

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE FLORESTAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**TESE**

**Associação da Produção de Frutos de *Bertholletia  
excelsa* com os Atributos do Solo em Dois Castanhais  
Nativos na Amazônia Ocidental**

**Camila Santos da Silva**

**2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**ASSOCIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FRUTOS DE *Bertholletia excelsa*  
COM OS ATRIBUTOS DO SOLO EM DOIS CASTANHAIS NATIVOS  
NA AMAZÔNIA OCIDENTAL**

**CAMILA SANTOS DA SILVA**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Marcos Gervasio Pereira**

*e Coorientação dos Pesquisadores*  
**Lucia Helena de Oliveira Wadt &  
Luciello Manoel da Silva**

Tese submetida como requisito parcial  
para obtenção do grau de Doutora em  
Ciências, no Programa de Pós-  
Graduação em Ciências Ambientais e  
Florestais, Área de Concentração em  
Silvicultura e Manejo Florestal

Seropédica, RJ  
Agosto de 2022

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586a Silva, Camila Santos da, 1991-  
Associação da produção de frutos de Bertholletia  
excelsa com os atributos do solo em dois castanhais  
nativos na Amazônia Ocidental / Camila Santos da  
Silva. - Seropédica, 2022.  
77 f.: il.

Orientador: Marcos Gervasio Pereira.  
Coorientadora: Lucia Helena de Oliveira Wadt .  
Coorientador: Lucielio Manoel da Silva.  
Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do  
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais e Florestais, 2022.

1. Castanheira-da-amazônia. 2. Propriedades do  
solo. 3. Variabilidade espacial. 4. Estatística  
multivariada. 5. Amazônia Ocidental. I. Pereira,  
Marcos Gervasio , 1965-, orient. II. Wadt , Lucia  
Helena de Oliveira , -, coorient. III. Silva,  
Lucielio Manoel da , -, coorient. IV Universidade  
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós  
Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. V.  
Titulo.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**CAMILA SANTOS DA SILVA**

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

TESE APROVADA EM 30/08/2022

---

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ  
(Orientador)

---

Bruno Araújo Furtado de Mendonça. Dr. UFRRJ

---

Emanuel José Gomes de Araújo. Dr. UFRRJ

---

Alexander Silva de Resende. Dr. Embrapa Agrobiologia

---

Deivid Lopes Machado. Dr. UFJ



Emitido em 2022

**TERMO Nº 1052/2022 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 05/10/2022 16:12 )*  
BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONÇA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)  
Matrícula: 2145654

*(Assinado digitalmente em 05/10/2022 19:55 )*  
EMANUEL JOSE GOMES DE ARAUJO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
CoordCGEFlo (12.28.01.00.00.00.26)  
Matrícula: 1978275

*(Assinado digitalmente em 05/10/2022 16:01 )*  
MARCOS GERVASIO PEREIRA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)  
Matrícula: 1060711

*(Assinado digitalmente em 11/10/2022 08:25 )*  
ALEXANDER SILVA DE RESENDE  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 035.567.497-18

*(Assinado digitalmente em 05/10/2022 16:07 )*  
DEIVID LOPES MACHADO  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 106.717.987-90

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número:  
**1052**, ano: **2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **05/10/2022** e o código de verificação: **a2e9b107d4**

*À Vida, à Natureza e se existe algo além de nós,  
À minha mãe, Sônia (Soninha para os íntimos), à minha vó, Maria José (minha  
segunda mãe) e ao meu pai, Ney, por tudo que fizeram e ainda fazem por mim,  
e ao Gabriel, pelo cuidado e carinho.*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por todo ensino, amizades e pelas experiências e encontros que continuamente me proporciona. “Minha terra tem palmeiras onde canta o pica-pau. Não permita, Deus, que eu morra sem que eu volte na Rural”.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, pelo ensino de excelência e por me formar no campo técnico e científico.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao meu orientador, Marcos Gervasio Pereira, por todos os ensinamentos, por acreditar em mim, por ser tão solícito e paciente.

Aos meus coorientadores, Lucia Helena de Oliveira Wadt e Lucielio Manoel da Silva, pela confiança, pelo apoio e participação.

À Embrapa Acre, especialmente, ao Pedro Raimundo Rodrigues de Araujo, Aldeci da Silva Oliveira, Fernanda Lopes da Fonseca e Hudson de Sousa Nardi, pela ajuda na alocação das parcelas e coleta do material.

Ao Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Ocidental por realizarem as análises laboratoriais.

À Katia Emidio da Silva, coordenadora do projeto e a Daniela Popim Miqueloni pelo auxílio no projeto.

Ao professor Felipe Leite Coelho da Silva pela disponibilidade e auxílio nas análises estatísticas.

Aos membros do Laboratório de Gênese e Classificação do Solo pela amizade e apoio.

Às amigas Nat e Shirlei, que mesmo com a distância, mantemos nossa amizade viva e natural.

Ao meu terapeuta Roberto Antônio Duarte Adão por manter a minha sanidade mental, pelas risadas, por me socorrer diversas vezes, pelo carinho, pelas palavras sábias e por estar em todos os momentos da minha vida, sejam eles bons ou ruins.

À minha família, especialmente, ao Marcos Vinicios, Damião e Nininha.

À Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Serviços Públicos de São João da Barra pelo trabalho árduo, mas gratificante, especialmente, a Secretária de Meio Ambiente, Marcela Toledo, pelo apoio e compreensão.

Aos amigos de trabalho, especialmente, ao Kaique, Luana, Marcelo, Maria Ignez, Mariana, Phelippe, Renata e Sávio, pelos saberes compartilhados, pelo apoio, amizade e é claro, as boas risadas diárias.

À família Ribeiro, Ana Maria, Ana Luzia, Marcelo pai e Marcello filho (ainda não conheço, mas já considero) e Mel, por me acolherem e serem tão especiais.

Ao Júnior, Adriana e Marcos pela recepção em São João da Barra, pelo carinho e cuidado diário.

E a todos que me ajudaram de alguma forma a chegar até aqui.

Muito obrigada!

## RESUMO GERAL

SILVA, Camila Santos da. **Associação da produção de frutos de *Bertholletia excelsa* com os atributos do solo em dois castanhais nativos na Amazônia Ocidental**. 2022. 77p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

A castanheira-da-amazônia é um dos principais produtos extrativistas da Amazônia, visto que suas sementes possuem grande valor econômico, sendo fonte de renda para famílias extrativistas. Estudos demonstram que o solo e a disponibilidade de nutrientes influenciam na variação da produção de frutos de *B. excelsa*. Esta pesquisa foi realizada em dois castanhais nativos no estado do Acre, Cachoeira e Filipinas, que apresentam distintas produções de frutos. Os objetivos deste estudo foram avaliar a relação entre a variabilidade espacial das propriedades do solo em diferentes classes de solo, a ocorrência de plantas e a produção de frutos, além de investigar associações entre a produção de frutos e o diâmetro a 1,30 m do solo – DAP da espécie com os atributos do solo nos castanhais avaliados. O estudo foi realizado em duas áreas com dimensões de 600 × 600 m (36 ha) cada em dois castanhais nativos. Em cada área, foram identificados os perfis de solo e coletadas 60 amostras de terra. Foram determinados os atributos químicos, textura, densidade do solo e das partículas e a porosidade total. A produção média de frutos foi calculada a partir da contagem de frutos em uma amostra de castanheiras, 51 e 34 árvores no Cachoeira e no Filipinas, respectivamente. Posteriormente, as árvores foram divididas em três classes de produção: baixa ( $\leq 1,5$  lata), média (1,6 a 3,9 latas) e alta ( $\geq 4,0$  latas). Foi realizada a análise geoestatística para avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo, a análise fatorial (AF) para associar as variáveis da vegetação (produção de frutos, ocorrência de plantas e DAP) com os atributos do solo, e a análise de agrupamentos para testar a similaridade entre as propriedades do solo e a produção de frutos e DAP. Para verificar se os atributos do solo explicaram as classes de produção de frutos foram utilizadas as redes neurais artificiais (RNAs). A maior ocorrência de castanheiras com alta produção de frutos ( $\geq 4,0$  latas) foi encontrada nas classes de solo Latossolo Vermelho Distrófico argissólico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, sendo nesse último também observadas castanheiras com as menores produções ( $\leq 1,5$  lata). Em uma das áreas do Filipinas (FP02) foi verificado o maior número de propriedades com alta variabilidade espacial em relação às demais áreas. No Cachoeira, castanhal com maior produção, a areia foi associada positivamente com a produção de frutos e DAP na AF e Cluster. No Filipinas, castanhal com menor produção, a argila ficou correlacionada com a produção de frutos na AF, enquanto na análise de Cluster, a produção ficou agrupada com as variáveis argila e Cu. Para as RNAs, foi verificado um baixo percentual de acerto no Cachoeira, enquanto no Filipinas, houve correta classificação das classes de produção de frutos por meio dos atributos do solo, demonstrando que existe diferença nas propriedades do solo entre as classes de produção. Em geral, os atributos físicos do solo foram fatores limitantes para a produção de frutos e/ou maior ocorrência de árvores. No Filipinas foi verificada baixa produção de frutos e maior variabilidade espacial dos atributos do solo em relação ao Cachoeira. Em geral, nos solos com textura franca foram verificados maiores valores de produção. No castanhal Filipinas os atributos do solo foram capazes de classificar corretamente as classes de produção de frutos.

**Palavras-chave:** castanheira-da-amazônia, propriedades do solo, variabilidade espacial, estatística multivariada.

## GENERAL ABSTRACT

SILVA, Camila Santos da. **Association of *Bertholletia excelsa* fruit production with soil attributes in two native Brazil nut stands in the Western Amazon.** 2022. 77p. Thesis (Doctor in Environmental Science and Forestry). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2022.

