utilizam das observações já amostradas e de seus respectivos pesos. Pesos que são atribuídos baseados nas distâncias entre o ponto estimado e seus vizinhos e na própria distância entre esses vizinhos, de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma. Ou seja, o interpolador que utiliza um modelo espacial previamente ajustado ao semivariograma em suas estimativas é conhecido como Krigagem.

Para Vieira (2001), a Krigagem se diferencia de outros métodos de interpolação pela maneira como atribui pesos às amostras. Por exemplo, na interpolação linear simples, os pesos são todos iguais a  $1/n$  (sendo  $n$  o número total de amostras). Já na interpolação pelo Inverso do quadrado da distância, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o ponto a ser interpolado dos valores amostrados. A Krigagem é um estimador de média móvel ponderada, seus pesos são determinados pela análise espacial baseada no modelo espacial ajustado para o fenômeno estudado. Tal estimador é considerado ótimo pela maneira como os pesos são distribuídos. A forma mais conhecida da família de Krigagem é a Krigagem Ordinária.

A Krigagem ordinária (KO) não requer conhecimento prévio da média. Em vez de assumir que a média é constante em todo o domínio, pode-se assumir que ela é constante na vizinhança local de cada ponto de estimação, desde que se defina adequadamente a vizinhança local. Franklin (2014) afirma que, no caso de se trabalhar com processos de estacionariedade intrínseca, com uma média constante desconhecida e sem presença de tendência, usa-se a interpolação da Krigagem ordinária, cujo estimador é representado na equação (12):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad \text{Eq. (12)}$$

$w_i$  são os pesos de krigagem definidos conforme o modelo espacial e a distância entre os observados e aquele a ser estimado.,  $Z(x_i)$  valores observados na amostra e  $Z^*(x_0)$  o valor a ser estimado. Como já foi dito sobre as Krigagens, deseja-se trabalhar com os melhores estimadores não viesados. Assim encontrasse o best linear unbiased predictor (BLUP) pela minimização da variância do erro e pela condição de não viés. Para

que a KO seja otimizada, seu estimador não pode ser tendencioso e deve ter variância mínima.

### **3. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

No presente trabalho foi observado que os castanhais nativos da Amazônia possuem uma estrutura de dependência espacial, tanto em floresta ombrófila aberta quanto em floresta ombrófila densa, para todas as variáveis estudadas: diâmetro, densidade, área basal e variáveis produtivas (produtividade e produção média). Esse resultado é inédito e revela que a geoestatística pode ser uma aliada no estudo da castanheira, uma vez que, de acordo com a literatura, os castanhais em toda Amazônia compartilham semelhanças estruturais, devido ao histórico extrativista.

O ambiente de floresta aberta apresentou maior potencial para o estabelecimento da castanheira, por apresentar castanhais mais densos, produtivos e com maior ocorrência de indivíduos jovens. Além das características favoráveis dessa tipologia para a ocorrência da castanheira (maior disponibilidade de luz), também foi observado uma forte intervenção humana nesta tipologia. As evidências históricas encontradas revelaram ramais no interior da floresta, que conectam a principal via de acesso a Resex Cajari (BR 156) as comunidades. Ramais que antigamente eram usados pelos extrativistas do passado e que hoje estão abandonados, mostram a dinâmica dos extrativistas para a coleta e transporte dos frutos de castanha.

Foi constatado que para a maior produtividade de frutos, em ambas as tipologias, é necessária uma maior densidade de castanheiras. O mapa de krigagem da densidade apresentou maior correlação espacial com a produtividade do que com qualquer outra variável. Entretanto, para a floresta densa, a produção individual se mostrou mais presente do que a produtividade por hectare, devido a menor densidade de castanheiras e maior proporção de indivíduos em estágio de vida reprodutivo.

## REFERÊNCIAS

- A.; SILVA, M. F. DA; ALENCAR, J. DA C. Essências madeireiras da Amazônia. Manaus: INPA, v.1, p. 103, 1979.
- ARIAS NINÁN, E.; RONDÓN RANGEL, J. Manejo Florestal de *Bertholletia excelsa* HBK (castaña o nuez de Brasil). v. 25, n. 1, p. 93–113, 2013.
- ANDRADE, V. A história humana através dos padrões de recrutamento e trajetórias de crescimento de *Bertholletia excelsa* em um castanhal na Amazônia Central. Dissertação de Mestrado, INPA, 2017.
- ALMEIDA, A. N.; BITTENCOURT, A. M.; SANTOS, A. J.; EISFELD, C. L.; SOUZA, V. S. Evolução da produção e preço dos principais produtos florestais não madeireiros extrativos do Brasil. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 3, p. 282-287, jul./set. 2009c.
- ALMEIDA, A. N.; ÂNGELO, H.; SILVA, J. C. G. L.; NUÑEZ, B. E. C. Análise econométrica do mercado de madeira em tora para o processamento mecânico no Estado do Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 377-386, dez. 2009d.
- AFONSO, S.R. Análise Sócio-Econômica da Produção de Não-Madeireiros no Cerrado Brasileiro e o Caso da Cooperativa de Pequi em Japonvar, MG. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2008.
- AFONSO, S. R. A política pública de incentivo à estruturação da cadeia produtiva do pequi (*Caryocar brasiliense*). 2012. 162 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2012.
- ALMEIDA, L. S., GUIMARÃES, E. C. Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo, na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 195 - 203, 2016.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. & SILVA, A. M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.**, v. 14, p. 1257-1266, 2010.
- ANDRIOTTI, J. L. S. Fundamentos de estatística e Geoestatística. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p. (Coleção Manual Universitário).
- AMARAL, L. P. Geoestatística na caracterização do solo e da vegetação em floresta ombrófila mista. 2010. 133 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2010.
- BOUVIE, L; BORELLA, D. R; PORTO, P. A. O; SILVA, A. C; LEONEL, S. Caracterização físico-química dos frutos de castanheira do Brasil. **Nativa**, v. 4(2), p. 107-111, 2016.
- BOOT, G. A.; ZUIDEMA, P. A. Demography of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) in the Bolivian Amazon: impact of seed extraction on recruitment and population dynamics. **Journal of tropical ecology**, v. 18, p. 1–31, 2002.

BATISTA, A. P. B., SCOLFORO, H. F., MELLO, J. M., GUEDES, M. C., TERRA, M. C. N. S., SCALON, J. D., GOMIDE, L. R., SCOLFORO, P. G. V., & COOK, R. L. Forest Ecology and Management Spatial association of fruit yield of *Bertholletia excelsa* Bonpl. trees in eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 441, p. 99–105, 2019. doi: 10.1016/j.foreco.2019.03.043.

Brasil, Ministério de Meio Ambiente (MMA). Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). 2017. Serie: Legislação ICMBio - Sistema Nacional de Unidades de Conservação. v. 1.

BRASIL (1990) Decreto N° 99.145 de 12 de março de 1990, Criação da Reserva Extrativista do Rio Cajari.

BASTOS, R. L. Métodos para seleção de modelos de semivariograma em campos aleatórios gaussianos. 2017. 136 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

BIONDI, F.; MYERS, D.E.; AVERY, C.C. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal Forest Research**, v. 24, p. 1354-1368, 1994.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. Estatística básica. 5.ed. São Paulo: Saraiva, 2002. 526p.

CLEMENT, C. R.; CRISTO-ARAÚJO, M., D'EECKENBRUGGE, G. C.; PEREIRA, A. A; PICANÇO, R. D. Origin and domestication of native Amazonian crops. **Diversity**, v. 2, p. 72-106, 2010.

CLEMENT, C.R. Economic Models for ecology. **BioScience**, v, 41, No. 8 (Sep., 1991), pp. 530-531.

CLARK, I. Practical geostatistics. London: **Applied Science Publishers**, 130 p, 1979.

DE SOUZA, L. G.; DE SOUZA, M. R. Crescimento da produção de açaí e castanhado-brasil no acre. *Revista de Administração e Negócios da Amazônia*, v. 10, n. 3, p. 157-171, 2019.

DAVID, M. Geostatistical ore reserve estimation. Amsterdam: **Elsevier**, 1977. 205p.

DIGGLE, P.J.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Model-based geostatistics. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 14., Caxambú, 2000. Resumos, Caxambú: Associação Brasileira de Estatística, 2000, p.192.

FAUSET, S.; JOHNSON, M.O.; GLOOR, M.; BAKER, T.R.; MONTEAGUDO, M.A.; BRIENEN, R. J et al. Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. **Nature Communications**; p, 6: 6857, 2015.

FILOCREÃO, A. S. M. Extrativismo e Capitalismo na Amazônia: a manutenção, o funcionamento e a reprodução da economia extrativista do sul do Amapá. Macapá: Secretaria do Estado do meio ambiente. 2002.

FILOCREÃO, A. S. M. Agroextrativismo e capitalismo na Amazônia: as transformações recentes no agroextrativismo do Sul do Amapá. 2007. 541f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Socioambiental) - Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

FIEDLER, N. C.; SOARES, T. S.; SILVA, G. F. da. Produtos Florestais Não Madeireiros: Importância e Manejo Sustentável da Floresta. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v.10, n. 2, p.16, 2008.

FEARNSIDE, P. M. Extractive Reserves in Brazilian Amazonia. **BioScience**; v. 39, Ed. 6, pp. 387-393, 1989.

FARACO, M. A. URIBE-OPAZO, M. A. ALVES DA SILVA, E. A. JOHANN, J. A. BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, 2008.

FRANKLIN, M. Solution to ordinary and Universal Kriging Equations. Disponível em: Acesso em: <<http://www-hsc.edu/~mereditf/krigingEquations.pdf>> 18 jan. 2019.

G. H.; RAMIREZ, H. “Made in Brazil”: Human Dispersal of the Brazil Nut (*Bertholletia excelsa*, Lecythidaceae) in Ancient Amazonia. **Economic Botany**, [s. l.], v. 65, n. 1, p. 44–65, 2011.

GARCIA, T. J. F. Geoestatística aplicada às normais climatológicas de temperaturas médias compensadas no Brasil. 2015. 67 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

GAETAN, C.; GUYON, X. Spatial statistics and modeling. New York: **Springer**, p. 302, 2010.

GUEDES, M. C., E. DE S. NEVES, E. G. RODRIGUES, P. PAIVA, J. B. P. C. COSTA, M. F. FREITAS, AND L. M. DE LEMOS. “Castanha na roça”: expansão da produção e renovação dos castanhais em áreas de agricultura itinerante no Amapá, Brasil “Castanha na roça”: increasing yields and renewing Brazil nut stands through shifting cultivation in Amapá State, Brazil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.** v. 419, pp. 381–398, 2014.

GUERREIRO, Q. L. M., JÚNIOR, R. C. O., SANTOS, G. R.; RUIVO, M. L. P., BELDINI, T. P., CARVALHO, E. J. M., SILVA, K. E., GUEDES, M. C., & SANTOS, P. R. B. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12(4), p. 237-250, 2017. doi: 10.5897/AJAR2016.11766.

GARCIA, W. S.; SANTANA, A.C.; NOGUEIRA, A. K. M.; MARTINS, C. M. Demanda de produtos não madeireiros: o caso do açaí e da castanha-do-pará. *RAMA: Revista em agronegócio e meio ambiente*, v.11, p.1039 - 1059, 2018.

HAUGAASEN, T.; TUCK HAUGAASEN, J. M. Cache pilferage may be prominent in neotropical forests. *Mammalia*, v. 74: p. 423-425, 2010.

HELENA, L. Corte de cipós em castanheiras como tratamento silvicultural para aumentar a produção de frutos. Comunicado técnico 400, p. 3–6, 2015.

HOMMA, A. K. Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia e domesticação. Embrapa Amazônia Oriental. Livro científico (ALICE). 2014.

IBGE. Estado do Amapá – Mapa de cobertura vegetal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2004.

IBGE—Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Produção e Extração Vegetal da castanha-do-brasil no Amapá. Kindt R and Coe R. 2019.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: **Oxford University**, p. 560, 1989.

IBAMA/SEMA-AP. Atlas das unidades de conservação do Estado do Amapá. Macapá. 2004

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. Mining geostatistics. Caldwell, Blackburn Press; p. 600, 2003.

LESCURE, J. –P.; PINTON F.; EMPERAIRE L. La gente y los productos florestales em la amazonia central: El enfoque multidisciplinario del extrativismo. In: CLUSENER-GODT, M.; SACHS, I(Ed). *Extractivismo em la Amazonia Brasileira: Perspectivas sobre el desarrollo regional*. París: **UNESCO**, v.18, p.62-95.1994.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. [s.l: s.n.].

GUERREIRO, Q. L. M.; JÚNIOR, R. C. O.; SANTOS, G. R.; RUIVO, M. L. P.; BELDINI, T. P.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, K. E.; GUEDES, M. C.; SANTOS, P. R. B. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. *African Journal of Agricultural Research*. v. 12, n. 4, pp. 237-250, 26 january, 2017.

LIMA, D. Coronel José Julio, o Czar do Jarí. Amazon View 2008. Disponível em: <http://www.amazonview.net/notícia.php?cod=288>>. Acesso em: 22/02/2021

LINS, C. Jari 70 anos de história. Rio de Janeiro: Dataforma. 1991.

MARTINS, K.; RAPOSO, A.; KLIMAS, C.A.; VEASEY, E.A.; KAINER, K.; WADT, L.H.O. 2012. Pollen and seed flow patterns of *Carapa guianensis* Aublet. (Meliaceae) in

two types of Amazonian forest. **Genetics and Molecular Biology**, v. 35: p. 818-826, 2012.

MOTA, V. C. Metodologia geoestatística para caracterizar a variabilidade temporal de elementos climáticos de Juiz de Fora – MG Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

MELLO, J.M.; BATISTA, J.L.F.; RIBEIRO JR, P.J. & OLIVEIRA, M.S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Sci. For.**, v. 69: p. 25-37, 2005.

Mc BRATNEY, A.G.; WEBSTER, A.G. Choosing functions for semi-variograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, p.617-639, 1986.

NOGUEIRA, K. M.; SANTANA, A. C. Influência das chuvas na oferta de castanha-do-brasil e o impacto no benefício socioeconômico e ambiental, no Oeste do estado do Pará. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 45, p. 215–230, 2018.

PEDROZO, C.A.; TONINI, H.; RESENDE, M.D.V.; JORDÃO, S.M.S. Repeatability of fruits and seeds production and selection of Brazil nut genotypes in native populations in Roraima. **Rev. Arvore**; v. 39: p. 863-871, 2015.

PACHECO, Nadiele Pereira. Diversidade vegetal associada a castanheiras produtivas nas principais regiões produtoras do estado do Amazonas. 2018. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

PINTO, L. F. A fazenda gigante do reino do Jari. Amigos da Terra – Amazônia Brasileira 2005.

PICANÇO, J. R. A. Reserva Extrativista do Rio Cajari. Verso e reverso da territorialização no sul do Amapá. (Dissertação de mestrado). Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

PORTO, J. L. R. Amapá: Principais transformações econômicas e institucionais – 1943 a 2000. Macapá. Edição do Autor. 2006.

R.; GRIBEL, R.; KLEIN, G. N. Crescimento e sobrevivência de castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em diferentes condições ambientais na região do rio Trombetas, Oriximiná, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 273–293, 2011.

RIBEIRO JR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. Piracicaba, SP, 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

RIBEIRO JUNIOR, P. P.; DIGGLE, P. P. GeoR: a package for geo-statistical analysis. **R News**, Rochester, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

SANTOS, C. F.; ABSY, M. L. Polinizadores de *Bertholletia excelsa* (Lecythidales: Lecythidaceae): interações com abelhas sem ferrão (Apidae: Meliponini) e nicho trófico. **Neotropical Entomology**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 854–861, 2010.

SANTOS, C. F.; ABSY, M. L. Polinizadores de *Bertholletia excelsa* (Lecythidales: Lecythidaceae): interações com abelhas sem ferrão (Apidae: Meliponini) e nicho trófico. **Neotropical Entomology**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 854–861, 2010.

SANTOS, J.U.M. dos; BASTOS, M.N. do C.; GURGEL, E.S.C.; CARVALHO, A.C.M. *Bertholletia excelsa* Humboldt & Bonpland (Lecythidaceae): aspectos morfológicos do fruto, da semente e da plântula. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, v.1, p.103-112, 2006.

SOUSA, W. P. D. A dinâmica dos sistemas de produção praticados em uma unidade de conservação de uso direto na Amazônia – A reserva extrativista do Rio Cajari no Estado do Amapá. (dissertação de mestrado). Centro de ciências agrárias, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2006. 167p.

SCOLFORO, H. F. Interpoladores espaciais na estimativa da distribuição do estoque de carbono da vegetação arbórea em Minas Gerais, Brasil. 2014. 74 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. Proposta de um teste de hipótese para a existência de dependência espacial em dados geostatísticos. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, p.750-764, 2014.

THOMAS, E.; CAICEDO, C. A.; McMICHAEL, C. H.; CORVERA, R.; LOO, J. Uncovering spatial patterns in the natural and human history of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) across the Amazon Basin. **Journal of Biogeography**, v. 42, p. 1367-1382, 2015.

TONINI, H.; COSTA, P.; KAMINSKI, P. E. Estrutura e produção de duas populações nativas de castanheira do Brasil (*Bertholletia excelsa*) em Roraima. **Floresta**, [s. l.], n. 2003, p. 1–2, 2008.

TER STEEGE, H., PITMAN, N. C. A., SABATIER, D., BARALOTO, C., SALOMÃO, R. P., GUEVARA, J. E. et al. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. **Science**, p. 342: 1243092, 2013. doi: 10.1126/science.1243092.

TEIXEIRA, M. B. dos R. Comparação entre estimadores de semivariância. 2013. 122 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

TONINI, H. Amostragem para a estimativa de produção de sementes de castanheira - do - Brasil em floresta nativa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. [s. l.], n. 1, p. 519–527, 2013.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. São Paulo: **Instituto Agrônomo de Campinas**, p. 5, 1998.

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P. de. Estudo de periodicidade temporal de chuvas em bacia hidrográfica dos Rios Turvo/Grande – uma proposta. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001. 17 p. (Série Documentos, 10).

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.) Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.1-54, 2000.

KAINER, K. A. Explaining variation in Brazil nut fruit production. [s. l.], v. 250, p. 244–255, 2007.

WADT, L. H. O.; KAINER, K. A.; GOMES-SILVA, D. A. P. Population structure and nut yield of a *Bertholletia excelsa* stand in Southwestern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 211, n. 3, p. 371–384, 2005.

WONNACOTT, T.H.; WONNACOTT, R.J. Introductory Statistics. 2.ed. New York: **John Wiley**, p, 510, 1972

WADT, L. H. O.; FAUSTINO, C. L.; STAUDHAMMER, C. L.; KAINER, K. A.; EVANGELISTA, J. S. Primary and secondary dispersal of *Bertholletia excelsa*: Implications for sustainable harvests. **Forest Ecology and Management**, 415–416, 98–105, 2018. doi: 10.1016/j.foreco.2018.02.014.

## CAPÍTULO 2

### ARTIGO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>O presente artigo será submetido no periódico: *Journal Forest Ecology and Management* (ISSN: 0378-1127), Fator de impacto: 3.064

#### **Descobrimo a dependência espacial, a produtividade e relações antrópicas em castanhais nativos na Amazônia oriental**

Rafael Lucas Figueiredo de Souza<sup>1</sup>, José Márcio de Mello<sup>1</sup>, Marcela de Castro Nunes Santos Terra<sup>1</sup>, Anderson Pedro Bernardina Batista<sup>2</sup>, Marcelino Carneiro Guedes<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, Campus Box 3037, LEMAF, 372000-000 Lavras, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup>Instituto Federal do Amapá (IFAP), Campus Laranjal do Jari, Rua Nilo Peçanha, nº 1.263 – Bairro Cajari, Laranjal do Jari, Amapá, Brasil. <sup>3</sup>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amapá), Rodovia Juscelino Kubitscheck km 05, Macapá, Amapá, Brasil; <sup>4</sup>Corresponding author (rafaelflorestal55@gmail.com).

#### **Resumo**

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) possui relevância social, econômica e cultural na América Latina. Distúrbios antrópicos causados pelas comunidades extrativistas podem favorecer o estabelecimento das castanheiras. Por se estender em grandes áreas, a relação homem-castanhal pode deixar uma assinatura na paisagem, possível de ser analisada em abordagens espacialmente explícitas, como na geoestatística. O presente estudo buscou detectar a estrutura de dependência espacial em castanhais nativos e encontrar relações com o histórico extrativista da área. Foi realizado a variografia para as variáveis produtivas e arbóreas dos castanhais e, posteriormente, foi utilizada a krigagem ordinária para interpolação em mapas temáticos para verificar a relação entre as variáveis com a produtividade. As populações de castanheiras apresentaram distribuições do tipo platicúrticas. Nas duas tipologias, as variáveis foram classificadas com dependência espacial moderada e forte. Entretanto, em floresta aberta (FA) houve maior alcance da variação da estrutura espacial, enquanto em floresta densa (FD) o alcance caiu pela metade. Nos mapas de krigagem, a maior produtividade

acompanha as áreas com castanhais mais densos em FA. Em FD, os mapas não apresentaram um padrão, as maiores classes parecem sempre ocorrer em locais específicos, nas bordas da mancha. O tipo de distribuição observada é característico de castanhais com intensa coleta de sementes e atividades humanas. A dependência espacial encontrada em FA indica que o ambiente, com bastante iluminação direta e áreas abertas, favoreceu o desenvolvimento da espécie em tempos pretéritos. Em FD, a prática extrativista pode modificar a estrutura da floresta e perturbar, de forma positiva, o crescimento da castanheira. Os distúrbios humanos causados pelo manejo involuntário podem ter beneficiado a castanheira, principalmente em ambiente de floresta densa. O futuro dos castanhais na Amazônia oriental pode não depender exclusivamente do estabelecimento da espécie em áreas abertas, mas do extrativismo realizado pelas comunidades mesmo em floresta densa.

**Palavras-chave:** Manejo de produtos não-madeireiros, povos tradicionais, tipologias florestais, geoestatística.

### **Discovering the spatial dependence, the yield and human relations in brazil nut stands at eastern amazon rainforest**

#### **Abstract**

The Amazonian-American brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) has social, economic and cultural relevance in Latin America. Anthropic disorders caused by extractive communities may favor the establishment of brazil nut trees. Because it extends into large areas, the man-brown relationship can leave a signature in the landscape, which can be analyzed in spatially explicit approaches, such as in geostatistics. The present study aimed to detect the structure of spatial dependence in native brazil nut trees and to find relationships with the extractive history of the area. The variography was performed for the productive and arboreous variables of the brazil nut trees and, later, ordinary kriging was used for interpolation in thematic maps to verify the relationship between the

variables and productivity. The brazil nut populations presented platycule distributions. In both typologies, the variables were classified as moderate and strong spatial dependence. However, in AF there was a greater range of the variation of the spatial structure, while in DF the range fell in half. In the kriging maps, the highest productivity accompanies the areas with the densest brazil nut trees in AF. In DF, the maps did not present a pattern, the largest classes seem to always occur in specific locations, on the edges of the stain. The type of distribution observed is characteristic of brazil nut trees with intense seed collection and human activities. The spatial dependence found in AF indicates that the environment, with a lot of direct lighting and open areas, favored the development of the species in times of the future. In DF, extractive practice can modify the structure of the forest and positively disturb the growth of the brazil nut tree. Human disturbances caused by involuntary management may have benefited the brazil nut tree, especially in dense forest environment. The future of brazil nut trees in the eastern Amazon may not depend exclusively on the establishment of the species in open areas, but on the extractivism carried out by communities even in dense forest.

**Key-words:** Human influence, traditional peoples, forest typology, geostatistic.

### **Introdução**

A pan-amazônia é um bioma que detêm elevada abundância e diversidade de recursos florestais, além de uma fauna e flora rica e pouco explorada (Hoorn et al., 2010). Os povos tradicionais dessa região realizam diversas atividades de subsistência no interior das florestas amazônicas, dentre elas o agroextrativismo da castanha-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) é o de maior destaque (Tonini; Ivanov; Fleig, 2018).

A espécie pertence à família Lecythidaceae e sua distribuição geográfica abrange países como Brasil, Venezuela, Colômbia, Peru, Bolívia e Guiana (Silva et al., 2013). A castanha possui ampla aceitação no mercado nacional e internacional e é um dos produtos

florestais não-madeireiros (PFNM's) mais importantes da América Latina (Shepard; Ramirez, 2011).

A castanheira é altamente heliófita e pode colonizar áreas abertas provenientes de distúrbios naturais, apresentando maiores densidades em florestas secundárias e áreas de transição com o cerrado do que em florestas densas maduras (Paiva et al., 2011; Guedes et al., 2014). Na Amazônia oriental, a espécie ocorre em aglomerados na floresta, conhecidos popularmente como castanhais, com densidades variando de 5 a 27 castanheiras por hectare, dependendo da região (Mori & Prance, 1990). A castanheira pode chegar a mais de 50 m de altura e mais de 4 m de diâmetro (Dalmolin et al., 2019).

A castanheira não tem preferência por sítios nos primeiros estágios de vida (plântula até vareta), mas posteriormente prioriza ambientes com iluminação incidente constante (Tonini & Baldoni, 2019; Zuidema et al., 2002). Florestas com dosséis mais fechados são prejudiciais ao seu crescimento, pois a espécie tem dificuldades em se desenvolver em locais excessivamente sombreados (Scoles et al., 2011). O estabelecimento da castanheira em floresta com dossel fechado pode estar ligado às perturbações antrópicas, atuais e pretéritas.

A colonização da Amazônia por povos ameríndios (pré-colombianos) vem sido discutida em vários estudos de arqueologia e ecologia histórica (Roosevelt, 1992; Ballé, 1998; Moran, 2010; Levis et al., 2019). Existem evidências de que a distribuição moderna da espécie está ligada a padrões de assentamentos humanos desde o período pleistoceno, que corresponde a pelo menos 11.000 anos atrás. No entanto, o fato de que os seres humanos também são agentes de perturbação florestal neotropical deve ser considerado. Alguns estudos verificaram que distúrbios em diferentes intensidades causados pela presença humana podem influenciar a estrutura demográfica dos castanhais (Ribeiro et al., 2014; Sousa et al., 2014). Uma característica da presença humana é a maior densidade

de castanheiras por hectare e baixa proporção de indivíduos jovens (Scoles & Gribel, 2015).

Atividades como: limpeza da base das castanheiras, abertura de picadas, retirada de madeira, agricultura itinerante (Scoles; Gribel, 2012; Souza; Almeida, Amaral, 2014), podem criar aberturas periódicas no dossel, favorecendo a espécie. O uso do fogo pelos povos antigos é um dos principais distúrbios antrópicos em florestas tropicais. As castanheiras desempenham um papel importante da composição florestal, estrutura e ciclo biogeoquímico em florestas amazônicas, possuem alta capacidade de regeneração mesmo sob efeito dessas atividades, o que a torna adaptada às práticas agrícolas (Roberts et al., 2017; Balée; 2006; Levis et al., 2018).

Tendo em vista que a tipologia florestal e a atividade humana são determinantes para a estruturação dos castanhais, levantamos a hipótese de que esse processo apresenta uma assinatura espacial, devido à fatores abióticos que regulam as atividades ecofisiológicas das plantas, assim como a dispersão involuntária dos frutos e estabelecimento das castanheiras derivadas das atividades antrópicas constantes. A abertura dos dosséis em diferentes tipologias para a passagem de luz é determinante para a abundância de castanheiras. Logo, a localização geográfica dos castanhais pode compartilhar semelhanças quantitativas com os castanhais vizinhos, por conta dos efeitos da estrutura florestal e o manejo voluntário por parte das comunidades.