The Brazil nut is one of the main extractive products in the Amazon, since its seeds have great economic value, being a source of income for extractive families. Studies show that soil and nutrient availability influence the variation in fruit production of *B. excelsa*. This research was carried out in two native chestnut groves in the state of Acre, Cachoeira and Filipinas, which have different fruit productions. The objectives of this study were to evaluate the relationship between the spatial variability of soil properties in different soil classes, the occurrence of plants and fruit production, in addition to investigating associations between fruit production and diameter at 1.30 m from the soil – DBH of the species with soil attributes in the evaluated chestnut groves. The study was carried out in two areas measuring 600 × 600 m (36 ha) each in two native chestnut groves. In each area, soil profiles were identified and 60 soil samples were collected. Chemical attributes, texture, soil and particle density and total porosity were determined. The average fruit production was calculated from the fruit count in a sample of Brazil nut trees, 51 and 34 trees in Cachoeira and Filipinas, respectively. Subsequently, the trees were divided into three production classes: low ( $\leq 1.5$  cans), medium (1.6 to 3.9 cans) and high ( $\geq 4.0$  cans). Geostatistical analysis was performed to evaluate the spatial variability of soil attributes, factor analysis (FA) to associate vegetation variables (fruit production, plant occurrence and DBH) with soil attributes, and cluster analysis for to test the similarity between soil properties and fruit production and DBH. To verify if the soil attributes explained the fruit production classes, artificial neural networks (ANNs) were used. The highest occurrence of Brazil nut trees with high fruit production ( $\geq 4.0$  cans) was found in the *Latossolo Vermelho distrófico argissólico* (Oxisol) and *Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico* (Ultisol) soil classes, with chestnut trees with the lowest yields ( $\leq 1.5$  tin). In one of the areas of the Filipinas (FP02) the largest number of properties with high spatial variability was verified in relation to the other areas. In Cachoeira, chestnut with the highest production, sand was positively associated with fruit production and DBH in FA and Cluster. In the Filipinas, chestnut with lower production, clay was correlated with fruit production in FA, while in the Cluster analysis, production was grouped with the clay and copper variables. For the ANNs, a low percentage of correct answers was verified in Cachoeira, while in the Filipinas, there was a correct classification of fruit production classes through soil attributes, demonstrating that there is a difference in soil properties between production classes. In general, soil physical attributes were limiting factors for fruit production and/or greater occurrence of trees. In the Filipinas, low fruit production and greater spatial variability of soil attributes were observed in relation to Cachoeira. In general, higher production values were observed in soils with fair texture. In Filipinas chestnut, soil attributes were able to correctly classify the classes of fruit production.

**Keywords:** Brazil nut, soil properties, spatial variability, multivariate statistics.

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Estatística descritiva da produção de frutos medida em latas nos Castanhais Cachoeira - Áreas CP01 e CP02 e Filipinas - Áreas FP01 e FP02.	11
<b>Tabela 2.</b> Estatística descritiva das propriedades físicas e químicas do solo em quatro áreas de 36 ha cada, em dois castanhais nativos no estado do Acre.	13
<b>Tabela 3.</b> Modelos teóricos ajustados e validação cruzada para as propriedades físicas e químicas do solo em quatro áreas de 36 ha cada, em dois castanhais nativos no estado do Acre.	15
<b>Tabela 4.</b> Classificação da textura do solo em dois castanhais nativos localizados na Amazônia Ocidental, Acre.	40
<b>Tabela 5.</b> Estatística descritiva para os atributos da vegetação e do solo em dois castanhais nativos, Cachoeira e Filipinas, na Amazônia Ocidental, Acre.	44
<b>Tabela 6.</b> Eixos fatoriais extraídos para os atributos da vegetação e do solo e as respectivas cargas fatoriais, autovalores, variância total e acumulada e comunalidade do Cachoeira na Amazônia Ocidental, Acre.	46
<b>Tabela 7.</b> Eixos fatoriais extraídos para os atributos da vegetação e do solo e as respectivas cargas fatoriais, autovalores, variância total e acumulada e comunalidade do Filipinas na Amazônia Ocidental, Acre.	47
<b>Tabela 8.</b> Variáveis de entrada e estrutura da rede para o ajuste de RNA nos dois castanhais, Cachoeira e Filipinas.	49
<b>Tabela 9.</b> Matriz de confusão entre as classes de produção e a classificação por RNA no Cachoeira.	50
<b>Tabela 10.</b> Matriz de confusão entre as classes de produção e a classificação por RNA no Filipinas.	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Dendrograma com o agrupamento das áreas dos Castanhais Cachoeira e Filipinas relacionado à produção de frutos e número de indivíduos. CP01 e CP02 = Cachoeira; FP01 e FP02 = Filipinas. 11
- Figura 2.** Mapa com os perfis de solo e a produção média de frutos da castanheira-da-amazônia no Cachoeira – Áreas 1 e 2 (CP01 e CP02) e Filipinas – Áreas 1 e 2 (FP01 e FP02). Os círculos nos mapas correspondem às classes de produção de frutos entre os anos 2010 e 2020, enquanto os pontos representam os locais onde as amostras de terra foram coletadas. Fonte: Adaptado de Bardales et al. (2011) e Ferreira et al. (2017). 12
- Figura 3.** Dendrograma com agrupamento das classes de solo (perfis), em relação à produção de frutos e número de indivíduos. PVAdpl = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico; LVdar = Latossolo Vermelho Distrófico argissólico; PVAdti = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico; PVdab = Argissolo Vermelho Distrófico abruptico; PVAdla = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico; PVAdpe = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico petroplúntico. 13
- Figura 4.** Distribuição espacial das propriedades físicas e químicas do solo no Castanhais Cachoeira - Área 1, no estado do Acre. As linhas e valores nos mapas correspondem à altitude da área, os círculos correspondem à produção média de frutos entre os anos 2010 e 2020 e os valores apresentados nas legendas são os atributos do solo. 17
- Figura 5.** Distribuição espacial das propriedades físicas e químicas do solo no Castanhais Cachoeira - Área 2, no estado do Acre. As linhas e valores nos mapas correspondem à altitude da área, os círculos correspondem à produção média de frutos entre os anos 2010 e 2020 e os valores apresentados nas legendas são os atributos do solo. 19
- Figura 6.** Distribuição espacial das propriedades físicas e químicas do solo no Castanhais Filipinas - Área 1, no estado do Acre. As linhas e valores nos mapas correspondem à altitude da área, os círculos correspondem à produção média de frutos entre os anos 2010 e 2020 e os valores apresentados nas legendas são os atributos do solo. 21
- Figura 7.** Distribuição espacial das propriedades físicas e químicas do solo no Castanhais Filipinas - Área 2, no estado do Acre. As linhas e valores nos mapas correspondem à altitude da área, os círculos correspondem à produção média de frutos entre os anos 2010 e 2020 e os valores apresentados nas legendas são os atributos do solo. 23
- Figura 8.** Mapa de localização dos castanhais nativos, Cachoeira e Filipinas, na Amazônia Ocidental, com detalhe a localização das áreas (1 e 2) em cada castanhais, a amostragem de terra e os indivíduos da espécie *Bertholletia excelsa* com DAP maior ou igual a 50 cm. 39
- Figura 9.** Distribuição do número de árvores por classes de produção de frutos de *Bertholletia excelsa*, em dois castanhais nativos, Cachoeira e Filipinas, na Amazônia Ocidental, Acre. 44
- Figura 10.** Dendrograma da análise de Cluster realizada para os atributos da vegetação e do solo no Cachoeira. 48

**Figura 11.** Dendrograma da análise de Cluster realizada para os atributos da vegetação e do solo no Filipinas. 49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO I: CLASSES E PROPRIEDADES DO SOLO EXPLICAM A OCORRÊNCIA E A PRODUÇÃO DE FRUTOS DA CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA<sup>1</sup></b>	<b>3</b>
2.1	RESUMO	4
2.2	ABSTRACT	5
2.3	INTRODUÇÃO	6
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	8
2.4.1	Áreas de estudo	8
2.4.2	Propriedades químicas e físicas do solo	8
2.4.3	Produção de frutos	9
2.4.4	Análises estatística e geoestatística	9
2.5	RESULTADOS	11
2.5.1	Produção de frutos	11
2.5.2	Relação entre classes de solo e produção de frutos	11
2.5.3	Propriedades químicas e físicas do solo	13
2.6	DISCUSSÃO	25
2.7	CONCLUSÕES	29
2.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO II: FATORES EDÁFICOS ASSOCIADOS COM A PRODUÇÃO DE FRUTOS E O DIÂMETRO DE <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl. EM CASTANHAIS NATIVOS</b>	<b>34</b>
3.1	RESUMO	35
3.2	ABSTRACT	36
3.3	INTRODUÇÃO	37
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	39
3.4.1	Área de estudo	39
3.4.2	Atributos do solo	40
3.4.3	Atributos da vegetação	41
3.4.4	Análise de dados	41
3.5	RESULTADOS	44
3.5.1	Produção de frutos	44
3.5.2	Análise fatorial	44

3.5.3	Análise de Cluster	48
3.5.4	Redes Neurais Artificiais	49
3.6	DISCUSSÃO	52
3.5	CONCLUSÕES	56
3.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	<b>62</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>63</b>

# 1 INTRODUÇÃO GERAL

Os produtos florestais não madeireiros (PFNMs) são produtos colhidos na floresta, como raízes, folhas, frutos, sementes, cascas, resinas, óleos, cipós, mel e outros. Esses produtos são de grande importância econômica, social e política (AGUIAR et al., 2017). Além disso, colaboram com a conservação das florestas e contribuem para a subsistência dos extrativistas, fornecendo medicamentos e alimentos, e ainda apresentam relevância para a economia e cultura local (HOMMA, 2014). Apesar de sua importância, há um grande desafio para que esses produtos tenham um retorno economicamente viável, por meio de sua comercialização e responsabilidade na extração desses recursos (ALMEIDA, 2010).

A semente da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) é um dos principais produtos extrativistas da Amazônia (MENEGUETTI et al., 2015). Suas sementes são saborosas e nutritivas, e por isso possui alto valor econômico, sendo uma das principais fontes de renda dos extrativistas da região, além de ser um PFM que estimula a conservação das florestas (BAYMA et al., 2014; MENEGUETTI et al., 2015); logo, *B. excelsa* é considerada uma das espécies mais relevantes do Bioma Amazônico (GUERREIRO et al., 2017). A produção de seus frutos e sementes depende de muitos fatores, como o clima (BERTWELL et al., 2018), a presença de lianas (KAINER et al., 2006), a altura e diâmetro das árvores e a disponibilidade de nutrientes no solo (KAINER et al., 2007). Os atributos do solo são fatores determinantes para a produção de frutos de *B. excelsa*. No entanto, o conhecimento sobre os efeitos das características do solo com a produção de castanhas ainda é incipiente (ZUIDEMA, 2003).

O estudo da variabilidade dos atributos do solo é frequentemente realizado pela estatística descritiva, por meio da média, desvio padrão, coeficiente de variação, entre outros (LIMA et al., 2019). Porém, essas análises não consideram a variação que os atributos edáficos apresentam no espaço, o que pode fornecer resultados errôneos (GOMES et al., 2017). Neste contexto, a geoestatística pode ser usada para interpretação e projeção da variabilidade natural que os atributos do solo possuem, contribuindo para um melhor entendimento da variabilidade dos mesmos e suas ações na produção e crescimento em altura e diâmetro das árvores (GUAN et al., 2017). Desta forma, verificar a distribuição espacial dos atributos do solo em floresta nativa com a presença da castanheira-da-amazônia pode auxiliar no entendimento das relações abióticas com a produção dessa espécie (ALHO et al., 2014).

Na Floresta Nacional (FLONA) Tapajós, utilizando a geoestatística para analisar a distribuição espacial dos atributos do solo em uma floresta natural com castanheira-da-amazônia, Guerreiro et al. (2017) encontraram que as variáveis silte, argila, macroporosidade, pH, fósforo, zinco e cobre apresentaram forte relação espacial com a ocorrência das castanhas. Os autores também observaram que os mapas de variabilidade das propriedades do solo podem auxiliar em ações futuras no manejo da espécie. Em Sistemas Agroflorestais (SAFs) com o cultivo de dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) na Amazônia Oriental, Silva et al. (2018) analisando a dependência espacial e a correlação entre os atributos químicos do solo com os SAFs, verificaram que as propriedades do solo foram espacialmente dependentes e correlacionadas com os SAFs e os dendezeiros.

Por meio da análise multivariada é possível demonstrar as correlações entre os atributos do solo e verificar quais colaboram para a caracterização e/ou modificação do solo (OLIVEIRA et al., 2015). Além disso, podem agrupar as variáveis com características semelhantes, possibilitando um maior entendimento das variações dos processos que ocorrem no solo (JOSÉ et al., 2013). Apesar dos resultados expressivos da estatística multivariada, poucos são os estudos que aplicam esta técnica (JOSÉ et al., 2013). Analisando os atributos do solo e relacionando-os com as variações na produção de frutos da castanheira-da-

amazônia, bem como o estado nutricional da espécie por meio da análise multivariada, Costa et al. (2017) verificaram que a espécie *B. excelsa* é exigente em cálcio e que os indivíduos mais produtivos removeram maiores quantidades de bases trocáveis do solo.

No estado do Acre, existem dois castanhais que têm apresentado diferenças na produção de frutos de *B. excelsa* (BERTWELL et al., 2018). O Castanhal Filipinas possui baixa produção ao longo dos anos, em relação ao Castanhal Cachoeira, fato que pode estar relacionado com as características edáficas das áreas, já que as áreas apresentam mesmas condições climáticas. O objetivo geral deste estudo foi avaliar a relação entre a variabilidade espacial das propriedades do solo em diferentes classes de solo, a ocorrência de plantas e a produção de frutos, e investigar associações entre a produção de frutos e o diâmetro das árvores com os atributos do solo em dois castanhais, na Amazônia Ocidental. Diante disso, espera-se que no presente estudo seja possível (1) relacionar a ocorrência de plantas e a produção de frutos em diferentes classes de solo e espacializar as propriedades do solo em relação à produção de frutos da castanheira-da-amazônia nesses dois castanhais e, (2) verificar quais os atributos do solo que estão associados com a produção de frutos da castanheira-da-amazônia. Portanto, este trabalho está dividido em dois capítulos:

O capítulo I, intitulado “Classes e propriedades do solo explicam a ocorrência e a produção de frutos da castanheira-da-amazônia”, teve como objetivos testar a relação entre a ocorrência de plantas e a produção de frutos da castanheira-da-amazônia em diferentes classes de solo e a espacialização das propriedades físicas e químicas do solo em dois castanhais nativos (Cachoeira e Filipinas) localizados no estado do Acre, Brasil.

No capítulo II, “Fatores edáficos associados com a produção de frutos e o diâmetro de *Bertholletia excelsa* Bonpl. em castanhais nativos” teve como objetivo investigar associações entre a produção de frutos e o diâmetro a 1,30 m do solo – DAP da espécie *Bertholletia excelsa* com os atributos físicos e químicos do solo em dois castanhais nativos localizados na Amazônia Ocidental, Cachoeira e Filipinas.

## 2 CAPÍTULO I

# **CLASSES E PROPRIEDADES DO SOLO EXPLICAM A OCORRÊNCIA E A PRODUÇÃO DE FRUTOS DA CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup>Capítulo foi publicado na forma de artigo na Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 45, 2021.  
<https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210001>

## 2.1 RESUMO

As propriedades e classes do solo podem influenciar a ocorrência e distribuição de plantas e a produção de frutos das castanheiras-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*). Este trabalho teve como objetivo avaliar a relação entre a ocorrência de plantas, produção de frutos da castanheira-da-amazônia e a variabilidade espacial das propriedades do solo em diferentes classes de solo em dois castanhais nativos no estado do Acre, Brasil. O estudo foi realizado em duas áreas de dois castanhais nativos, Cachoeira (CP01 e CP02 – áreas 1 e 2) e Filipinas (FP01 e FP02 – áreas 1 e 2). Os perfis de solo foram descritos morfologicamente. Em cada área, foram coletadas 60 amostras de terra. Foram determinados os atributos químicos (pH, carbono orgânico total – COT, fósforo disponível – P, nitrogênio total – N, soma de bases – SB e índice de saturação por alumínio) e físicos do solo (granulometria, densidade do solo, densidade das partículas e porosidade total). A produção média de frutos foi calculada a partir da contagem de frutos em uma amostra de castanheiras, 51 e 34 árvores no Cachoeira e no Filipinas, respectivamente. Posteriormente, as árvores foram divididas em três classes de produção: baixa ( $\leq 1,5$  lata; a unidade lata tem 18 L, podendo conter 59 e 77 frutos, respectivamente, para Cachoeira e Filipinas), média (1,6 a 3,9 latas) e alta ( $\geq 4,0$  latas). A unidade lata é a medida tradicional de volume da região e varia de acordo com o local. A análise de agrupamentos foi realizada para testar a similaridade entre os castanhais e os perfis de solo, e a geoestatística para avaliar a dependência espacial das propriedades do solo. A maior ocorrência de castanheiras com alta produção de frutos ( $\geq 4,0$  latas) foi encontrada nas classes de solo Latossolo Vermelho Distrófico argissólico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico. No entanto, o Argissolo também apresentou castanheiras com as menores produções ( $\leq 1,5$  lata). O pH, COT, SB, P, N, granulometria e porosidade apresentaram, no geral, maior variabilidade espacial, sendo a área 2 do Filipinas a área que apresentou o maior número de propriedades com alta variabilidade espacial, em relação às demais áreas. Embora a ocorrência de plantas e a produção de frutos da castanheira-da-amazônia (*B. excelsa*) tenham sido associadas às classes e às propriedades químicas e físicas do solo, a produção de frutos diferiu entre as áreas. Em geral, as propriedades físicas do solo foram fatores limitantes para a produção de frutos e/ou maior ocorrência de árvores. O castanhal Filipinas apresentou baixa produção de frutos e maior variabilidade espacial das propriedades do solo em relação ao Cachoeira.

**Palavras-chave:** *Bertholletia excelsa*, Amazônia Ocidental, geoestatística, variabilidade espacial.

## 2.2 ABSTRACT

Soil properties and classes can influence the occurrence and distribution of plants and fruit production of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa*). This study aimed to evaluate the relationship between plant occurrence, fruit production of Brazil nut and the spatial variability of soil properties in different soil classes in two native Brazil nut groves in the state of Acre, Brazil. The study was carried out in two areas of two native chestnut groves, Cachoeira (CP01 and CP02 – areas 1 and 2) and Filipinas (FP01 and FP02 – areas 1 and 2). Soil profiles were described morphologically. In each area, 60 soil samples were collected. Chemical (pH, total organic carbon - TOC, available phosphorus - P, total nitrogen - N, sum of bases - SB and aluminum saturation index) and physical attributes of the soil (granulometry, soil density, particle density, and total porosity) were determined. The average fruit production was calculated from the fruit count in a sample of Brazil nut trees, 51 and 34 trees in Cachoeira and Filipinas, respectively. Subsequently, the trees were divided into three classes of production: low ( $\leq 1.5$  can; the can unit has 18 L, which can contain 59 and 77 fruits, respectively, for Cachoeira and Filipinas), medium (1.6 to 3, 9 cans) and high ( $\geq 4.0$  cans). The can is the traditional measure of volume for the region and varies by location. Cluster analysis was performed to test the similarity between chestnut trees and soil profiles, and geostatistics to assess the spatial dependence of soil properties. The highest occurrence of Brazil nut trees with high fruit production ( $\geq 4.0$  cans) was found in the *Latossolo Vermelho Distrófico argissólico* (Oxisol) and *Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico* (Ultisol) soil classes. However, the Ultisol also had Brazil nut trees with the lowest yields ( $\leq 1.5$  can). The pH, TOC, SB, P, N, granulometry and porosity presented, in general, greater spatial variability, with area 2 of the Philippines being the area that presented the highest number of properties with high spatial variability, in relation to the other areas. Although the occurrence of plants and fruit production of Brazil nut (*B. excelsa*) were associated with soil classes and chemical and physical properties, fruit production differed between areas. In general, soil physical properties were limiting factors for fruit production and/or greater occurrence of trees. The Filipinas chestnut showed low fruit production and greater spatial variability of soil properties in relation to Cachoeira.

**Keywords:** *Bertholletia excelsa*, Western Amazon, geostatistics, spatial variability.

## 2.3 INTRODUÇÃO

A extração de produtos florestais não madeireiros (PFNM) é um meio fundamental de subsistência para populações tradicionais da Amazônia (SILVA et al., 2016). Além disso, esses produtos contribuem para a conservação da floresta, fornecem medicamentos e alimentos, e têm grande relevância para a economia e cultura local (HOMMA, 2014). Os PFNM são obtidos em florestas nativas ou florestas plantadas. Podem ser de origem vegetal ou animal, incluindo frutos, sementes, cascas, fibras, óleos essenciais, látex, mel, entre outros (ELIAS; SANTOS, 2016).

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), endêmica da Amazônia (MULLER, 1981), é um dos principais PFNM desse bioma. O extrativismo das sementes dessa espécie gera renda para populações tradicionais e agricultores familiares e estabelece a comercialização de sementes entre cidades próximas e no exterior (ORTIZ, 2002). É uma espécie protegida por lei (MMA et al., 2017), e está classificada como vulnerável na Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da International Union Conservation of Nature's – IUCN (AMERICAS REGIONAL WOKSHOP, 1998).

A castanheira-da-amazônia, amêndoa oriunda da semente da castanheira, é o produto que dá todo esse destaque à espécie. Em 2019, as Regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil responderam por 93,2 e 6,8 %, respectivamente, da produção nacional de castanheira-da-amazônia, com produção de 37,0 % no estado do Amazonas, 22,2 % no Acre, 21,2 % no Pará, 6,8 % em Mato Grosso, 5,9 % em Roraima, 5,7 % em Rondônia e 1,2 % no Amapá (IBGE, 2020).