A geoestatística é uma ferramenta que tem sido amplamente utilizada em estudos florestais para interpolar variáveis arbóreas (Mello et Al., 2005; Filho et Al., 2011; Pelissari et Al., 2014; Pelissari et Al., 2016; Scolforo et Al., 2015; Silva et Al., 2017). Em relação a produtividade de frutos, ainda não existem informações na literatura. Em florestas nativas da Amazônia, somente Guerreiro et al. (2019) e Batista et al. (2019) utilizaram a abordagem espacial em castanheiras nos últimos anos. Todavia, a aplicação

de análises espaciais em nível de castanhal e de tipologias florestais nunca foi explorada na Amazônia brasileira, ampliando o desafio para compreender de forma mais abrangente o comportamento dessa espécie.

O Estado do Amapá ainda possui pouca relevância no cenário econômico do agroextrativismo da castanheira. Em 2018 produziu somente 874 toneladas (t) do fruto, gerando uma receita de aproximadamente R\$ 824.000,00, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), e este valor representa menos de 2% da produção total da região norte. No entanto, sabe-se que essa estimativa é subestimada. O monitoramento e estudos coordenados pela Embrapa Amapá no sul do Estado, evidenciam que, em anos de boa safra, só na Resex Cajari podem ser coletadas mais de 10.000 t de castanha.

O estudo da continuidade espacial de variáveis arbóreas e produtivas entre os castanhais podem ajudar a compreender a variação na produção de frutos no contexto espacial, em diferentes tipologias florestais de ocorrência, bem como verificar por meio de produtos (mapas de krigagem), quais variáveis estão espacialmente estruturadas de forma semelhante. Sabe-se que a espécie forma grupos condensados e são consideradas florestas oligárquicas (Campbell et al., 2006), onde a castanheira exerce um papel único e fundamental na dinâmica do ecossistema, logo, a densidade de indivíduos pode contribuir de forma mais positiva para o aumento da produtividade.

Dessa forma, é possível inferir sobre como as tipologias florestais e o manejo involuntário, oriundo da prática extrativista, podem influenciar no potencial produtivo dos castanhais.

Com base no que foi apresentado, pode-se traçar algumas hipóteses. A primeira se refere aos castanhais presentes em floresta ombrófila aberta. Neste ambiente as variáveis arbóreas e produtivas têm comportamento espacialmente estruturado, por conta

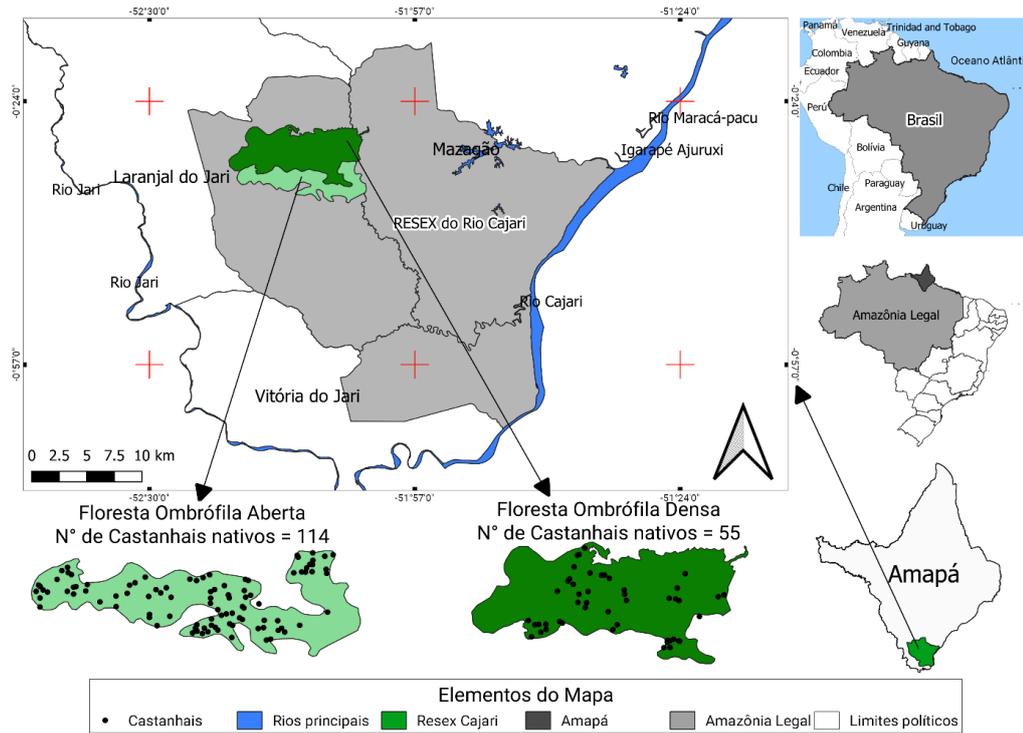
da maior disponibilidade de luz e copas mais espaçadas que facilitam o desenvolvimento em toda a área. A segunda hipótese está voltada para os atributos arbóreos e produtivos dos castanhais em floresta ombrófila densa. Espera-se um comportamento espacial errático, devido a pressão de fatores aleatórios necessários para o estabelecimento da espécie. Entretanto, em certo grau, a influência do extrativismo secular nessa tipologia pode estar estruturando a componente espacial. Por último, a densidade de castanheiras pode possuir relação com a produtividade dos castanhais, devido a forma condensada com que a espécie ocorre pela floresta.

Diante do presente exposto, o objetivo deste trabalho é verificar a existência de dependência espacial em variáveis arbóreas (diâmetro, densidade e área basal) e produtivas (produtividade e produção média) em castanhais nativos em duas tipologias florestais; floresta ombrófila aberta e floresta ombrófila densa na reserva extrativista do rio cajari (RESEX Cajari) na região sul do Estado do Amapá, e verificar através das análises espaciais as variáveis de maior efeito sobre a produtividade.

## **Material e Métodos**

### **Caracterização da área de estudo**

A Reserva Extrativista do Rio Cajari (RESEX Cajari) está localizada na região sul do Estado do Amapá, entre as coordenadas  $0^{\circ} 15' S$  e  $52^{\circ} 25' W$  e  $1^{\circ} 5' S$  e  $51^{\circ} 31' W$ . Foi instituída por decreto do governo federal em 1990 (Brasil, 1990). Ocupa uma área de, aproximadamente, 530 mil hectares, de acordo com dados levantados pelo ICMBio, abrangendo os municípios de Mazagão, Vitória do Jari e Laranjal do Jari, como mostra Figura 1.



**Fig. 1:** Localização da reserva extrativista do Rio Cajari no sul do Estado do Amapá. Em destaque, temos as duas tipologias florestais de ocorrência da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.): Floresta Ombrófila Aberta submontana com cipós e Floresta Ombrófila Densa com dossel emergente. Nas tipologias foram plotados os centróides dos castanhais, cada centróide sumariza as informações de produtividade de frutos e de atributos dendrométricos das castanheiras. A BR-156 é a principal via de acesso terrestre para a reserva, mas a região também apresenta afluentes do rio cajari que é utilizado pelas comunidades locais.

O clima da região da RESEX Cajari situa-se na transição de clima tropical de savana (Aw) para tropical de monção (Am), segundo a classificação de Köppen. Apresenta temperatura média anual acima de 25°C, com mínima de 18°C e máxima de 31.5°C. A precipitação anual gira em torno de 2.300 mm, com concentração nos meses de dezembro a junho, e seca (precipitação < 100 mm por mês) de setembro a novembro (Alvares et al., 2014; Rabelo, 2008).

Na região, ocorre o predomínio de floresta ombrófila aberta submontana com cipós, mas com ocorrência de outras tipologias florestais como floresta ombrófila densa com dossel emergente e cerrado. Existe a predominância do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.)

nas áreas de várzea e da castanha-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) no alto Cajari, em terra firme.

A Resex Cajari é drenada pelas bacias dos rios Cajari e Ajurixi, e do igarapé Tambaqui, tendo elevada ocorrência de pequenos rios e lagos. Todas as águas da Resex dirigem-se ao canal norte do Rio Amazonas (Brasil, 2017). Os tipos de solo predominante são Latossolos Amarelo e Vermelho-amarelo, com ou sem ocorrência de concrecionário laterítico e uma mancha de Argissolo na face norte (Radam Brasil, 1974).

### **Aquisição de dados**

Os dados do inventário e mapeamento das castanheiras são provenientes do Projeto Carbono Cajari – Comunidade e Agroextrativismo da Castanha na Resex-CA. Esse projeto foi desenvolvido no sul do Estado do Amapá e patrocinado pelo programa Petrobras Ambiental, tendo como proponente a Associação dos Trabalhadores Agroextrativistas do Alto Cajari (ASTEX-CA) e como co-executores a Embrapa Amapá e o Instituto Estadual de Florestas do Amapá.

As atividades de mapeamento dos castanhais iniciaram no final de 2011. O mapeamento consistiu no georreferenciamento de cada castanheira e no limite geográfico dos castanhais, obtendo-se também a estimativa de produção de cada castanheira, informada pelo agroextrativista dono do castanhal, que acompanhou o mapeamento do seu castanhal e indicou onde estavam localizadas as castanheiras.

Todas as castanheiras com DAP > 10 cm, produtivas ou não, foram medidas com auxílio de fita métrica. Sua localização foi capturada com auxílio de GPS (*Sistema de posicionamento global*) de alta sensibilidade.

A atividade de mapeamento dos castanhais assistiu a 296 extrativistas, com o georreferenciamento de 304 castanhais. Foram inventariadas 71.389 árvores de castanheiras distribuídas em uma área de 8.990 hectares ocupada pelos 304 castanhais.

No total foram realizadas onze expedições em campo, correspondendo a onze meses de atividades entre os anos de 2011, 2012 e 2013. A tabela 1 apresenta os resultados de atendimento e mapeamento por viagem.

<b>Mês/Ano</b>	<b>Nº de Extrativistas</b>	<b>Nº de Castanhais</b>	<b>Nº de Castanheiras</b>
Dez/2011	6	6	1.277
Abr/2012	22	29	6.714
Mai/2012	48	48	10.674
Jun/2012	23	24	7.555
Jul/2012	30	30	7.505
Ago/2012	21	21	5.813
Set/2012	41	41	11.854
Out/2012	23	23	4.828
Nov/2012	25	25	3.983
Dez/2012	5	5	1.332
Abr/2013	21	21	4.220
Mai/2013	31	31	5.634
<b>Média</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>5.949</b>
<b>Total</b>	<b>296</b>	<b>304</b>	<b>71.389</b>

**Tabela 1:** Cronograma das atividades realizadas no final de 2011 pela equipe do projeto, na reserva extrativista do Rio Cajari, no sul do Amapá. O número de castanheiras também inclui aquelas que não produziram no ano em questão. Cada extrativista recebeu um mapa com as dimensões do seu castanhal e com a localização e quantificação das castanheiras (Picanço e Euler, 2014).

### **Organização dos dados**

Inicialmente, com o auxílio do software de geoprocessamento Qgis (Quantum Gis), todas as castanheiras georreferenciadas foram plotadas e categorizadas de acordo com seu castanhal de origem.

Em posse do banco de dados do inventário de 2012, cada castanhal foi identificado pelo nome e associado à sua área correspondente no inventário. Posteriormente, foi extraído o centroide de cada castanhal para possibilitar a aplicação de estudos espaciais.

Foram selecionados somente os castanhais pertencentes em áreas de Floresta Ombrófila Aberta e Floresta Ombrófila Densa, pois estas apresentaram os castanhais bem distribuídos em toda a sua extensão. Esta característica é importante para que as variáveis

em estudo sejam bem representadas nas análises espaciais e, principalmente, em processos de interpolação. A área total do fragmento de floresta aberta é de 13.009 ha, e de floresta densa é 22.114 ha, sendo que 32,15% do total de castanheiras inventariadas estão presentes na área de floresta aberta e, 15,60% nessa área de floresta densa. Portanto, neste estudo foram utilizados 47,8% dos dados disponíveis, oriundos do inventário de 169 castanhais, dos 304 mapeados. Os outros 135 castanhais não foram utilizados pois ocorrem em outras tipologias e distantes da área de estudo selecionada.

Para cada castanhal, foram calculados a produtividade ( $\text{hl ha}^{-1}$ ), produção média ( $\text{hl ind.}^{-1}$ ), densidade ( $\text{N}^\circ \text{ Ind. ha}^{-1}$ ), área basal das castanheiras ( $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) e a média dos diâmetros (cm). Os valores relacionados a produção de frutos das castanheiras foram expressos em hectolitros, que é a medida comercial utilizada no Estado. Cada hectolitro é equivalente a 100 litros, que é aproximadamente 55 kg de castanha.

Os agroextrativistas da região contabilizam a produção de frutos de cada árvore por latas, cada lata é equivalente a 20 l de castanha, o que equivale a  $\pm 60$  ouriços. Um hectolitro equivale a 5 latas de castanha, ou aproximadamente 300 ouriços. No inventário utilizado, a produtividade dos castanhais foi contabilizada por número de latas produzidas por cada árvore. Neste estudo, foi padronizado o valor de 60 ouriços para cada lata produzida e, posteriormente, o número total de latas para cada castanhal foi dividido por 5, para obter o valor em hectolitros.

Para avaliar a estrutura diamétrica das castanheiras, foram gerados gráficos de distribuição de frequência e os valores de assimetria e coeficiente de curtose para cada tipologia, com o auxílio das funções *skewness* e *kurtosis* do pacote *moments* do *software* Rstudio (R Core Team, 2019). Foi utilizado o teste de aderência de Kolmogorov-smirnov, a 5% de probabilidade para comparar as distribuições diamétricas, conforme Tonini & Baldoni (2019).

Para verificar se a produtividade, produção média, densidade, área basal e diâmetro difere entre as tipologias, foi utilizado o teste  $t$  de student a 5% de probabilidade. Para avaliar a homogeneidade da variância e a normalidade dos dados, foi utilizado o teste de levene e Shapiro-wilk, respectivamente, com o auxílio das funções nativas do Rstudio (leveneTest e byf.shapiro). Para as variáveis que não apresentaram variância iguais e normalidade, foi utilizado o teste não paramétrico de Mann-whitney, com o auxílio da função wilcox.test do pacote RVAideMemoire do software R.