A espécie *B. excelsa* apresenta bom desenvolvimento em solos profundos, com textura argilosa ou argilo-arenosa, em áreas de terra firme e alta, não tolerando áreas sujeitas a inundações ou com grande acúmulo de água (NEVES, 1938). Em florestas naturais, as sementes da castanheira-da-amazônia podem germinar no sub-bosque, mas as mudas precisam de clareiras para um maior desenvolvimento (MYERS et al., 2000). O fruto, comumente chamado de "ouriço", contém entre 7 e 29 sementes (PERES; BAIDER, 1997). As sementes possuem alto valor nutritivo, ricas em fósforo, cálcio, magnésio, potássio (COSTA et al., 2009) e selênio (VILHENA, 2004).

Estudos recentes, como os de Costa et al. (2017), Guerreiro et al. (2017) e Ivanov et al. (2018), buscaram compreender e relacionar os fatores edafoclimáticos com a produção de frutos em populações nativas de *B. excelsa*. Explicando a variação na produção de frutos da castanheira-da-amazônia, Kainer et al. (2007) destacaram que o solo e a disponibilidade de nutrientes influenciam na variação da produção de frutos. Os autores verificaram que a capacidade de troca catiônica do solo (CTC) correlacionou-se positivamente com o aumento da produção de frutos de *B. excelsa*. Staudhammer et al. (2021) comparando duas populações de *B. excelsa* na Amazônia Ocidental para compreender a variação na produção de frutos, constataram que árvores em locais com maiores níveis de P disponível e K<sup>+</sup> produziram três vezes mais frutos.

Um método que pode ser utilizado para estudar a variabilidade espacial das propriedades do solo é a geoestatística. Utilizando a geoestatística para analisar a distribuição espacial dos atributos do solo em um castanhal nativo na Floresta Nacional do Tapajós, Guerreiro et al. (2017) verificaram que as variáveis silte, argila, macroporosidade, pH, fósforo, zinco e cobre apresentaram relação espacial com *B. excelsa*. Os autores observaram alta densidade de castanheiras em áreas com altos valores de silte e argila e baixos valores de macroporosidade, pH, fósforo, zinco e cobre.

Duas ferramentas são frequentemente utilizadas na geoestatística: o semivariograma e a krigagem. O semivariograma é utilizado para retratar e modelar a distribuição espacial da

variável, relacionando distâncias e semivariâncias por meio de um gráfico (SEIDEL; OLIVEIRA, 2014). Enquanto a krigagem estima a variável em locais não amostrados, possibilitando verificar a continuidade espacial da propriedade por meio de mapas de variabilidade (SILVA et al., 2020).

Estudos mostram que a geoestatística pode ser utilizada para otimizar o manejo de espécies de interesse econômico. Pelissari et al. (2017) ao estimar a variabilidade espacial do volume dos sortimentos de madeira e identificar padrões espaciais em povoamentos de *Tectona grandis* no estado do Mato Grosso, constataram que a modelagem geoestatística auxiliou no manejo da espécie, como no desbaste e poda. Oliveira et al. (2009) ao analisar a variabilidade espacial dos teores de macronutrientes no solo e nas plantas e o potencial de produtividade em citros na Amazônia Oriental, encontraram alta variabilidade na produção e tamanho dos frutos. Os autores concluíram que a geoestatística contribuiu para o manejo das diferentes áreas, aumentando a produtividade da cultura e diminuindo os custos.

A produção de frutos de *B. excelsa* pode variar entre os castanhais nativos e ao longo dos anos, interferindo na economia das populações tradicionais da região amazônica que utilizam a castanheira-da-amazônia como meio de subsistência (STAUDHAMMER et al., 2021). Portanto, investigar a variabilidade espacial das propriedades e classes do solo que ocorrem nos castanhais nativos ajuda entender como essas variáveis estão distribuídas, permitindo associá-las com a ocorrência de plantas e à produção de frutos de *B. excelsa*. Os objetivos deste estudo foram avaliar a relação entre a ocorrência de plantas e a produção de frutos da castanheira-da-amazônia em diferentes classes de solo e a espacialização das propriedades físicas e químicas do solo em dois castanhais nativos (Cachoeira e Filipinas) localizados no estado do Acre, Brasil.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1 Áreas de estudo

O estudo foi realizado em dois castanhais nativos localizados no estado do Acre, Brasil, nos quais uma série de estudos foram realizados pela Rede Kamukaia (WADT et al., 2008). Um castanhal é denominado de Cachoeira, localizado no Projeto de Assentamento Agroextrativista (PAE) Chico Mendes, em Xapuri, entre as coordenadas geográficas Latitude 10° 41' 05,6" S e Longitude 68° 40' 10,7" O, e o outro Filipinas, situado na Colocação Rio de Janeiro, Resex Chico Mendes, município de Epitaciolândia, cujas coordenadas geográficas são Latitude 10° 47' 38,2" S e Longitude 68° 39' 57,7" O. São áreas onde as populações tradicionais extraem produtos florestais e praticam agricultura de subsistência e pecuária em pequena escala (BERTWELL et al., 2018).

A comunidade onde o Cachoeira está inserido apresenta níveis mais elevados de antropização em comparação ao Filipinas, devido ao melhor acesso rodoviário, projetos de desenvolvimento e manejo florestal sustentável desde 2001 (STONE, 2003; SERRANO, 2005). O clima da região é do tipo "Aw" de acordo com o sistema de classificação de Köppen, com temperatura média anual de 25 °C, diminuindo até 8 °C na estação seca de junho a agosto (ALVARES et al., 2013) e precipitação média anual de 1.830 mm. A vegetação predominante é classificada como floresta tropical úmida (HOLDRIDGE, 1978). As áreas têm composição e cobertura florestal semelhantes (90 e 92 %, respectivamente) (COOPEAGRO, 2001; SEMA, 2010), porém, há uma maior presença de lianas no Filipinas (NEVES et al., 2016; BERTWELL et al., 2018). A região possui altitude variando entre 160 e 350 m, com relevo que varia de suave ondulado a ondulado (ZEE, 2000). Os solos ocorrem sob a formação geológica Solimões, sendo influenciados por material vulcânico, depositado durante a sua gênese pelos ventos andinos. A classificação do solo utilizada no presente estudo foi adaptada dos estudos de Bardales et al. (2011) e Ferreira et al. (2017). Os solos foram descritos como Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho e Argissolo Vermelho, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS et al., 2018).

### 2.4.2 Propriedades químicas e físicas do solo

Para avaliar a variabilidade espacial das propriedades do solo, amostras foram coletadas em áreas com dimensões de 600 × 600 m (36 ha), sistematicamente na interseção do grid de 100 × 60 m. Em cada castanhal, as amostras foram coletadas em duas áreas, totalizando 72 ha de área amostrada por castanhal. As áreas foram denominadas de CP01 e CP02 - áreas 1 e 2 do Cachoeira, e FP01 e FP02 - áreas 1 e 2 do Filipinas. O total de 120 amostras foram coletadas em cada área, 60 amostras deformadas a uma profundidade de 0,00-0,20 m para a análise das propriedades químicas e granulometria e 60 amostras indeformadas na profundidade de 0,07-0,13 m para a análise de densidade do solo, densidade das partículas e estimativa da porosidade total. Em cada local de amostragem, as coordenadas geográficas foram registradas com GPS de navegação, em UTM, fuso 19S e Datum SIRGAS 2000.

Os perfis de solo, em um total de três e seis no Cachoeira e Filipinas, respectivamente, foram descritos morfologicamente de acordo com Santos et al. (2015) (BARDALES et al., 2011; FERREIRA et al., 2017). Nas amostras coletadas na profundidade de 0,00-0,20 m foram analisadas e calculadas as seguintes propriedades: pH (H<sub>2</sub>O), carbono orgânico total (COT), fósforo disponível (P), nitrogênio total (N), soma de bases - SB (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>), índice de saturação por alumínio (m %) e análise granulométrica para a determinação dos teores de areia, silte e argila. Nas amostras coletadas de 0,07-0,13 m foram analisadas a densidade do solo (Ds) e densidade das partículas (Dp), e utilizadas para estimativa da porosidade total.

O pH foi medido em uma mistura de 1:2,5 de solo e água.  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis foram extraídos com  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ . O  $\text{Al}^{3+}$  foi determinado por titulação com hidróxido de sódio  $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  por titulação com ácido etilenodiaminotetracético (EDTA)  $0,125 \text{ mol L}^{-1}$ . Fósforo,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  foram extraídos com Mehlich<sup>-1</sup>. Fósforo foi determinado por colorimetria e  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  por fotometria de chama. A soma de bases foi obtida pela soma dos teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$ . O m % foi obtido pela relação entre o  $\text{Al}^{3+}$  e a capacidade de troca catiônica efetiva do solo. O COT foi quantificado por oxidação utilizando dicromato de potássio em ácido sulfúrico. A determinação do N foi obtida por digestão sulfúrica seguida por destilação Kjeldahl. O método da pipeta foi utilizado para a caracterização granulométrica das amostras. As frações de argila, silte, areia grossa, areia fina e areia total foram separadas. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico com base na relação massa/volume e a densidade das partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. A porosidade total foi calculada com base na relação entre as propriedades densidade de partículas e densidade do solo. Essas análises seguiram os métodos descritos por Teixeira et al. (2017).

### 2.4.3 Produção de frutos

A produção média de frutos foi calculada por meio do monitoramento da contagem de frutos em castanheiras com diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) maior ou igual a 50 cm em ambos os castanhais. No Cachoeira, foram quantificados os frutos de 51 árvores reprodutivas (22 e 29 indivíduos nas áreas 1 e 2, respectivamente) e no Filipinas, foram quantificados os frutos de 34 árvores reprodutivas (18 e 16 indivíduos nas áreas 1 e 2, respectivamente). A produção foi avaliada nos anos de 2010 a 2020, nos meses de janeiro e fevereiro, após a queda dos frutos. Após a contagem dos frutos, as árvores foram divididas em três classes de produção de frutos, considerando a unidade de medida local: baixa ( $\leq 1,5$  lata), média (1,6 a 3,9 latas) e alta ( $\geq 4,0$  latas). A unidade de medida “lata” é a medida tradicional de volume da região (18 L) e a quantidade de frutos necessários para encher uma lata varia de acordo com a localidade. Para os castanhais Cachoeira e Filipinas, o número de frutos para encher uma lata de 18 L é de 59 e 77 frutos, respectivamente, (dados não publicados), e esses valores foram utilizados para classificar as castanheiras nas classes de produção.

### 2.4.4 Análises estatística e geoestatística

A produção de frutos mensurada em latas e as propriedades químicas e físicas do solo foram submetidas à análise descritiva para verificar a dispersão dos dados. Foram obtidos os valores de média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV %). Valores de  $\text{CV} < 12 \%$ ,  $12 < \text{CV} < 60 \%$  e  $\text{CV} > 60 \%$  foram considerados como baixa, média e alta variabilidade de dados, respectivamente (WARRICK; NIELSEN, 1980). Para verificar se havia diferença entre os castanhais e entre os perfis de solo, foi realizada a análise de agrupamento utilizando a distância euclidiana e o método *complete*. As variáveis utilizadas foram o número de indivíduos e as classes de produção (baixa, média e alta). Para verificar se havia diferença entre os castanhais, foram analisadas as áreas amostradas de cada castanhal, enquanto para as diferenças entre os perfis, a análise foi realizada para cada perfil de solo. A estatística descritiva e a análise de Cluster foram realizadas por meio do *software* R 4.0.2 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2020).

A geoestatística foi aplicada para verificar a existência e quantificar o grau de dependência espacial, e espacializar as propriedades do solo em cada área. Primeiramente, para analisar a estrutura de dependência espacial, foi obtido o semivariograma para cada variável. Com base nos modelos apresentados por Silva et al. (2018), três modelos teóricos foram ajustados e testados: esférico, exponencial e gaussiano. Após confirmar a estrutura de dependência espacial e ajustar o modelo para cada variável, utilizou-se a krigagem ordinária

para estimar as variáveis em locais não amostrados, possibilitando a construção dos mapas (VIEIRA, 2000; SILVA et al., 2020). O semivariograma e a krigagem ordinária foram realizados com o *software* ArcGIS 10.5.

Índices de validação cruzada, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e grau de dependência espacial (GDE %) foram utilizados para avaliar e comparar os modelos teóricos. Na validação cruzada, foram utilizados os seguintes índices: raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio padronizado (RMSSE) e erro padrão médio (ASE). Para isso, os valores de RMSE e ASE deveriam estar o mais próximo e o mais baixo possível, ME próximo a 0, RMSSE próximo a 1 (MELLO; OLIVEIRA, 2016) e  $R^2$  o mais próximo de 1. O GDE foi calculado pela razão  $[C_0/(C_0+C) \times 100]$ , com dependência espacial classificada da seguinte forma: forte ( $GDE \leq 25 \%$ ), moderada ( $25 < GDE \leq 75 \%$ ) e fraca ( $GDE > 75 \%$ ). Se o GDE for igual a 100 %, sugere um semivariograma com efeito pepita puro (EPP), ou seja, a variável é espacialmente independente ou podem ter ocorrido problemas de amostragem (CAMBARDELLA et al., 1994).

## 2.5 RESULTADOS

### 2.5.1 Produção de frutos

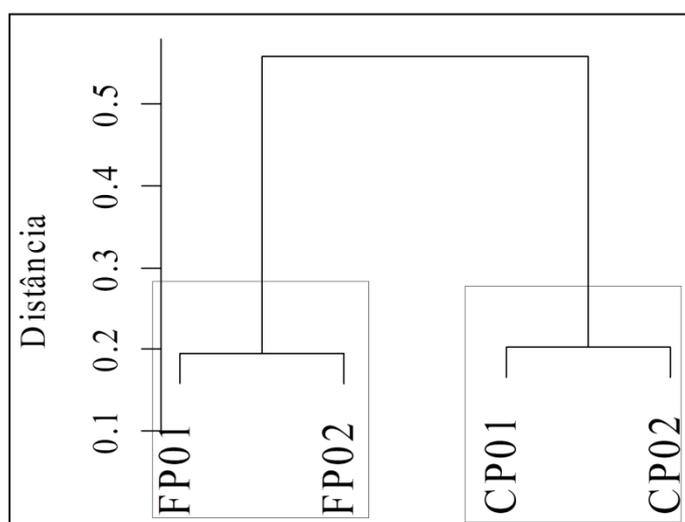
As áreas do Cachoeira apresentaram maiores médias para a produção de frutos, enquanto no Filipinas apresentaram médias mais baixas (Tabela 1). Nas áreas CP01 e CP02, houve maior número de árvores, com média (6 e 13 árvores, respectivamente) e alta (7 árvores em cada área) produção de frutos. Em contrapartida, Filipinas apresentou maior número de indivíduos com baixa produção de frutos (17 e 12 árvores nas áreas FP01 e FP02, respectivamente), menos indivíduos e nenhuma árvore com alta produção de frutos.

**Tabela 1.** Estatística descritiva da produção de frutos medida em latas nos Castanhais Cachoeira - Áreas CP01 e CP02 e Filipinas - Áreas FP01 e FP02.

Área	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s
----- lata -----					
CP01	2,66	2,20	0,00	6,30	2,10
CP02	2,76	2,60	0,10	6,70	2,00
FP01	0,73	0,35	0,00	3,50	0,80
FP02	0,97	0,65	0,00	3,90	1,10

s = desvio padrão; 1 lata = 18 L, que tem capacidade para 59 e 77 frutos para Cachoeira e Filipinas, respectivamente.

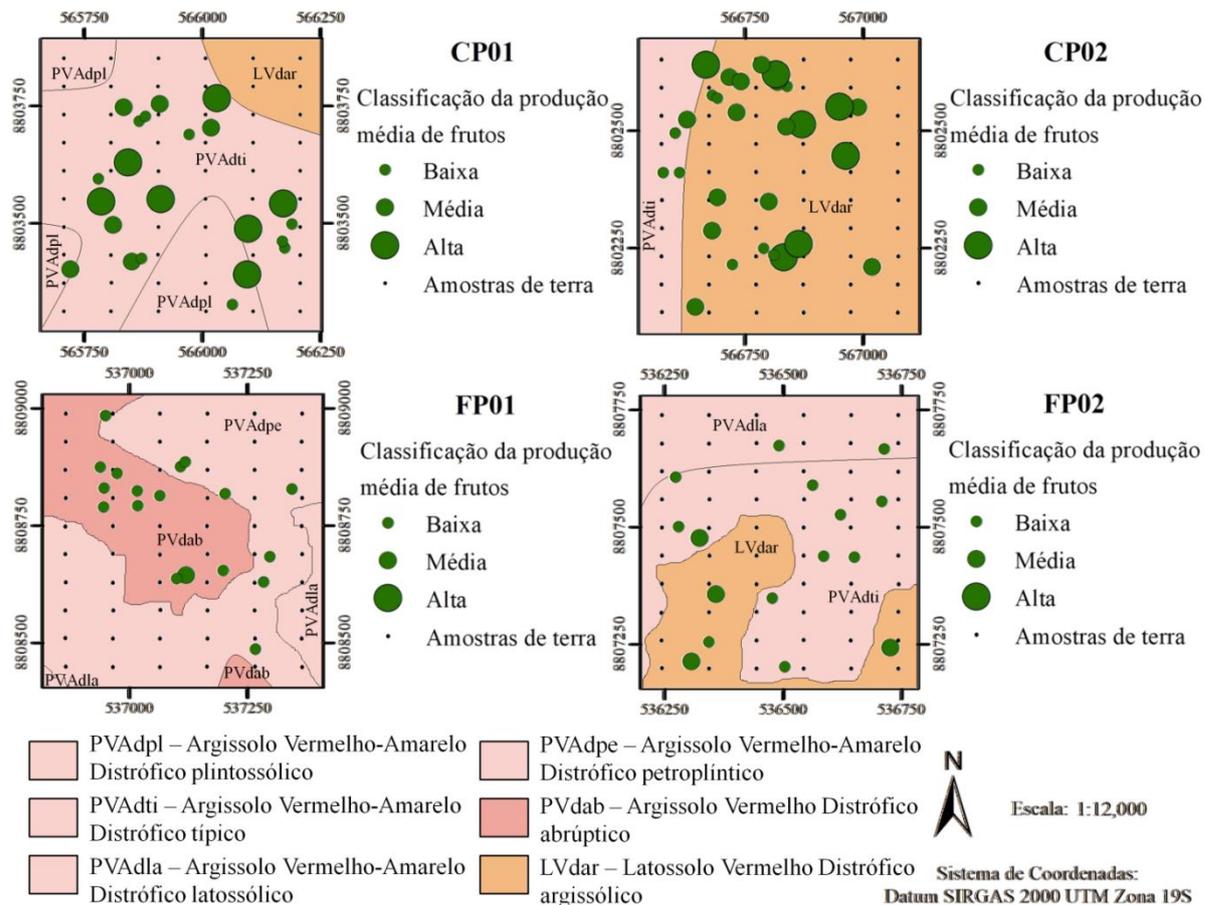
Foi observado alto desvio padrão (s) em ambos os castanhais, indicando heterogeneidade na produção. A diferença nas médias na produção de frutos entre os castanhais foi confirmada pela análise de agrupamento, em que as áreas de cada castanhal foram localizadas em diferentes agrupamentos (Figura 1).



**Figura 1.** Dendrograma com o agrupamento das áreas dos Castanhais Cachoeira e Filipinas relacionado à produção de frutos e número de indivíduos. CP01 e CP02 = Cachoeira; FP01 e FP02 = Filipinas.

### 2.5.2 Relação entre classes de solo e produção de frutos

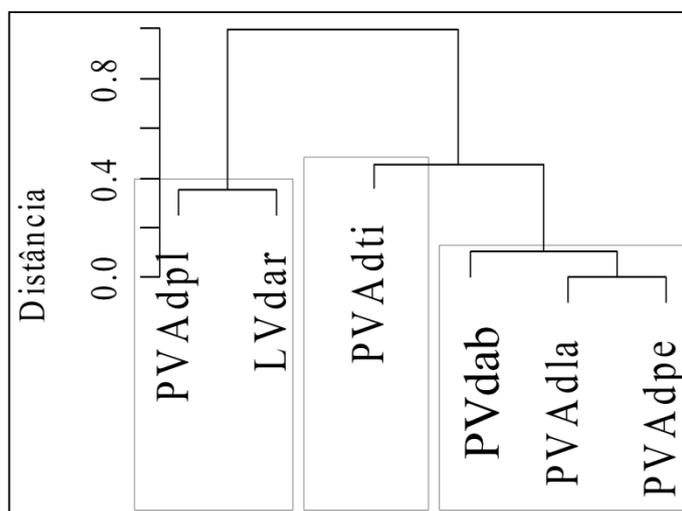
As classes de solo Latossolo Vermelho Distrófico argissólico (LVdar) e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAdti) apresentaram maior ocorrência de castanheiras com alta produção de frutos ( $\geq 4,0$  latas); enquanto nas áreas de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico (PVAdla), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico petroplúntico (PVAdpe) e Argissolo Vermelho Distrófico abruptico (PVdab), ambos presentes no Filipinas, ocorreu apenas castanheiras com baixa e média produção de frutos. Na área de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico (PVAdpl), ocorreram poucos indivíduos e apenas uma castanheira com alta produção de frutos (Figura 2).