### **Estudo variográfico**

Para detectar a presença de dados atípicos (*outliers*) e analisar o comportamento dos dados foi utilizada estatística descritiva para cada variável. Posteriormente, uma análise exploratória foi feita para detectar a presença de tendência espacial nos dados em função da sua latitude, longitude e anisotropia, conforme (Mello et al., 2008).

As variáveis que apresentaram anisotropia, ou seja, estrutura espacial em diferentes direções (0°, 45°, 90° e 180°), foram modelados de forma separada e, os modelos ajustados foram combinados em um único modelo consistente, para o processo de krigagem conforme metodologia utilizada em Almeida e Bettini (1994).

Os dados candidatos a *outliers* (discrepantes) foram removidos da base de dados, pois estes podem alterar o valor real da variância dos dados, comprometendo a modelagem do semivariograma. Os dados que apresentaram tendência espacial foram corrigidos pelo método linear de primeira ordem, com o auxílio da função *trend* do pacote geoR.

Para constatar a presença de continuidade espacial, realizou-se o estudo variográfico, baseado na função semivariância utilizando o estimador clássico de Mathéron representada pela equação 1. O estudo variográfico foi realizado com o pacote geoR (Ribeiro Júnior; Diglle, 2001) no R (R Core Team, 2018).

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que  $y(h)$  é a semivariância estimada entre pares de pontos;  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos na posição  $(x_i)$  e  $(x_i+h)$ ;  $z(x_i)$  e  $z(x_i + h)$  valores da variável regionalizada observada em cada ponto.

Foram ajustados ao semivariograma, três modelos teóricos amplamente utilizados na literatura: Gaussiano, Esférico e Exponencial, conforme descritos por Journel e Huijbregts (2003).

Para ajuste ao semivariograma experimental foram utilizados os métodos dos mínimos quadrados ordinários (MQO), mínimos quadrados ponderados (MQP) e máxima verossimilhança (ML) conforme descrito por Mello et al. (2005). De forma complementar, foi utilizado o teste de Shapiro-wilks para verificar a normalidade dos dados para cada variável, pois o ajuste da máxima verossimilhança pressupõe uma distribuição conhecida, que no caso de modelos variográficos trata-se de uma multivariada normal. Não há teste específico para este tipo de distribuição. No entanto, espera-se, que havendo uma tendência dos dados a apresentarem uma distribuição aproximadamente normal, é plausível admitir multivariada normal nas diferenças entre pares de pontos.

Para avaliar e selecionar os modelos com melhor desempenho foram utilizadas as estatísticas de validação cruzada. Na busca pelo melhor modelo pela validação deve-se escolher aquele que possua o erro médio reduzido (EMR) mais próximo de 0 e desvio padrão dos erros (DEM) mais próximo de 1 (Journel; Huijbregts, 2003; Vieira, 2000). Como critério de seleção de modelos também foram utilizados o grau de dependência espacial (GDE) e critério de informação de akaike (AIC).

O grau de dependência espacial foi adotado com a seguinte classificação: fraco até 25%; moderado entre 25 e 75%; forte acima de 75% (Biondi et al., 1994). A estimativa dos pontos não amostrados foi efetuada a partir da krigagem ordinária. Por meio do interpolador geoestatístico foi originado um mapa temático das variáveis com o auxílio do módulo Spatial Geoestatistical Analyst do software ArcMap (Esri, 2010).

Para analisar os referidos mapas e poder afirmar quais variáveis tiveram maior semelhança com a produtividade dos castanhais, foi proposto o coeficiente de desvio relativo CDR (Equação 2), conforme (Coelho et al., 2009). Ressalte-se, aqui, que o CDR calcula a diferença média em módulo dos valores interpolados em um mapa temático quando comparado com um mapa assumido como referência, neste estudo a produtividade assumiu a condição como principal mapa de referência. A grade amostral para a estatística descritiva de cada pixel do mapa foi de 100 x 100 m (1 ha).

$$CDR = \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{ijk} - P_{ipad}}{P_{ipad}} \right| * \frac{100}{n} \quad Eq(2)$$

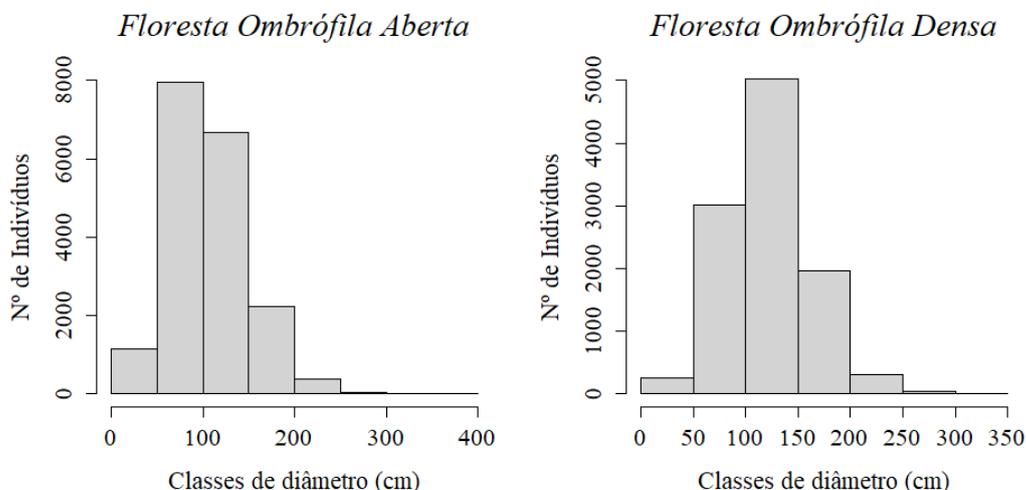
Em que: n: número de pontos interpolados (para a o estudo o n = 13.769 pontos para FA e n= 26.856 para FD); Pipad: mapa de referência no ponto; Pijk: mapa da variável de comparação j (j = 1, 2, 3, 4); j=1: Produtividade Média; j=2: Densidade; e j=3: Área Basal e j=4: diâmetro médio. Posteriormente, o mapa de cada variável assumiu a condição de referência, para obter a relação espacial entre todas as variáveis.

## Resultados

### Estrutura demográfica das castanheiras

O total de castanheiras inventariadas foi de 22.680 em floresta aberta e 11.145 em floresta densa, com diâmetro médio de 105,2 cm e 121,3 cm, respectivamente. As distribuições diamétricas foram classificadas como assimétricas positivas e do tipo platicúrticas, conforme observado na figura 3. Os valores de assimetria e curtose foram de 0,74 e 3,59 ( $K > 0,263$ ) para floresta aberta e 0,48 e 3,52 para floresta densa. Não houve diferença significativa entre as distribuições diamétricas pelo teste de kolmogorov-smirnov a 5% de probabilidade ( $K-s = 0,19608$ ;  $p\text{-value} = 2,2^{-16}$ ). Mostrando que a

distribuição diamétrica dos indivíduos das duas tipologias que os abrigam são estatisticamente iguais.



**Fig. 3:** Distribuição diamétrica das populações de castanheiras nas duas tipologias florestais em estudo, na reserva extrativista do Rio Cajari, sul do Amapá.

Em ambas as tipologias, foi observado maior número de indivíduos nas classes de diâmetro  $50 \text{ cm} \leq \text{DAP} \leq 200 \text{ cm}$ , tendo um decréscimo aparente a partir de  $\text{DAP} > 200 \text{ cm}$ . Em floresta aberta, houve maior proporção de indivíduos em classe de idade reprodutiva ( $50 \leq \text{DAP} \leq 100 \text{ cm}$ , 45,28%), seguindo com indivíduos de maturidade reprodutiva ( $100 \leq \text{DAP} \leq 150 \text{ cm}$ , 36,79%) conforme classificação de Wadt (2005), ou seja, com potencial para a produção de frutos. Em floresta densa ocorreu o mesmo padrão, mas em proporções menores para os indivíduos de idade reprodutiva (29,62%) e maiores para os de maturidade reprodutiva (49,8%).

Em floresta aberta, a proporção de indivíduos até 50 cm de DAP foi de 5,66%, enquanto a soma da proporção de indivíduos maiores que 150cm de DAP chegou a 12,25%, indicando a ocorrência de castanhais mais jovens. Em floresta densa, o número de indivíduos até 50 cm foi de apenas 0,49% enquanto a soma da proporção de indivíduos acima de 150 cm chegou a 20,49%, indicando castanhais mais velhos.

### **Estatística descritiva das variáveis em estudo dos castanhais nativos**

O número de castanhais presentes em floresta aberta e densa foram 114 e 55, respectivamente. A média de produtividade em floresta densa (3,70 hl ha<sup>-1</sup>) foi inferior a floresta aberta (5,06 hl ha<sup>-1</sup>) e a produção média por castanheira apresentou valores semelhantes entre as tipologias. Para as mesmas variáveis, os dados mostraram-se mais heterogêneos em FD, variando de 38 a 67%, conforme a tabela 3.

Floresta Ombrófila Aberta							
Número de castanhais	Variável	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV%
114	Produtividade	(hl ha <sup>-1</sup> )	0,72	11,81	5,06	2,74	54,15
	Produção Média	(hl ind. <sup>-1</sup> )	0,09	0,80	0,45	0,16	35,55
	Densidade	(N°Ind ha <sup>-1</sup> )	1,1	27,7	12,3	6,39	51,95
	Área Basal	(m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	1,45	18,64	9,01	4,22	46,83
	Média do Diâmetro	(cm)	38,3	129,1	91,5	19,05	20,81
Floresta Ombrófila Densa							
55	Produtividade	(hl/ha <sup>-1</sup> )	0,05	9,78	3,7	2,48	67,02
	Produção Média	(hl N°ind/ha <sup>-1</sup> )	0,1	0,88	0,49	0,19	38
	Densidade	(N°Ind/ha <sup>-1</sup> )	2,6	14,9	8	3,43	45,13
	Área Basal	(m <sup>2</sup> /ha <sup>-1</sup> )	4	18,95	9,9	4,76	48,08
	Média do Diâmetro	(cm)	93,7	139,8	120,3	12,20	10,14

**Tabela 3:** Estatística descritiva para as variáveis produtivas e arbóreas para os castanhais nativos, para as tipologias de floresta ombrófila aberta e floresta ombrófila densa. Produtividade: é referente a produção total de frutos do castanhal. Produção média: é a produção média de cada castanheira. Hectolitro – hl: é a unidade de volume comercial utilizada no Amapá para a comercialização dos frutos. CV: é o coeficiente de variação.

Para a FA, todos os dados rejeitaram a hipótese h<sub>0</sub> de normalidade dos dados para o teste de Shapiro-wilk a 1% de probabilidade, com exceção do diâmetro e produção (considerando 8%): Produtividade (w=0,9779, p-value= 0,01466), produção média (w= 0,9776, p-value= 0,0841), densidade (w=0,9673, p-value= 0,0131), área basal (w=0,9723, p-value=0,0320), diâmetro médio (w=0,9862, p-value=0,3834).

Para a FD, somente a produtividade e o diâmetro não rejeitaram a hipótese de normalidade a 1% de probabilidade: produtividade (w=0,9188, p-value= 0,0034),

produtividade média ( $w = 0,9711$ ,  $p\text{-value} = 0,2802$ ), densidade ( $w = 0,9501$ ,  $p\text{-value} = 0,04063$ ), área basal ( $w = 0,9093$ ,  $p\text{-value} = 0,0011$ ), diâmetro médio ( $w = 0,9642$ ,  $p\text{-value} = 0,1496$ ).

Pelo teste de Mann-Whitney, a produtividade ( $w = 3669$ ,  $p\text{-value} = 0,0141$ ) e densidade ( $w = 4128$ ,  $p\text{-value} = 5,099 \cdot 10^{-5}$ ) apresentaram diferença estatística, já a área basal não apresentou diferença ( $w = 3017$ ,  $p\text{-value} = 0,855$ ). Para as variáveis que apresentaram normalidade, a comparação pelo teste de t de student para médias independentes mostrou que não houve diferença estatística para a produção média ( $GL = 164$ ,  $t = -1,3683$ ,  $p\text{-value} = 0,7131$ ), mas houve diferença para a média dos diâmetros ( $GL = 131$ ,  $t = -9,129$ ,  $p\text{-value} = 1,047 \cdot 10^{-5}$ ).

Para as variáveis arbóreas, a floresta aberta apresentou média superior para a densidade em relação a floresta densa, com exceção da área basal e diâmetro médio. A área basal teve uma diferença de  $0,8 \text{ m}^2/\text{ha}^{-1}$  na média entre floresta aberta e densa, bem como desvios padrões próximos. A heterogeneidade da estrutura arbórea foi expressiva nas duas tipologias, com exceção da média do diâmetro em floresta densa, que apresentou dados mais homogêneos.

### **Modelagem dos semivariogramas experimentais e seleção de modelos para as tipologias florestais**

Para cada tipologia florestal, são apresentados os ajustes dos parâmetros do semivariograma experimental e as estatísticas de validação cruzada dos modelos teóricos selecionados para cada variável, conforme tabela 4. Pelo estudo variográfico, todas as variáveis apresentaram isotropia, ou seja, foi utilizado um único modelo para todas as direções no processo de krigagem.

<b>Floresta Ombrófila Aberta</b>									
<b>Variável</b>	<b>Ajuste</b>	<b>Modelo</b>	<b>(<math>\tau</math>)</b>	<b>(<math>\sigma^2</math>)</b>	<b>A (m)</b>	<b>AIC</b>	<b>GDE(%)</b>	<b>EMR</b>	<b>DEMUR</b>
Produtividade (hl/ha)	MV	Exp	3	7,964	8099,9	-236,5	72,6	-0,0084	1,15437

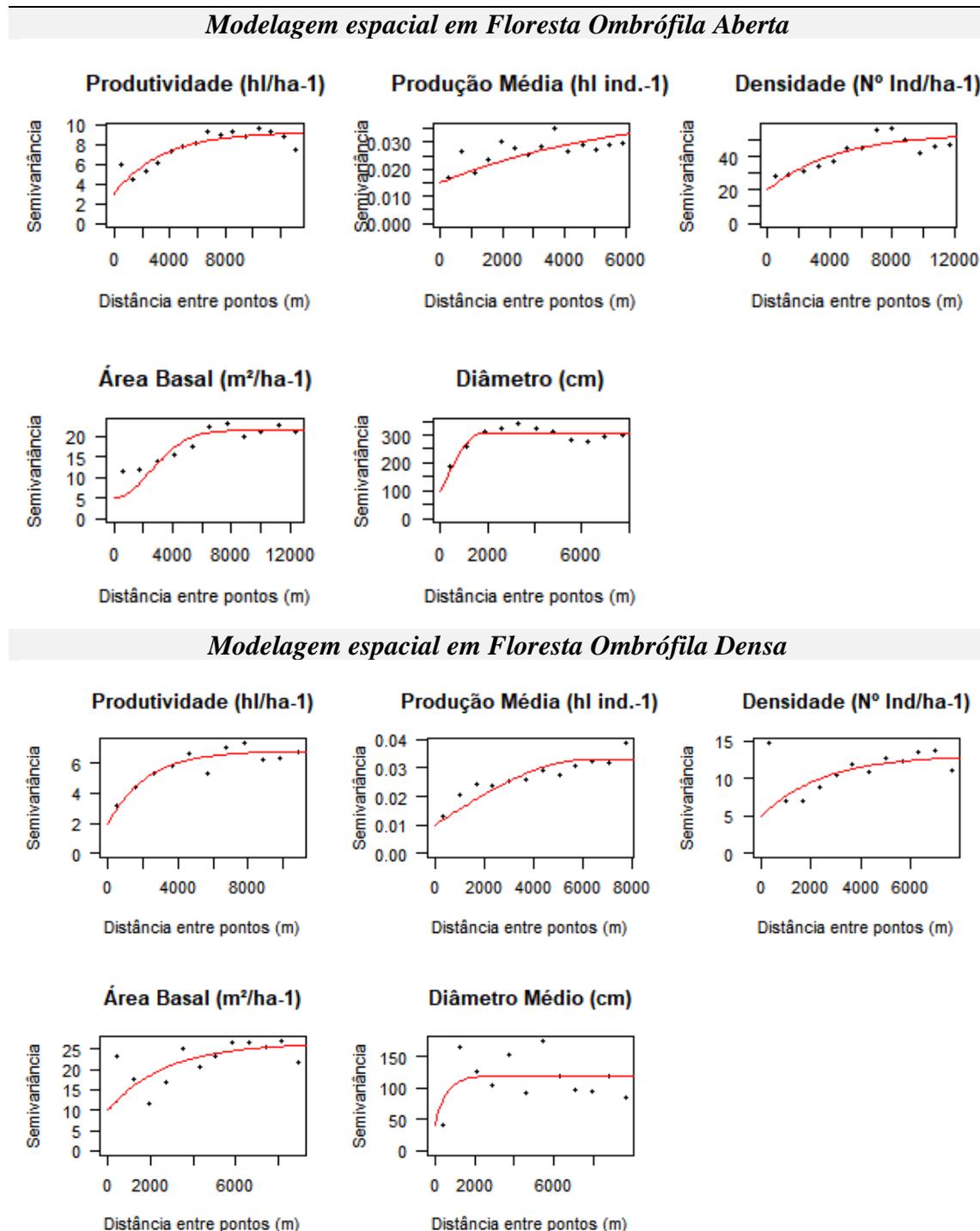
Produção Média (hl Ind.-1)	MV	Exp	0,015	0,0180	3999,9	36,60	54,5	-0,0033	1,11711
Densidade (Nº Ind/ha <sup>-1</sup> )	QMO	Exp	20	29,61	3298,1	-346,9	59,6	-0,0077	1,00031
Área Basal (m <sup>2</sup> /ha <sup>-1</sup> )	QMO	Gau	5	15,93	3426,5	-294,4	76,1	-0,0097	1,46485
Média do Diâmetro (cm)	MV	Esf	100	315,05	2988,0	-470,3	75,9	0,0093	1,08908
<b>Floresta Ombrófila Densa</b>									
Produtividade (hl/ha <sup>-1</sup> )	QMP	Exp	2	4,7811	2211,1	-103,6	70,5	-0,0015	1,047777
Produção Média (hl Ind.-1)	MV	Esf	0,01	0,0448	4100,0	17,8	81,8	-0,0121	1,04376
Densidade (Nº Ind/ha <sup>-1</sup> )	QMO	Exp	5	8,5048	2523,6	-125,4	63,0	-0,0012	1,092362
Área Basal (m <sup>2</sup> /ha <sup>-1</sup> )	QMP	Exp	10	16,4346	2701,6	-146,4	62,2	-0,0063	1,134614
Média do Diâmetro (cm)	MV	Exp	40	117,5	1664,4	-183,1	74,6	-0,0089	1,002339

**Tabela 4:** Ajuste dos modelos selecionados para a modelagem do semivariograma de cada variável. ( $\tau$ ) é o erro aleatório associado a variabilidade espacial. ( $\sigma^2$ ) é a contribuição, que representa a estrutura de dependência espacial. **A (m)** é o alcance em metros, que representa a quantidade de variação. (**AIC**) é o critério de informação de akaike. (**EMR**) é o erro médio reduzido e (**DEMR**) é o desvio do erro médio reduzido, estes dois últimos fazem parte da estatística de validação cruzada para verificar o potencial dos modelos de estimar os valores reais. (**QMO**) é o método de ajuste dos mínimos quadrados ordinários, (**QMP**), mínimos quadrados ponderados e (**MV**) é a máxima verossimilhança. (**Exp**) é o modelo exponencial, (**Gau**) o gaussiano e (**Esf**) o esférico. (**GDE**) é o grau de dependência espacial, razão que expressa a quantidade de variação espacial explicada pelo modelo teórico.

De forma geral, o ajuste do modelo exponencial representou a maioria dos modelos selecionados (7 de 10), com predominância do método de ajuste máxima verossimilhança (ML), para modelar a variância da diferença entre pares de pontos a partir dos dados originais.

Como já citado neste trabalho, os dados são provenientes de um censo na área de estudo. Entretanto, com a ausência de um delineamento amostral clássico, não é possível mitigar o efeito em pequenas escalas de distância. Com isso, o efeito pepita ( $\tau^2$ ), que

representa a variação não explicada por erros aleatórios, foi fixado de acordo com variabilidade de cada variável estudada, conforme figura 4.



**Fig. 4:** Semivariogramas isotrópicos para as variáveis dos castanhais, nas duas tipologias florestais estudadas. Os pontos no gráfico são referentes a semivariância em função da distância. A linha em vermelho representa o modelo teórico selecionado pelo melhor método de ajuste.

As variáveis produtivas apresentaram o menor ruído para as duas tipologias ( $\tau^2 = 0,01$  a 3). A média do diâmetro em floresta aberta se destacou entre as variáveis por possuir o maior erro aleatório observado ( $\tau^2 = 100$ ).

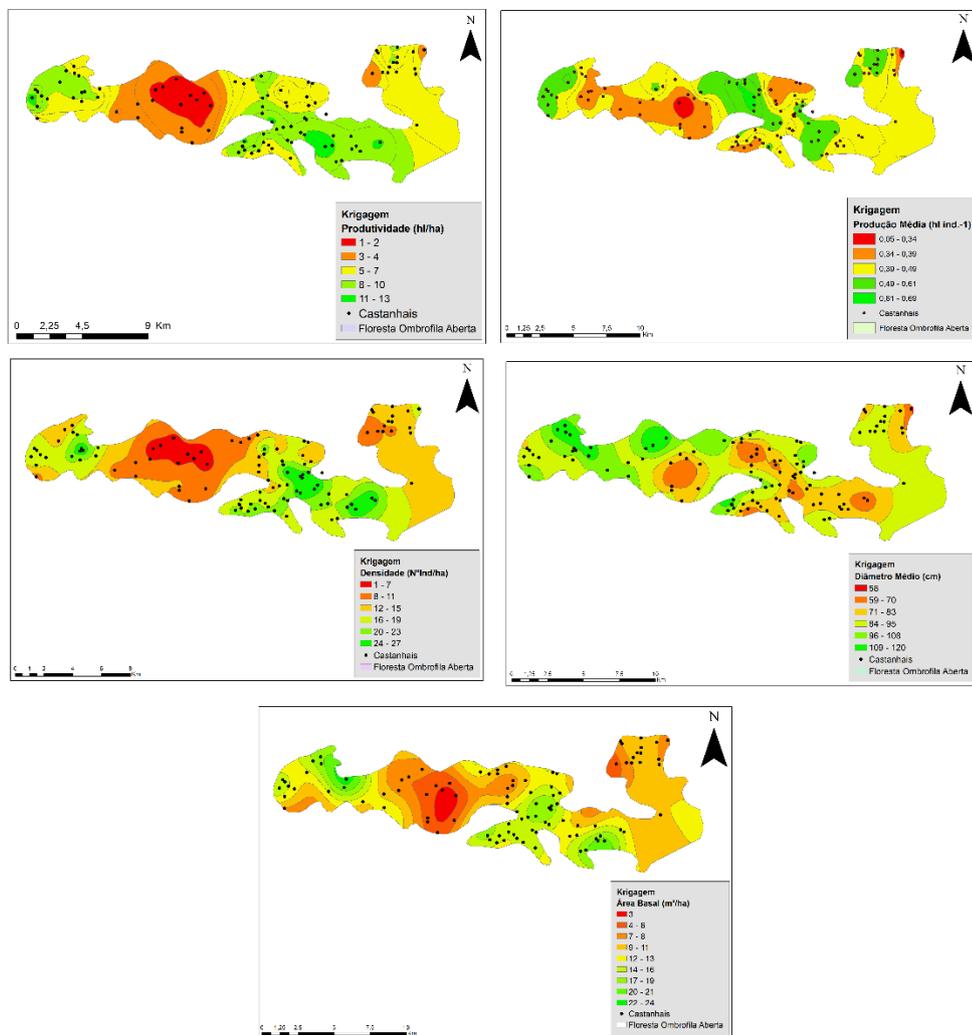
Entre as tipologias, o alcance (A) variou entre 1664,4 a 8099,9 m. Para a floresta aberta, estes valores foram consideravelmente maiores em relação a floresta densa, revelando uma variabilidade singular em cada ambiente. O grau de dependência espacial classificou todas as variáveis como forte e moderada ( $25\% \leq \text{moderado} \leq 75\%$ , forte  $\geq 75\%$ ). Principalmente para a área basal e média do diâmetro em floresta aberta, GDE= 76,1%, 75,9%, respectivamente e produtividade média em floresta densa (GDE = 81,8%).

A floresta densa apresentou grau de dependência espacial moderado para a área basal e diâmetro, 62,2% e 74,4%, respectivamente. Entretanto, para estas variáveis foi observado que os semivariogramas experimentais obtiveram um comportamento mais errático em relação a floresta aberta, principalmente para a área basal e diâmetro médio, ou seja, a variância dos pares de pontos seguiu um comportamento mais irregular conforme o aumento da distância.

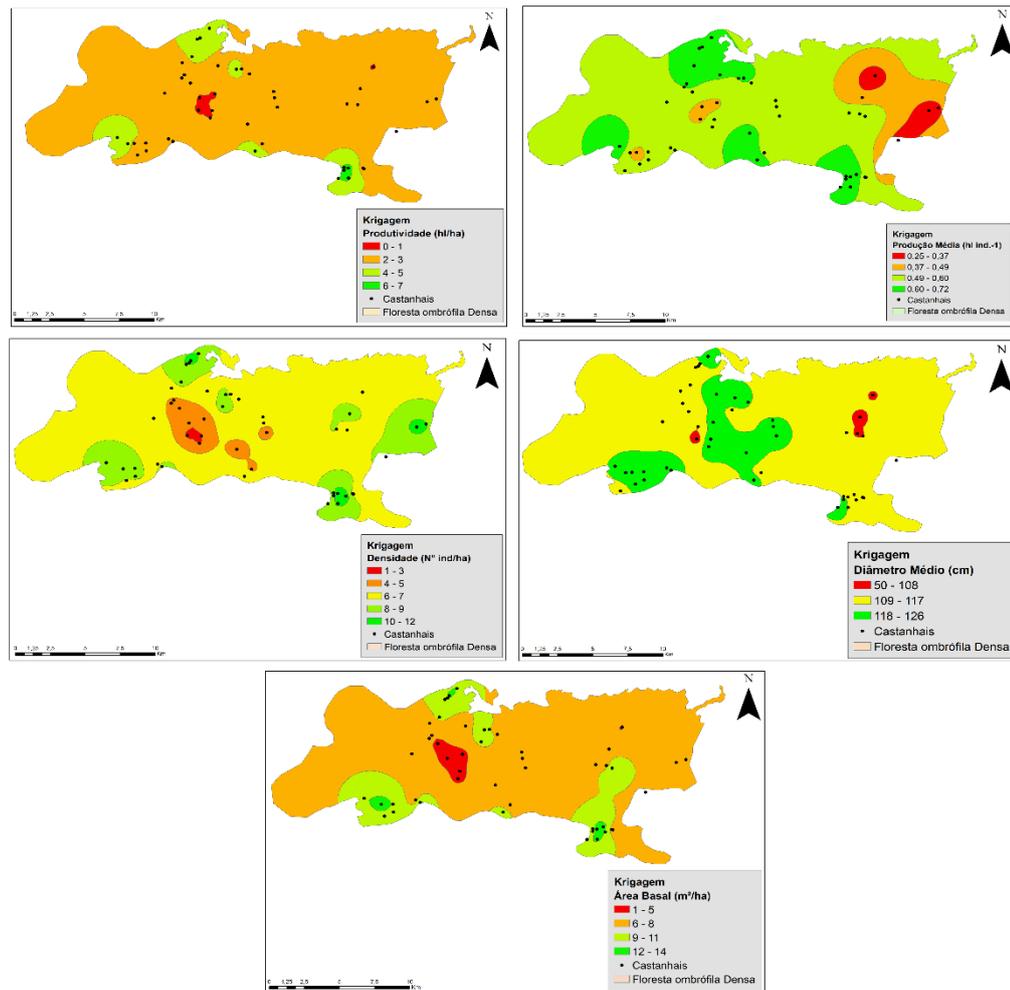
Na validação cruzada dos modelos selecionados, a precisão foi confirmada pelos baixos valores de erro médio reduzido (EMR) e desvio padrão dos erros reduzidos (DEM), especialmente para a produtividade média e densidade em floresta aberta, e produtividade e densidade em floresta densa.