**Figura 2.** Mapa com os perfis de solo e a produção média de frutos da castanheira-da-amazônia no Cachoeira – Áreas 1 e 2 (CP01 e CP02) e Filipinas – Áreas 1 e 2 (FP01 e FP02). Os círculos nos mapas correspondem às classes de produção de frutos entre os anos 2010 e 2020, enquanto os pontos representam os locais onde as amostras de terra foram coletadas. Fonte: Adaptado de Bardales et al. (2011) e Ferreira et al. (2017).

Na área de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico foi observado maior número de castanheiras com baixa (20 indivíduos) e alta (7 indivíduos) produção de frutos. Na área do Latossolo Vermelho Distrófico argissólico houve maior número de castanheiras com média produção de frutos (15 indivíduos) em relação às demais áreas. As áreas de Argissolo Vermelho Distrófico latossólico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico petroplúntico e Argissolo Vermelho Distrófico abruptico foram as únicas classes que não apresentaram castanheiras com alta produção de frutos, e essas classes estavam presentes apenas no Castanhal Filipinas. Logo, os perfis correspondentes a essas áreas foram incluídos no mesmo agrupamento (Figura 3). As áreas de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico e Latossolo Vermelho Distrófico argissólico foram classificadas no mesmo

grupo e a área de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico foi classificada isoladamente (Figura 3).



**Figura 3.** Dendrograma com agrupamento das classes de solo (perfis), em relação à produção de frutos e número de indivíduos. PVAdpl = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico; LVdar = Latossolo Vermelho Distrófico argissólico; PVAdti = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico; PVdab = Argissolo Vermelho Distrófico abrupto; PVAdla = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico; PVAdpe = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico petroplíntico.

### 2.5.3 Propriedades químicas e físicas do solo

Para as propriedades físicas e químicas do solo houve valores próximos da média e mediana. Em geral, foi observada baixa variabilidade dos dados ( $CV < 12\%$ ) e moderada ( $12\% < CV < 60\%$ ), e apenas SB apresentou alta variabilidade ( $CV > 60\%$ ) nas áreas CP01 e FP02 (Tabela 2). Os valores de pH, Ds, Dp e porosidade apresentaram baixa variabilidade em todas as áreas, enquanto para a granulometria e propriedades químicas do solo foi detectada moderada variabilidade (Tabela 2).

**Tabela 2.** Estatística descritiva das propriedades físicas e químicas do solo em quatro áreas de 36 ha cada, em dois castanhais nativos no estado do Acre.

Variáveis	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s	CV (%)
CP01						
pH (H <sub>2</sub> O)	4,49	4,48	4,02	5,69	0,29	6,40
COT (g kg <sup>-1</sup> )	6,26	5,86	2,35	13,89	2,63	42,01
P (mg dm <sup>-3</sup> )	5,24	5,13	2,80	8,57	1,13	21,65
N (g kg <sup>-1</sup> )	0,84	0,81	0,55	1,66	0,20	24,01
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,58	0,53	0,25	3,07	0,38	66,01
m (%)	74,53	78,61	0,00	91,45	15,96	21,41
Areia total (g kg <sup>-1</sup> )	468,00	461,50	247,00	759,00	111,90	23,91
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	403,70	406,00	188,00	577,00	103,46	25,63
Argila total (g kg <sup>-1</sup> )	128,40	123,00	46,00	228,00	32,57	25,37
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	1,38	1,39	1,22	1,67	0,09	6,34
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	2,52	2,52	2,42	2,68	0,05	2,04

Porosidade (%)	45,12	44,85	32,49	53,61	3,92	8,69
CP02						
pH (H <sub>2</sub> O)	4,32	4,33	3,98	4,79	0,20	4,61
COT (g kg <sup>-1</sup> )	8,36	8,32	3,07	17,18	2,95	35,35
P (mg dm <sup>-3</sup> )	5,08	4,97	2,74	7,62	1,13	22,18
N (g kg <sup>-1</sup> )	1,07	1,00	0,65	1,61	0,22	20,92
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,71	0,60	0,24	1,79	2,95	52,76
m (%)	75,13	79,90	29,70	93,70	13,93	18,54
Areia total (g kg <sup>-1</sup> )	459,90	458,00	242,00	724,00	100,30	21,81
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	320,60	352,50	5,00	545,00	134,53	41,96
Argila total (g kg <sup>-1</sup> )	219,60	218,00	84,00	356,00	76,48	34,83
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	1,30	1,30	1,08	1,67	0,12	9,10
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	2,65	2,67	2,47	2,78	0,08	3,02
Porosidade (%)	50,59	51,00	38,48	59,86	4,65	9,20
FP01						
pH (H <sub>2</sub> O)	4,06	3,99	3,73	5,00	0,24	6,04
COT (g kg <sup>-1</sup> )	8,58	8,77	1,50	19,73	3,59	41,87
P (mg dm <sup>-3</sup> )	3,94	3,70	2,81	7,33	0,79	20,04
N (g kg <sup>-1</sup> )	0,86	0,86	0,58	1,40	0,15	17,48
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,33	0,28	0,16	1,34	0,16	50,50
m (%)	87,15	89,38	49,73	94,23	7,56	8,67
Areia total (g kg <sup>-1</sup> )	542,60	544,00	205,00	675,00	89,74	16,54
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	320,90	317,50	214,00	568,00	69,60	21,69
Argila total (g kg <sup>-1</sup> )	136,70	130,00	87,00	238,00	32,10	23,49
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	1,28	1,27	0,99	1,53	0,10	7,86
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	2,62	2,62	2,52	2,75	0,04	1,65
Porosidade (%)	51,29	51,27	41,80	61,89	3,75	7,31
FP02						
pH (H <sub>2</sub> O)	4,28	4,21	3,86	6,49	0,39	9,10
COT (g kg <sup>-1</sup> )	6,97	6,77	3,55	12,41	2,10	30,11
P (mg dm <sup>-3</sup> )	3,72	3,25	2,19	7,13	1,19	31,95
N (g kg <sup>-1</sup> )	0,70	0,69	0,36	1,04	0,16	23,07
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,42	0,32	0,10	2,11	0,32	76,88
m (%)	77,73	85,42	0,00	93,73	18,44	23,72
Areia total (g kg <sup>-1</sup> )	649,10	657,50	438,00	785,00	71,53	11,02
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	221,20	208,00	140,00	430,00	55,87	25,26
Argila total (g kg <sup>-1</sup> )	129,80	126,00	48,00	217,00	39,32	30,29
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	1,35	1,35	1,23	1,65	0,07	5,39
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	2,67	2,66	2,57	2,86	0,06	2,32
Porosidade (%)	49,44	49,53	42,25	54,80	2,52	5,10

CP01 = Castanhal Cachoeira - Área 01; CP02 = Castanhal Cachoeira - Área 02; FP01 = Castanhal Filipinas - Área 01; FP02 = Castanhal Filipinas - Área 02; s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; COT = carbono orgânico total; P = fósforo disponível; N = nitrogênio total; SB = soma de bases; m = índice de saturação por alumínio; Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas.

Em geral, para as propriedades físicas e químicas do solo, verificou-se moderada dependência espacial e os modelos com melhor ajuste foram o esférico e o exponencial, seguido do gaussiano (Tabela 3). Não foi possível ajustar um modelo para a SB na área FP01; portanto, também não foi possível construir o mapa com sua distribuição espacial devido ao efeito pepita puro (EPP) observado. O alcance variou de 120,48 m (COT, SB e porosidade) a 736,20 m (N e argila total) na CP01; 120,48 m (P) a 736,18 m (COT, SB, silte e Dp) na CP02; 137,87 m (argila total) a 737,20 m (P, SB, areia total, silte e Dp) na FP01; e 114,87 m (pH, COT e N) a 737,22 m (Ds, Dp e porosidade) na FP02.

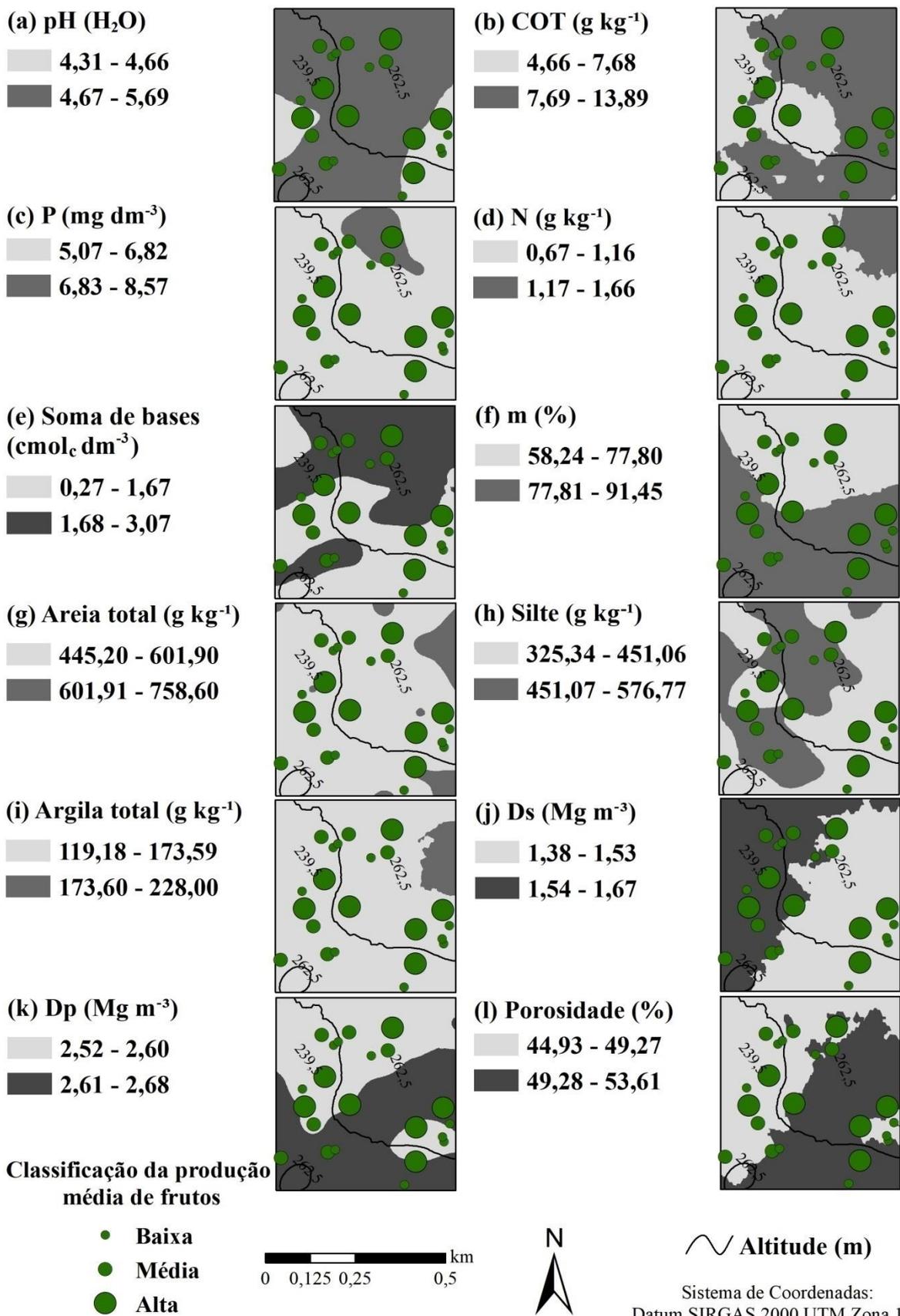
**Tabela 3.** Modelos teóricos ajustados e validação cruzada para as propriedades físicas e químicas do solo em quatro áreas de 36 ha cada, em dois castanhais nativos no estado do Acre.