Abaixo são apresentados os mapas de krigagem para a floresta aberta (figura 5) e floresta densa (figura 6), para cada variável em estudo. A maior produtividade (classes de 8 até 13  $\text{hl/ha}^{-1}$ ) em floresta aberta é concentrada na região sudeste do mapa, juntamente com a maior densidade de castanheiras (20 até 27  $\text{N}^\circ \text{Ind/ha}^{-1}$ ). A média dos diâmetros é maior na região noroeste, que concentra a menor densidade de castanheiras (1 até 15  $\text{N}^\circ \text{Ind/ha}^{-1}$ ) e também a menor produtividade por hectare. Nota-se que esses castanhais estão

próximos ao ramal que liga a comunidade água branca do jari até a boca do braço, em uma distância de no máximo 1,3 km do ramal e 10 km até a comunidade boca do braço.

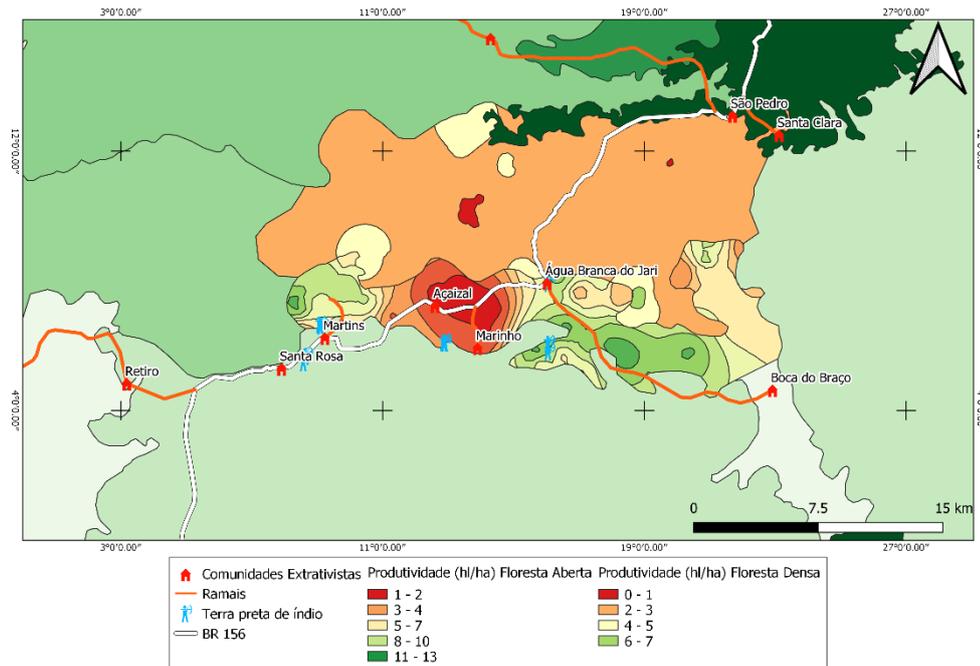


**Fig. 5:** Mapa de Krigagem ordinária para as variáveis dos castanhais em floresta ombrófila aberta. Os pontos circulares são referentes a localização geográfica do centroide de cada castanhal.



**Fig. 6:** Mapa de Krigagem ordinária para as variáveis dos castanhais em floresta ombrófila densa. Os pontos circulares são referentes a localização geográfica do centroide de cada castanhal.

Em floresta densa houve áreas sub-amostradas, que são identificadas pelo predomínio da classe intermediária para cada variável, onde o estimador utiliza a média. Para todas as variáveis as classes maiores parecem ocorrer de forma isolada em todas as direções, com exceção da média do diâmetro que se concentra na parte central da tipologia. Entretanto, nota-se que a maior produtividade (6 até 7 hl/ha<sup>-1</sup>) e densidade (10 até 12 N° Ind/ha<sup>-1</sup>) está próxima da comunidade água branca do cajari (3 km) na região sudeste, e na região sudoeste, próximos da comunidade Martins e Açaizal, com uma distância de 6 e 4 km, respectivamente. A relações entre os locais com maior produtividade de frutos e a ocorrência de comunidades e ramais pode ser observada na figura (7) abaixo.



**Fig. 7:** Mapa de produtividade de frutos para cada tipologia florestal estudada e os locais de ocorrência de comunidades, ramais abertos para acesso aos castanheais e outras comunidades e solo antropogênico (terra preta de índio). Em floresta densa não houve registros arqueológicos de terra preta, mas o extrativismo nessa tipologia também é realizado anualmente pelas comunidades ao longo da BR 156.

Apesar das observações visuais, não é possível descrever com precisão todas as principais diferenças entre os mapas de krigagem. Logo, para fins de comparação, foi utilizado a autocorrelação espacial para verificar quais variáveis possuem maior relação nos castanheais.

Na tabela 5, são apresentados os valores do coeficiente de desvio relativo (CDR) dos mapas de krigagem para todas as variáveis, gerando uma matriz de correlação espacial. Quanto menor o CDR, maior é a semelhança entre os mapas. Para as tipologias florestais, a área basal e a densidade foram as mais semelhantes espacialmente com a produtividade, enquanto a produção média por castanheira e a média do diâmetro apresentaram mais que o dobro dos valores de desvio relativo.

A produção média em floresta aberta mostrou maior relação com a média do diâmetro e, nesse caso, a densidade e a área basal apresentaram mais que o dobro de

variação na comparação entre os mapas. De forma antagônica a floresta aberta, a produção média em floresta densa revelou uma maior relação entre os mapas de densidade, área basal e média do diâmetro, com uma diferença de poucas unidades de desvio relativo entre eles. A densidade em floresta densa também apresentou maior relação com a área basal, enquanto a área basal e a média do diâmetro apresentaram uma diferença maior que 50 para o desvio relativo em ambas as tipologias.

<i><b>CDR - Floresta Ombrófila Aberta</b></i>				
	Produção Média (hl ind. <sup>-1</sup> )	Densidade (N°Ind/ha <sup>-1</sup> )	Área Basal (m <sup>2</sup> /ha <sup>-1</sup> )	Média do Diâmetro (cm)
Produtividade (hl/ha <sup>-1</sup> )	72,12	33,94	29,20	98,03
Produção Média (hl ind. <sup>-1</sup> )	-	42,18	34,70	16,15
Densidade (N° Ind/ha <sup>-1</sup> )	-	-	22,10	52,46
Área Basal (m <sup>2</sup> /ha <sup>-1</sup> )	-	-	-	77,03
<i><b>CDR - Floresta Ombrófila Densa</b></i>				
Produtividade (hl/ha <sup>-1</sup> )	75,54	44,95	36,16	113,62
Produção Média (hl ind. <sup>-1</sup> )	-	25,32	23,98	27,30
Densidade (N° Ind/ha <sup>-1</sup> )	-	-	11,23	48,71
Área Basal (m <sup>2</sup> /ha <sup>-1</sup> )	-	-	-	58,23

**Tabela 5:** CDR é o coeficiente de desvio relativo que expressa em termos percentuais a semelhança entre mapas de krigagem, através da comparação do valor e da quantidade de pixels no raster. Quanto mais próximo de zero (0) os mapas são mais semelhantes e, quanto mais distantes de zero, os mapas são diferentes. A densidade (N° Ind/ha<sup>-1</sup>) e área basal (m<sup>2</sup>/ha<sup>-1</sup>) foram as variáveis que apresentaram maior semelhança com o mapa de referência (produtividade hl/ha<sup>-1</sup>).

## **Discussão**

### **Estrutura diamétrica das populações de castanheira-da-amazônia**

Atualmente, o uso do termo “floresta cultural” está sendo empregado para compor uma série de atividades humanas que enriqueceram sítios florestais na pan-amazônia.

No continente latino-americano, há evidências arqueológicas e paleontológicas dos distúrbios causados por assentamentos pré-colombianos (Willis et al., 2004). A influência antrópica dos povos originários deu início ao extrativismo da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em diversas regiões da América do Sul. Na Amazônia brasileira, tal influência, vem modificando a estrutura arbórea dessas populações ao longo do tempo (Ribeiro et al., 2014; Sousa et al., 2014).

Distribuições diamétricas com assimetria positiva e com “achatamento” (platicúrticas) são características de castanhais sob o manejo voluntário por comunidades tradicionais, enquanto castanhais mais velhos e com baixo nível de perturbação antrópica apresentam distribuições leptocúrticas (Zuidema, 2003; Tonini & Baldoni, 2019). De forma geral, nossos resultados são encontrados em diversos estudos, mesmo aqueles com desenhos experimentais e diferentes tamanhos de parcela, como em (Zuidema & Boot, 2002; Salomão, 2009; Peres et al., 2003).

Analisando a estrutura diamétrica das populações, o número de árvores com DAP entre 50 a 100 cm em floresta aberta é quase o triplo do que em floresta densa, e as castanheiras se concentram nas classes intermediárias nesses ambientes. Este resultado corrobora com outros estudos realizados em castanhais nativos, onde a maioria das populações de castanheiras se encontram com DAP entre 80 e 160 cm (Wadt et al., 2008; Scoles & Gribel, 2012).

Dentre as variáveis arbóreas, a média do diâmetro diferiu estatisticamente entre as tipologias e apresentou variação mais homogênea (CV até 20%). Este resultado também pode estar aliado a prática extrativista, que ocorre por várias décadas e vem realizando a manutenção dos castanhais, com isso a espécie apresenta árvores centenárias.

Estudos dendrocronológicos nos dão suporte para inferir sobre o tempo em que os castanhais estão sob ação de distúrbios humanos na sua estrutura diamétrica. Alguns

estudos estimaram a idade das castanheiras utilizando diferentes métodos, Brienen & Zuidema (2006), analisando os anéis de crescimento de castanheiras, verificaram que a idade média de uma castanheira com 60 cm de DAP é de 166 anos. Em um estudo mais recente, os autores verificaram através de anéis de crescimento de 22 castanheiras, que a idade média de uma árvore com 106 cm de DAP atinge os 300 anos e indivíduos com 140 cm chegavam a 502 anos (Schöngart et al., 2015).

É importante ressaltar que o aumento em diâmetro das árvores pode ser influenciado por eventos de liberação (maior taxa de crescimento), dependendo de eventos climáticos favoráveis, e de supressão (menor taxa de crescimento), conforme eventos extremos de seca e ventos fortes, que limitam o incremento diamétrico da árvore. Acreditamos que, em floresta aberta, a taxa de crescimento das castanheiras pode ser superior a floresta densa, devido ao ambiente com copas mais esparsas e maior disponibilidade de luz direta (Tomas et al., 2015) que permite o estabelecimento da espécie. Logo, a maior proporção de castanheiras com idade reprodutiva (45,28%) encontradas em floresta aberta pode apresentar idades inferiores das encontradas na literatura, indicando castanhais mais recentes provenientes dos roçados praticados por agroextrativistas caboclos desde o início do século XX.

Originalmente habitada por índios Waiano e Apalai, a região sul do estado do Amapá atraiu imigrantes, sobretudo nordestinos, para trabalharem na extração da borracha (*Hevea brasiliensis*). O início da extração da borracha em meados do século 19 possuía um fluxo de exploração comercial tão intenso quanto a castanha da Amazônia, resultando em um crescimento econômico acelerado (Almeida, 2016). Logo, houve esforços do governo brasileiro para atender à mão de obra, trazendo milhares de migrantes para a região, dando início a reocupação (Sternberg, 1998; Hemming, 1995) e reestruturação da floresta devido as atividades humanas associadas.

Com o declínio da atividade, causada pelo colapso do “boom” da borracha em 1920, muitos migrantes continuaram na floresta, passando a tirar seu sustento dos castanhais nativos da região (Filocreão et al., 2002). Os castanhais mais jovens presentes principalmente em floresta aberta, podem ter sido formados durante a consolidação dos novos colonos na região da Resex Cajari, pois estes eram envolvidos principalmente com a agricultura em pequena escala e, com isso, enriqueceram áreas abertas com o plantio de castanheiras, espécies agrícolas e criação de animais de pequeno porte.

### **Diferenças dos atributos produtivos e arbóreos dos castanhais nativos entre as tipologias**

A alta heterogeneidade e a diferença estatística entre a produtividade e produção média já era esperada, devido as características de cada tipologia florestal.

Fatores edáficos, climáticos e dendrométricos (das próprias castanheiras) podem ser associados com a variação na produção de frutos (Neves et al., 2016; Ivanov et al., 2011; Wadt et al., 2018). Também já foi detectado que há associação espacial entre a produção de frutos e que a localização das castanheiras e suas vizinhas podem ser relacionadas com a produção, dependendo da tipologia florestal de ocorrência e dos recursos locais disponíveis.

Batista et al. (2019), estudando a associação espacial entre a localização e o efeito sobre a produção de frutos das castanheiras na mesma área de estudo, verificaram que em ambiente de floresta madura não houve limitação da produção entre a espécie. Este resultado sugere que a produtividade não depende da capacidade produtiva individual, mas da densidade de castanheiras. Este fato pode ser evidenciado pelo nosso estudo, que encontrou diferenças significativas para a produtividade e densidade entre as tipologias, mas não para a produção média e área basal. Logo, a maior produtividade em floresta aberta deve-se a densidade de castanheiras.

A diferença estatística entre as variáveis para cada tipologia revelou ambientes com potenciais distintos para a espécie. Os castanhais em floresta aberta se apresentaram mais densos e produtivos enquanto em floresta densa os castanhais são mais expressivos em diâmetro. Entretanto, castanheiras com maior diâmetro não são garantia de maior produtividade, pois estudos mostram que castanheiras mais velhas tem queda na produção de frutos (fase de senescência) e em grande parte, ocorre a concentração da produção em poucos indivíduos dentro dos castanhais, como foi observado na Bolívia por Zuidema (2003) e na Resex Chico Mendes por Kainer et al. (2007). Pelas figuras 5 e 6 do presente estudo, esta constatação também ficou evidenciada. Na floresta densa, houve maiores valores de diâmetro a 1,30 metros solo e menor produtividade quando comparada com a floresta aberta.

Devido as diferentes idades das castanheiras que ocorrem nas regiões da Resex Cajari, é possível abordar sobre algumas mudanças que ocorreram nas tipologias florestais em tempos pretéritos. A hipótese antrópica de que a influência humana formou e desenvolveu os castanhais, que são verdadeiras florestas manejadas, veio ganhando força nos últimos anos e podem explicar diversos processos ecológicos que ocorrem nos castanhais.

### **Componentes espaciais dos castanhais e sua relação com ações naturais e antrópicas**

Através das nossas análises, foi possível detectar a continuidade espacial nas variáveis estudadas em cada tipologia florestal. Este resultado é inédito e não rejeita a hipótese de que castanhais nativos apresentam dependência espacial. O alcance (A) e a contribuição (c) detectaram a máxima variação, e o grau de dependência espacial (GDE) confirmou a magnitude da variabilidade em função da distância para os ambientes.

A floresta aberta é um ambiente que possui maior disponibilidade de luz e, naturalmente, favoreceu o crescimento dos castanhais no passado. Este fator é crucial para compreender que as variáveis estudadas apresentaram aumento da variabilidade

conforme a distância devido à abertura do dossel. Em florestas tropicais, a luz é um recurso abiótico fundamental para as plantas (Engelbrecht & Herz, 2001; Jardim et al., 2007) e, com isso, regula diversos processos ecossistêmicos na natureza e estrutura a dependência espacial, devido a sua incidência contínua no espaço (Jensen, 2005).

Com a maior disponibilidade de luz direta, variáveis como produtividade, densidade, diâmetro e, conseqüentemente, a área basal, são influenciados diretamente ao longo da história dos castanhais. Este processo ecológico é refletido no alcance (A) e na (GDE) da estrutura espacial. A quantidade de variação em floresta aberta atingiu alcance (A) de até 8099 m, que é o valor máximo da estrutura espacial para todas as direções (isotropia), e a forte dependência espacial para a área basal (GDE = 76,1%) e média do diâmetro (GDE = 75,9%) mostraram que o ambiente de ocorrência é determinante para o crescimento dos castanhais.

Em floresta densa, o dossel é mais fechado e possui pouca disponibilidade de luz, logo, o estabelecimento da castanheira nesse tipo de floresta deve-se a fatores aleatórios como a abertura de clareiras. Apesar das sementes de castanha germinarem nesse ambiente, a espécie não consegue crescer em locais excessivamente sombreados (Scoles et al., 2011).

Estudos apontam que o potencial de regeneração da castanheira não está relacionado ao sítio no primeiro estágio de vida (plântula) (Tonini & Baldoni, 2019; Zuidema et al., 2002). Na floresta densa, a luz difusa no sub-dossel e maior sombreamento são prejudiciais ao crescimento da espécie. Logo, o crescimento da espécie pode ter sido desfavorecido nessa tipologia. Este processo ao longo do tempo pode indicar a presença de castanhais menos densos, e isto foi confirmado neste estudo com uma diferença de 4,7 Ind. ha<sup>-1</sup> na média de densidade em relação a floresta aberta, e o castanhal mais denso em floresta densa chegou a 14,9 Ind. ha<sup>-1</sup> e em floresta aberta foi de 27,7 Ind. ha<sup>-1</sup>.

Mesmo com as características desfavoráveis para o desenvolvimento da espécie, a estrutura de dependência espacial foi detectada em floresta densa e, nesse caso, fatores como as ações antrópicas provenientes do próprio extrativismo devem ser consideradas. Estudos recentes (Scoles; Gribel, 2012; Souza; Almeida, Amaral, 2014) verificaram que o extrativismo causa impactos na estrutura arbórea da floresta e na regeneração natural da castanheira, devido a abertura de trilhas e derrubada de árvores de valor madeireiro para fins de subsistência, além da dispersão involuntária de sementes devido a coleta e transporte anual de frutos (Moll-Rocek; Gilbert, Broadbent, 2014).

Teoricamente, os efeitos do extrativismo da castanha ocorrem da mesma maneira nas duas tipologias, indicando que o extrativismo de árvores madeireiras pode ser o fator mais determinante na floresta densa. A probabilidade de encontrar uma boa árvore para serrar e produzir madeira deve ser maior nessa tipologia do que na floresta aberta, sendo que nessa última, as relações com a agricultura itinerante e o desenvolvimento das capoeiras são mais decisivos para estruturação dos castanhais. A movimentação desses povos pelos interiores da floresta pode sinalizar o acesso deles aos castanhais e as áreas de roçados que posteriormente foram abandonados e colonizados pela castanheira através da agricultura itinerante.

Evidências históricas mostram a movimentação dos extrativistas pelo interior das florestas com ocorrência de castanhais na Resex Cajari. Em 1983, o transporte fluvial e ramais feitos manualmente eram os principais meios de deslocamento pela região para o transporte das sacas de castanha e outros produtos provenientes da agricultura.

Para o acesso à comunidade Água branca do Cajari (Braço do rio cajari), era necessário percorrer 24 km de ramal (Filocreão, 1983 Apud Filocreão, 1986). Em 1985, foi registrado a existência de um ramal com 52 km ligando a comunidade água branca do

cajari até a cachoeira de santo Antônio, e este estava em estado de abandono (Santana, 1985).

Em 1986, ocorreu um novo registro de ramal abandonado, com 74 km, ligando a cachoeira de santo Antônio a vila de laranjal do jari (Filocreão; Jorge; Bosques, 1986). Em 1990, houve a abertura de um ramal de 60 km pelo interior da floresta, ligando a comunidade de água branca do cajari até a sede do município de laranjal do jari (Filocreão, 1992).

Essas informações históricas revelam que existe uma dinâmica na abertura dos ramais por dentro das florestas, de acordo com a necessidade dos extrativistas. Alguns desses ramais podem ser observados na nossa área de estudo, provando a forte ligação entre a atividade extrativista e sua intervenção nos castanhais.

Mesmo com a atividade extrativista, a pressão dos fatores aleatórios ainda pode ser muito presente em floresta, e isto pode ser observado nos menores alcances (A) da variabilidade espacial, que chegou somente a 4000 m. Apesar da classificação de dependência espacial entre forte e moderada, é possível verificar visualmente nos semivariogramas experimentais o comportamento mais errático dos pontos para a estrutura horizontal (área basal e diâmetro).

Com o coeficiente do desvio relativo (CDR) foi possível verificar que entre as tipologias, tanto a densidade quanto a área basal foram as variáveis que apresentaram maior semelhança com o mapa de produtividade, revelando que os fatores que regulam espacialmente essas variáveis podem estar estruturadas de forma equivalente.

Resultados anteriores já evidenciaram a relação positiva entre variáveis arbóreas e a produção de frutos da castanheira, bem como a alta correlação entre a densidade de castanheiras e a produtividade (Souza et al., dados não publicados). Isso reforça a hipótese de que a produtividade de castanha na Amazônia oriental é altamente dependente da

densidade das castanheiras, principalmente na floresta aberta. Verifica-se que na floresta aberta o CDR foi 11 pontos menor do que na floresta densa e que a densidade máxima foi, praticamente, o dobro, chegando próxima a 30 castanheiras adultas por hectare.

Nas tipologias florestais, a maior concentração da produtividade de frutos e a densidade próximas as comunidades sugerem regiões com grande potencial logístico para a coleta de frutos. No estudo de Scoles & Gribel (2015), os autores mostraram a alta correlação entre o estabelecimento da castanheira e a maior intensidade de distúrbios e permanência de atividades humanas nos castanhais. Locais com pouca ou nenhuma atividade humana apresentaram baixa taxa de dispersores naturais e de regeneração, ou seja, a simbiose homem-castanheira tornou-se substancial para a evolução histórica dessas florestas manejadas na amazônia.

De forma antagônica a produtividade, a produção média em FA possui maior relação com o diâmetro do que com a densidade, este resultado já era esperado, pois existe correlação para a produção individual entre a produção de frutos e o diâmetro da árvore (Neves et al., 2015).

Já em FD, o mapa de produção média mostrou-se fortemente ligada a densidade, área basal e diâmetro. Devido a ocorrência de castanhais menos densos, maior proporção de castanheiras em classes intermediárias nessa tipologia (49,8%) e a relação com o diâmetro, acreditamos que o potencial de produção individual seja maior em relação FA. Os castanhais são considerados florestas mono-dominantes, onde a castanheira domina os espaços e a disponibilidade de luz de forma desproporcional (competição assimétrica) (TONINI & PEDROZO, 2014). Logo, a menor densidade de castanheiras por hectare pode favorecer a produção individual.

Infelizmente, não existem estudos que avaliaram a estrutura espacial de variáveis arbóreas e produtivas dos castanhais, logo, não é possível fazer comparações justas e

inferências sobre outros castanhais que estão sob manejo involuntário das comunidades tradicionais na amazônia brasileira. Este estudo mostrou através de uma perspectiva espacial, como a geoestatística pode auxiliar na possível detecção de alterações humanas em castanhais nativos na amazônia, e essas informações aliadas com indicadores ecológicos da presença humana nos castanhais podem fortalecer os resultados aqui encontrados.

### **Conclusões**

A estrutura espacial foi confirmada para todas as variáveis estudadas, principalmente no ambiente de floresta aberta, que apresentou maior variância ao longo da extensão da tipologia e grau de dependência espacial entre forte e moderado.

A estrutura espacial detectada em floresta densa sinaliza que, ao longo do tempo, o ambiente está sendo modificado pela prática extrativista e está beneficiando o estabelecimento dos castanhais. Entretanto, a pressão de fatores aleatórios ainda são presentes e mascaram a assinatura espacial das variáveis. Este fato é denunciado pelo baixo alcance (A) de variação, que cai pela metade em relação a floresta aberta, e o comportamento mais errático no semivariograma experimental.

A produtividade de frutos se mostrou intimamente ligada a densidade e área basal em ambas as tipologias. Entretanto, este resultado é mais evidente em floresta aberta por possuir castanhais mais densos. Em floresta densa, o potencial de produção individual foi superior a floresta aberta, por possuir maior proporção de castanheiras com maturidade reprodutiva e menor densidade de castanheiras por hectare.

O futuro dos castanhais da reserva extrativista do rio Cajari pode não depender exclusivamente do enriquecimento da espécie em áreas abertas, a atividade extrativista em florestas densas pode propiciar um ambiente adequado à formação de novos castanhais, garantindo a subsistência das populações tradicionais.

## **Agradecimentos**

A Embrapa Amapá pela parceria no projeto e disponibilidade dos dados. Ao laboratório de manejo florestal da Universidade Federal de Lavras – UFLA. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento a esta pesquisa através da bolsa de mestrado.

## **Referencial Bibliográfico**

- Almeida, J. J., 2016. The Beginnings of the Exploration of the Brazil Nut in the Amazon (18th-20th centuries). 6th International Conference on Economic History and VIII Graduate Meeting in Economic History. São Paulo: University of São Paulo; p. 1–32.
- Almeida, A. S., Bettini, C., 1994. Curso de Geoestatística Aplicada. Rio de Janeiro, UFRJ.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., Sparovek, G., 2013. Köppen climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* v. 22, p. 711–728.
- Andrade, V. L. C., Flores, B. M., Levis, C., Clement, C. R., Roberts, P., Schöngart, J., 2019. Growth rings of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa*) as a living record of historical human disturbance in Central Amazonia. **PLOS ONE**, 14(4), e0214128. doi:10.1371/journal.pone.0214128.
- Biondi, F., Myers, D. E., Avery, C. C., 1994. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal Forest Research, Ottawa**, v. 24, p. 1354-1368.

Balée, W., 2006, The research program of historical ecology. *Annual Review of Anthropology*; 35:75–98.

Brienen, R. J. W., Zuidema, P. A., 2006. Lifetime growth patterns and age of bolivian rain forest tree obtained by tree ring analysis. *Journal of Ecology* 94, 481 – 493.

Balée, W., 1998. Historical ecology: premises and postulates. In: Balée, W. (Ed.). *Advances in Historical Ecology*. Pages 13-29. Columbia University Press. New York, USA.

BRASIL (1990) Decreto N° 99.145 de 12 de março de 1990, Criação da Reserva Extrativista do Rio Cajari.

Brasil, Ministério de Meio Ambiente (MMA). Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). 2017. Serie: Legislação ICMBio - Sistema Nacional de Unidades de Conservação. v. 1.

Boot, G. A.; Zuidema, P. A., 2002 Demography of the Brazil nut tree ( *Bertholletia excelsa*) in the Bolivian Amazon: impact of seed extraction on recruitment and population dynamics. [s. l.], p. 1–31.

BATISTA, A. P. B. Modelagem do crescimento e produção de frutos da castanheira da Amazônia. 2018. 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

- Batista, A. P. B., Scolforo, H. F., Mello, J. M., Guedes, M. C., Terra, M. C. N. S., Scalon, J. D., Gomide, L. R., Scolforo, P. G. V., & Cook, R. L., 2019 Forest Ecology and Management Spatial association of fruit yield of *Bertholletia excelsa* Bonpl. trees in eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, 441, 99–105. doi: 10.1016/j.foreco.2019.03.043
- Ciarnoschi, L. D., Orso, G. A., Cerqueira, C. L., Pelissari, A. L., Netto, S. P., Oliveira, M. V. N., 2019. Modelagem da distribuição diamétrica de três espécies da região amazônica. **Advances in Forestry Science**. [s. l.], p. 731–736.
- Coelho, E.C., Souza, E.G., Uribe-Opazo, M.A., Pinheiro Neto, R., 2009. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. *Acta Sci.*, 31:165-174.
- Campbell, D. G., Ford, A., Lowell, K. S., Walker, J., Lake, J. K., Ocampo-Raeder, C., Townesmith, A., Balick, M., 2006. The feral forest of the eastern petén. In Balée, w. Erickson, C. L. (Eds), *Time and complexity in historical ecology: studies in the neotropical lowlands*. Columbia University Press, New Yourk, USA, pp. 21-55.
- Environmental Systems Research Institute. Geostatistical analyst tutorial. Redlands: ESRI; 2010. 57 p.
- Engelbrecht, B. M. J., Herz, H. M., 2001. Evaluation of Diferent Methods to Estimate Understory Ligth Conditions in Tropical Forests. **Jornal of Tropical Ecology**. v. 17, p. 207- 224.