Variável	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	a	GDE (%)	R <sup>2</sup>	RMSE	ME	RMSSE	ASE
CP01										
pH (H <sub>2</sub> O)	Esf	0,04	0,07	210,05	60,41	0,19	0,26	0,00	1,03	0,25
COT (g kg <sup>-1</sup> )	Exp	3,79	5,81	120,48	65,24	2,57	0,12	1,02	2,51	0,08
P (mg dm <sup>-3</sup> )	Exp	0,64	1,51	512,00	42,03	0,21	1,00	0,00	0,99	1,03
N (g kg <sup>-1</sup> )	Gaus	0,04	0,05	736,20	72,69	0,04	0,20	0,00	1,02	0,20
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Esf	0,01	0,10	120,48	8,89	0,14	0,37	0,00	1,16	0,30
m (%)	Gaus	126,35	425,37	720,75	29,70	0,35	12,78	0,00	1,05	12,06
Areia total (g kg <sup>-1</sup> )	Esf	0,00	10879,97	129,49	0,00	0,24	98,07	-4,54	1,02	92,69
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Gaus	9,09	9097,28	128,03	0,10	0,43	79,21	2,23	1,13	66,40
Argila total (g kg <sup>-1</sup> )	Esf	705,56	1342,83	736,20	54,82	0,18	29,28	0,96	0,99	29,61
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	Exp	0,01	0,01	238,88	91,37	0,01	0,09	0,00	0,97	0,09
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	Exp	0,00	0,00	249,15	23,17	0,23	0,04	0,00	0,98	0,05
Porosidade (%)	Exp	11,18	14,57	120,48	76,72	0,01	4,05	0,02	1,01	4,00
CP02										
pH (H <sub>2</sub> O)	Esf	0,02	0,04	133,05	55,63	0,06	0,20	0,00	1,00	0,20
COT (g kg <sup>-1</sup> )	Gaus	6,62	11,69	736,18	56,63	0,06	2,88	0,04	1,06	2,70
P (mg dm <sup>-3</sup> )	Esf	1,15	1,25	120,48	92,31	0,00	1,19	0,04	1,01	1,18
N (g kg <sup>-1</sup> )	Exp	0,04	0,05	453,64	79,74	0,01	0,23	0,00	1,02	0,22
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Gaus	0,10	0,20	736,18	48,75	0,08	0,36	0,00	1,10	0,33
m (%)	Exp	108,11	143,63	135,18	75,27	0,18	12,63	0,03	1,01	12,50
Areia total (g kg <sup>-1</sup> )	Esf	2930,14	8917,74	146,97	32,86	0,25	86,38	-0,56	0,97	89,26
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Exp	0,00	26172,15	736,18	0,00	0,73	69,13	0,59	0,89	79,51
Argila total (g kg <sup>-1</sup> )	Esf	0,00	3626,24	170,12	0,00	0,62	46,92	1,26	1,04	45,61
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	Gaus	0,01	0,02	377,34	66,08	0,19	0,11	0,00	0,97	0,11
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	Gaus	0,00	0,01	736,18	25,80	0,52	0,06	0,00	0,96	0,06
Porosidade (%)	Exp	11,99	24,61	514,83	48,71	0,16	4,26	0,00	1,00	4,28
FP01										
pH (H <sub>2</sub> O)	Esf	0,04	0,06	299,00	58,47	0,14	0,23	0,00	0,99	0,23
COT (g kg <sup>-1</sup> )	Gaus	6,44	14,97	390,80	42,99	0,41	2,74	0,01	0,98	2,82
P (mg dm <sup>-3</sup> )	Exp	0,23	0,81	737,20	28,42	0,16	0,73	0,00	1,13	0,65

N (g kg <sup>-1</sup> )	Exp	0,01	0,03	571,38	59,24	0,09	0,14	0,00	1,00	0,14
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	EPP	0,03	0,03	737,20	100,00	-	-	-	-	-
m (%)	Esf	41,95	67,63	266,90	62,03	0,03	7,52	0,11	0,98	7,66
Areia total (g kg <sup>-1</sup> )	Exp	4665,16	9687,44	737,20	48,16	0,05	88,42	-0,82	1,08	81,56
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Gaus	3845,70	6237,43	737,20	61,66	0,05	67,99	0,43	1,04	64,96
Argila total (g kg <sup>-1</sup> )	Esf	451,01	1067,20	137,87	42,26	0,04	32,18	1,03	1,00	32,13
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	Esf	0,01	0,01	275,80	60,97	0,10	0,10	0,00	1,01	0,09
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	Gaus	0,00	0,00	737,20	87,39	0,04	0,04	0,00	1,04	0,04
Porosidade (%)	Gaus	10,17	14,48	232,01	70,23	0,08	3,59	0,11	1,01	3,57
FP02										
pH (H <sub>2</sub> O)	Exp	0,03	0,13	114,87	23,45	0,00	0,42	-0,01	1,12	0,37
COT (g kg <sup>-1</sup> )	Exp	3,60	4,23	114,87	85,09	0,02	2,13	-0,06	0,97	2,19
P (mg dm <sup>-3</sup> )	Esf	0,56	1,76	140,63	31,93	0,01	1,23	0,00	0,98	1,27
N (g kg <sup>-1</sup> )	Esf	0,00	0,03	114,87	0,00	0,13	0,15	0,00	1,01	0,15
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Exp	0,00	0,11	152,17	0,00	0,02	0,34	0,00	1,09	0,30
m (%)	Esf	208,84	351,66	277,07	59,39	0,08	17,68	-0,18	1,02	17,22
Areia total (g kg <sup>-1</sup> )	Esf	0,00	5620,90	173,69	0,00	0,45	53,00	-0,20	0,97	56,16
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Gaus	3,39	3389,64	134,83	0,10	0,55	37,93	0,37	1,09	37,45
Argila total (g kg <sup>-1</sup> )	Gaus	408,68	1777,23	210,36	23,00	0,51	27,37	0,37	0,99	27,83
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	Gaus	0,00	0,01	737,22	46,02	0,02	0,07	0,00	1,15	0,06
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	Exp	0,00	0,00	737,22	55,36	0,00	0,06	0,00	1,10	0,06
Porosidade (%)	Gaus	5,38	7,69	737,22	69,93	0,00	2,60	0,04	1,07	2,42

CP01 = Castanhal Cachoeira - Área 01; CP02 = Castanhal Cachoeira - Área 02; FP01 = Castanhal Filipinas - Área 01; FP02 = Castanhal Filipinas - Área 02; Esf = esférico; Exp = exponencial; Gaus = Gaussiano; C<sub>0</sub> = efeito pepita; C<sub>0</sub>+C = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; RMSE = raiz quadrada do erro médio; ME = erro médio; RMSSE = raiz quadrada do erro médio padronizado; ASE = erro padrão médio; COT = carbono orgânico total; P = fósforo disponível; N = nitrogênio total; SB = soma de bases; m = índice de saturação por alumínio; Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas.

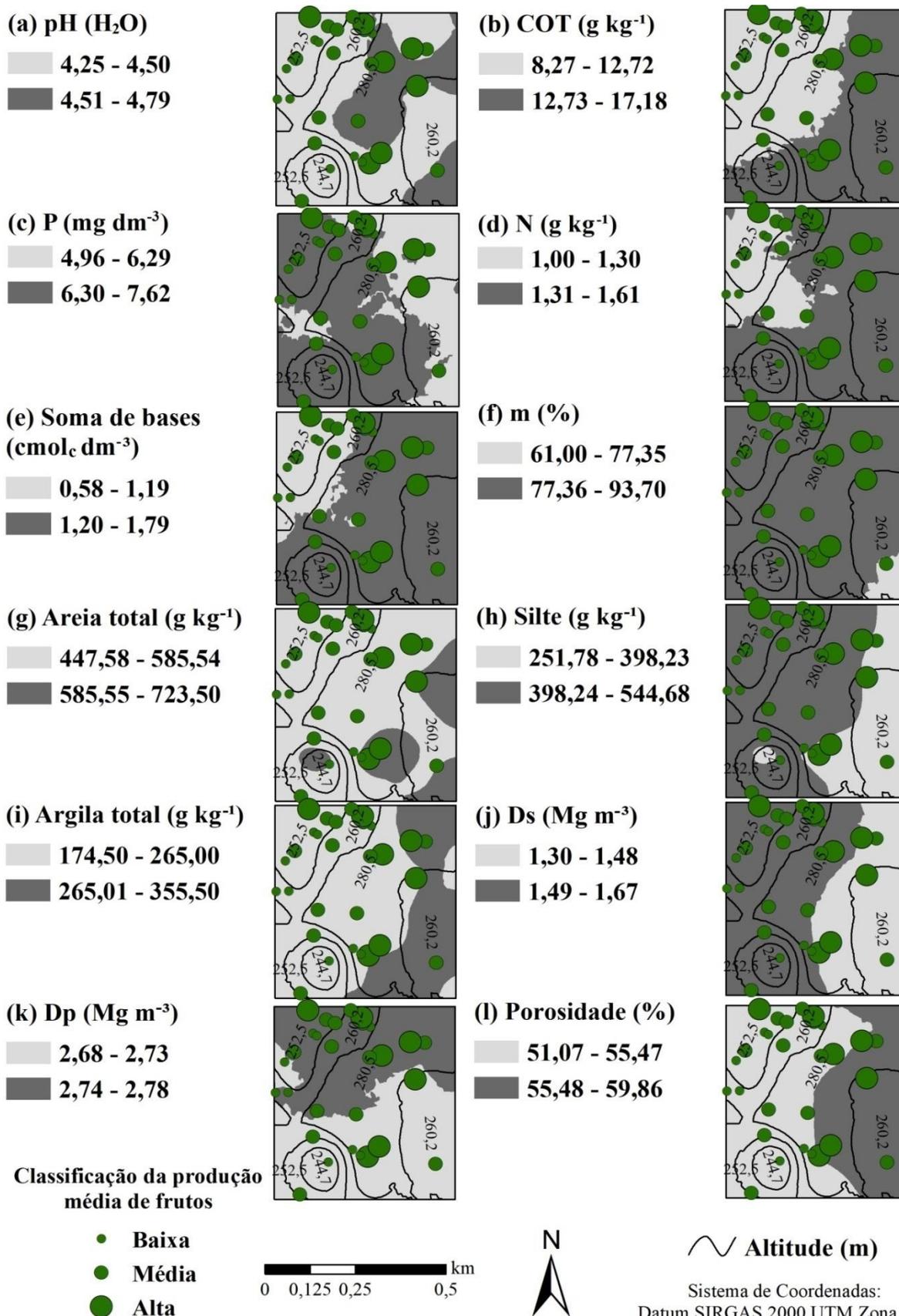
No que concerne à distribuição espacial das propriedades do solo nas áreas do Castanhal Cachoeira, a ocorrência de castanheiras foi maior nas áreas com pH mais baixo (Figuras 4a e 5a). Na CP01 as castanheiras ocorreram nas diferentes concentrações de COT (Figura 4b) e na área CP02, em geral, os indivíduos com maior produção de frutos foram observados nas regiões com maiores teores de COT (Figura 5b). Não houve padrão de distribuição dos teores de P e N na CP01 (Figuras 4c e 4d); porém, na área CP02 verificou-se maior número de árvores onde os teores de P e N foram mais elevados, além de alta produção de frutos nas áreas com maiores teores de N (Figuras 5c e 5d). Nas regiões com menores concentrações de soma de bases, houve predominância de castanheiras com alta produção na área CP01 e baixa produção na CP02 (Figuras 4e e 5e, respectivamente).