- Filho, R. G., Carvalho M. D., Montanari, R., Silva, J. M., Siqueira, G. M., & Zambianco, E. C., 2011. Variabilidade espacial de propriedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho. *Bragantia*, 70(2), 439-46. doi: 10.1590/S0006-87052011000200027.
- Filocreão, A.S.M., Jorge, S.P.S., Bosques, P.P., 1986 Situação agrária da região do Jarí – Município de Mazagão. Macapá: p. 15. Mimeografado.
- Filocreão, Antonio Sergio Monteiro. Extrativismo e Capitalismo: a manutenção, funcionamento e reprodução da economia extrativista do Sul do Amapá. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1992. 236f. Dissertação (Mestrado em Economia).
- Guedes, M. C., Neves, E. S., Rodrigues, E. G., Paixa, P. Costa, J. B. P. C., Costa, C., Freitas, M. F., Lemos, L. M., 2014. “Castanha na roça”: expansão da produção e renovação dos castanhais em áreas de agricultura itinerante no Amapá, Brasil “Castanha na roça”: increasing yields and renewing Brazil nut stands through shifting cultivation in Amapá State , Brazil. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. **Cienc. Nat.** v.419: pp. 381–398.
- Guerreiro, Q. L. M., Júnior, R. C. O., Santos, G. R., Ruivo, M. L. P., Beldini, T. P., Carvalho, E. J. M., Silva, K. E., Guedes, M. C., Santos, P. R. B., 2017. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. **African Journal of Agricultural Research**. v. 12, n. 4, pp. 237-250, 26 january.

Hoorn, C., Wesselingh, F. P., Steege, H. T., Bermudez, M. A., Mora, A., Sevink, J., Sanmartín, I., Sanchez-Meseguer, A., Anderson, C. L., Figueiredo, J. P., Jaramillo, C., Riff, D., Negri, F. R., Hooghiemstra, H., Lundberg, J., Stadler, T., Särkinen, T., Antonelli, A., 2010. Amazonia Through Time : Andean. **Science**, [s. l.], v. 330, n. November, p. 927–931.

Hemming, J., 1995. Red gold: the conquest of the Brazilian Indians. 2 ed. London: **Papermac**.

IBGE—Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Produção e Extração Vegetal da castanha-do-brasil no Amapá, 2019.

IVANOV, G. B. **Influência de variáveis dendrométricas, anatômicas e ambientais na produção de frutos e sementes de *Bertholletia excelsa* H.B.K.** 2011. 96f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

JENSEN, J.R. (2015). *Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective* (fourth ed), Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, pp. 148–148.

Journel, A.G., Huijbregts, C.J., 2003. *Mining geostatistics*. Caldwell, Blackburn Press, 600p.

Jardim, F. C. S., Serrão, D. R.; Nemer, T. C., 2007. Efeito de diferentes tamanhos de clareiras sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas em Moju-PA. **Acta Amazonica**. V. 37, p. 36-48.

- Levis, C., Flores, B. M., Moreira, P. A., Luize, B. G., Alves, R. P, Franco-Moraes, J., et al., 2018. How people domesticated Amazonian forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*; 5: 171.
- Kainer, K. A., 2007. Explaining variation in Brazil nut fruit production. [s. l.], v. 250, p. 244–255.
- Mori, S. A., Prance, G. T., 1990. Taxonomy, Ecology, and Economic Botany of the Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.: Lecythidaceae). **Advances in Economic Botany**. v. 8: pp. 130–150.
- Moran, E. F., 2010. *Environmental Social Science: Human-Environment Interactions and Sustainability*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Mello, J. D., Batista, J. L. F., Ribeiro Junior, P. J., Oliveira, M. D., 2005. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, 69 (1).
- Moll-Rocek, J., Gilbert, M. E., Broadbent, E. N., 2014. Brazil nut (*Bertholletia excelsa*, Lecythidaceae) regeneration in logging gaps in the Peruvian Amazon. **Internacional Journal of Forestry Research**, [s.l], v.1, p. 1-8.

- Neves, E. S., Wadt, L. H. O., Guedes, M. C., 2016. Estrutura populacional e potencial para o manejo de *Bertholletia excelsa* (Bonpl.) em castanhais nativos do Acre e Amapá. **Scientia Forestalis**. v. 44, n. 109, p. 19-31.
- Neves, E. S., Guedes, M. C., Rodrigues, E. G., 2015. Relação da produção de frutos de castanha-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) com variáveis das próprias castanheiras, em capoeira e floresta da Resex Cajari. **Biota Amazônia**. Macapá, v. 5, n. 2, p. 31-37. Disponível em <http://periodicos.unifap.br/index.php/biota>.
- Paiva, P. M., Guedes, M. C., M. C, Funi, C., 2011. Brazil nut conservation through shifting cultivation. **Forest Ecology and Management** 261(3): 508-514.
- Pelissari, A. L., Figueiredo Filho, A., Caldeira, S. F., Machado, S. D. A., 2014. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso. *Revista Brasileira de Biometria*, 32(3), 430-444.
- Pelissari, A. L., Figueiredo Filho, A., Sanquetta, C. R., Ebling, A. A., Roveda, M., Cysneiros, V. C., 2016. Estrutura espacial arbórea de um remanescente natural de floresta ombrófila mista. **Biofix Scientific Journal**, 1(1). doi: 10.5380/biofix.v1i1.49094
- Peres, C. A., Baider, C., Zuidema, P. A., Wadt, L. H. O., Kainer, K. A., Gomes-Silva, D. A. P., Salomão, R. P., Simões, L. L., Franciosi, E. R. N., Cornejo Valverde, F., Gribel, R., Shepard Jr, G. H., Kanashiro, M., Coventry, P., Yu, D. W., Watkinson, A. R., Freckleton, R. P., 2003. Ameaças demográficas à sustentabilidade da exploração da castanha do brasil. **Science**. 302: 2112, 2114.

Posey, D. A., 1985. Indigenous management of tropical forest ecosystem: the case of Kayapó Indians of the Brazilian Amazon. *Agroforestry System*. 3: 139 – 158.

Euler, A. M. C., Picanço, A. E. L., Sousa, M. A. R., Guedes, M. C., Souza, W. P., 2017. Mapeamento participativo dos castanhais da reserva extrativista do Rio Cajari, Amapá. III Jornada Científica da Embrapa Amapá.

Ribeiro Junior, P. P., Diggle, P. P., 2001. GeoR: a package for geostatistical analysis. *R News*, Rochester, v. 1, n. 2, p. 15-18.

Ribeiro, M. B. N., Jerozolinski, A., Robert, P., Magnusson, W. E., 2014. Estoque e colheita de castanha do Brasil em diferentes escalas espaciais no Sudeste da Amazônia. *Ecologia Florestal e Manejo*, 319: pp. 67 – 74.

Roosevelt, A. C., 1992. Arqueologia Amazônica. In: CUNHA, M. C. (Ed.). Páginas 53 – 86. *História dos índios no Brasil*. Cia. das Letras. São Paulo, São Paulo, Brasil.

Rabelo, B. V., 2008. (Coord). *Macrodiagnóstico do Estado do Amapá: primeira aproximação do ZEE*. 3. ed. Macapá: Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, Equipe Técnica do Programa Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Amapá, 139 p.

RADAMBRASIL, 1974. Levantamento de recursos naturais. Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins. Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Disponível em: [www.gbif.org](http://www.gbif.org). Acesso em: 01/09/2019.

Roberts, P., Hunt, C., Arroyo-Kalin, M., Evans, D., Boivin, N., 2017. The deep human prehistory of global tropical forests and its relevance for modern conservation. *Nature Plants*. 3 (8).

Silva, A. A., Santos, M. K. V., Gama, J. R. V., Noce, R., Leão, S., 2013. Potencial do extrativismo da castanha-do-pará na geração de renda em comunidades da mesorregião baixo amazonas, Pará. **Floresta e Ambiente**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 500–509.

Shepard, G. H., Ramirez, H., 2011. “Made in Brazil”: Human Dispersal of the Brazil Nut (*Bertholletia excelsa*, Lecythidaceae) in Ancient Amazonia. **Economic Botany**, [s. l.], v. 65, n. 1, p. 44–65.

Scoles, R., Gribel, R., 2011. A regeneração das castanheiras em relação à intensidade de colheita dos castanhais no vale do rio Trombetas, norte da Amazônia, Brasil. **Ecologia Florestal e Manejo**. ed. 265, pp: 71 – 81.

Schöngart, J., Gribel, R., Ferreira, S.F.F., Haugaasen, T., 2015. Age and Growth Patterns of Brazil Nut Trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil. **Biotropica**. 47(5): 550–558.

Scoles, R., Gribel, R., 2015. Human influence on the regeneration of brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl., Lecythidaceae) at Capanã Grande Lake, Manicoré, Amazonas, Brazil. **Human Ecology**, New York, v. 43, p. 843-854.

Scoles, R., Gribel, R., 2012. The regeneration of Brazil nut trees in relation to nut harvest intensity in the Trombetas River valley of Northern Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 265, p. 71-81.

Souza, D. G., Almeida, S. S., Amaral, D. D., 2014. Estrutura de uma população manejada de castaneira (*Bertholletia excelsa*) na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Belem, v. 9, n. 2, p. 353-370.

Sousa, D. G., Almeida, S. S., Amaral, D. D., 2014. Estrutura de uma população manejada da castaneira (*Bertholletia excelsa*) na floresta nacional do Caxiunã, Pará. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências naturais. (9), pp. 353 – 370.

Scolforo, H. F., Scolforo, J. R. S., Mello, C. R., Mello, J. M., Filho, A. C. F., 2015. Spatial distribution of aboveground carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Savanna, Atlantic Forest and Semi Arid Woodland. **Plos One**, 10(6):1-2015.

Silva, K. A., Rodrigues, M. S., Cunha, J. C., Alves, D. C., Freitas, H. R., Lima, A. M. N., 2017. Levantamento de solos utilizando geoestatística em uma área de experimentação agrícola em Petrolina-PE. **Comunicata Scientiae**.v.8, p.175-180.

- Salomão, R. P., 2009. Densidade, estrutura e distribuição espacial da castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H. & B.) em dois platôs de floresta ombrófila densa na Amazônia setentrional brasileira. **Boletim do museu paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais, 4: 11 – 25.
- Scoles, R., Gribel, R., 2012. A regeneração das castanheiras em relação à intensidade da colheita de castanhas no vale do rio Trombetas, norte da Amazônia, Brasil. **Forest Ecology and Management**, 265: 71 – 81.
- SANTANA, Cleudon José Barbosa (Org.), 1985. Diagnostico da região do Laranjal do Jarí. Macapá: Governo do Território Federal do Amapá, p. 40. Mimeografado.
- Sternberg, H.O.R., 1998. The water and the man in the lowland of Careiro. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi; 330 p.
- Tonini, H., Ivanov, G. B., Fleig, F. D., 2018. Fatores edafoclimáticos relacionados à produção de sementes em castanhas nativos de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 38.
- Tonini, H.; Baldoni, A. B., 2019. Estrutura e regeneração de *Bertholletia excelsa* Bonpl. em castanhas nativos da Amazônia. **Ciência Florestal**., Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 607 – 621, abr./jun.
- Thomas, E., Valdivia, J., Caicedo, C. A., Quaedvlieg, J., Wadt, L. H. O., Corvera, R., 2017. NTFP harvesters as citizen scientists: Validating traditional and crowdsourced knowledge

on seed production of Brazil nut trees in the Peruvian Amazon. **PLoS ONE** 12(8): e0183743.

Tonini, H., Baldoni, A. B., 2019. Estrutura e regeneração de *Bertholletia excelsa* Bonpl. em castanhais nativos da Amazônia. **Ciência Florestal**. V. 29, n.2, p. 607-621, abr./jun.

Thomas, E., Caicedo, C. A., Mcmichael, C. H., Corvera, R., Loo, J., 2015. Uncovering spatial patterns in the natural and human history of Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) across the Amazon basin. **Journal of Biogeography**, Oxford, v. 42, p. 1367 – 1382.

Tapiassú, A., Oliveira, N. V. C., 1967. A castanha do pará, estudos preliminares. IDESP, Belém, Pará. Cadernos Paraenses: 3: 1 – 39.

Tonini, H., Pedrozo, C. A., 2014. Variações anuais na produção de frutos e sementes de castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl., Lecythidaceae) em florestas nativas de Roraima. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 133-144.

Vieira, S. R., 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.) Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54.

Willis, K. J., Gullson, L., Brncic, T. M., 2004. How “virgin” is the virgin rainforest? **Science**. 304: 402-403.

Wadt, L. H. O., Kainer, K. A., Gomes-Silva, D. A. P., 2005. Population structure and nut yield of a *Bertholletia excelsa* stand in Southwestern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 211, n. 3, p. 371–384.

Wadt, L. H. O., Kainer, K. A., Staudhammer, C. L., Serrano, R. O. P., 2008. Uso sustentável da floresta em reserva extrativista brasileira: regeneração natural do Brasil em populações exploradas. **Conservação Biológica**, 141: 332 – 346.

Wadt, L. H., Faustino, C. L., Staudhammer, C. L., Kainer, K. A., Evangelista, J. S., 2018. Primary and secondary dispersal of *Bertholletia excelsa* : Implications for sustainable harvests. *Forest Ecology and Management*, [s. l.], v. 415–416, n. July 2017, p. 98–105.

Zuidema, P.A., Boot, R. G. A., 2002. Demography of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in the bolivian amazona: impact of seed extraction on recruitment and population dynamics. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v.18, n.1, p. 1-31.

Zuidema, P. A., 2003. Demography and management of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl). Riberalta, PROMAB.