**Figura 4.** Distribuição espacial das propriedades físicas e químicas do solo no Castanhal Cachoeira - Área 1, no estado do Acre. As linhas e valores nos mapas correspondem à altitude

da área, os círculos correspondem à produção média de frutos entre os anos 2010 e 2020 e os valores apresentados nas legendas são os atributos do solo.

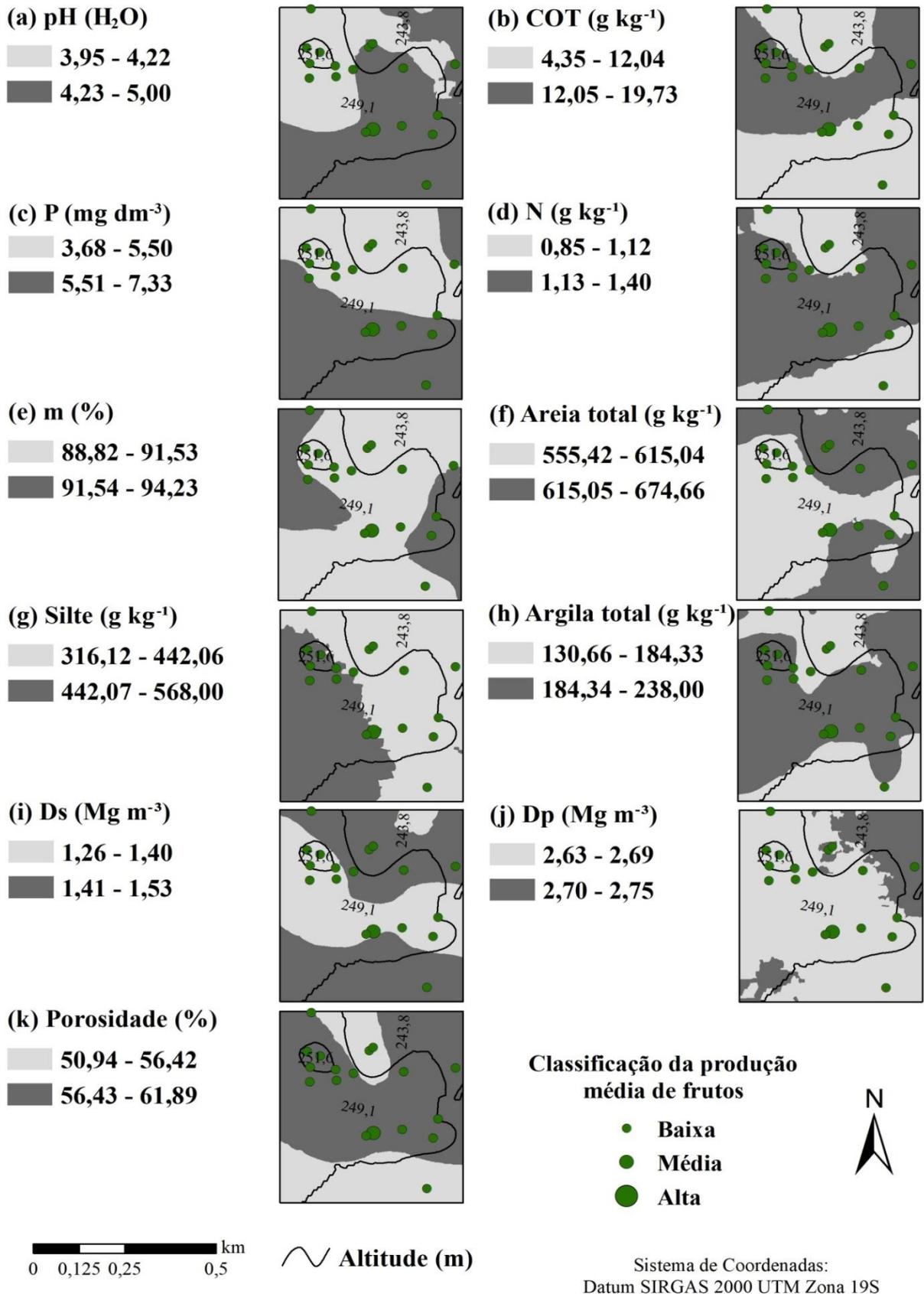
No Cachoeira, castanheiras com alta produção de frutos ocorreram em áreas com maiores valores de saturação por alumínio (m %) nas duas áreas do Castanhal Cachoeira (Figuras 4f e 5f). Em geral, nas regiões com teores elevados de areia, silte ou argila foram observados poucos indivíduos nas áreas CP01 e CP02 (Figuras 4g, 4h, 4i, 5g, 5h e 5i). Árvores com baixa e média produção de frutos foram verificadas em áreas com altos valores de densidade do solo e densidade de partículas (Figuras 4j, 4k, 5j e 5k). No Castanhal Cachoeira as castanheiras-da-amazônia foram distribuídas em solos com todos os níveis de porosidade (Figuras 4l e 5l).



**Figura 5.** Distribuição espacial das propriedades físicas e químicas do solo no Castanhal Cachoeira - Área 2, no estado do Acre. As linhas e valores nos mapas correspondem à altitude

da área, os círculos correspondem à produção média de frutos entre os anos 2010 e 2020 e os valores apresentados nas legendas são os atributos do solo.

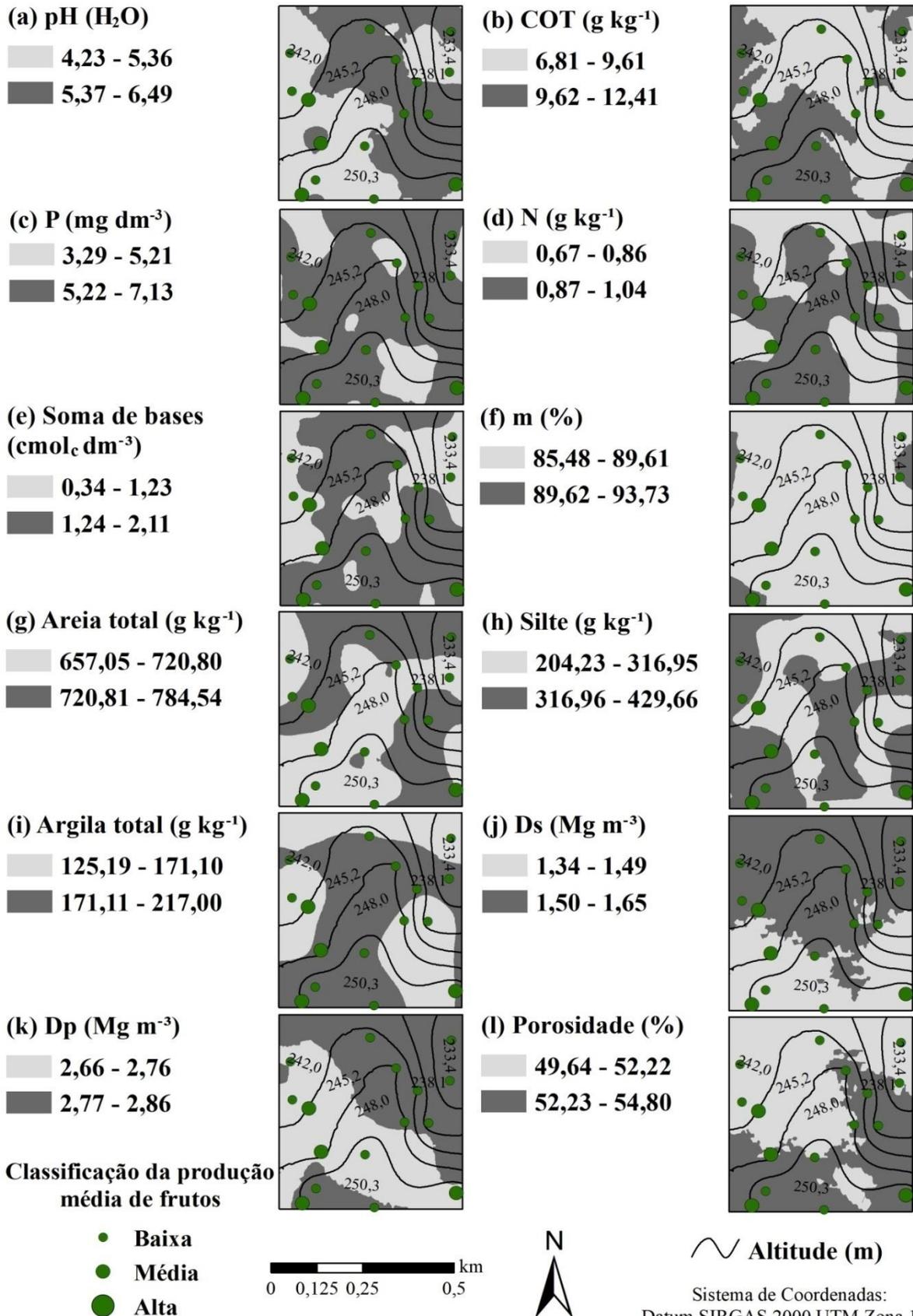
Com base nos mapas das Figuras 4 e 5, verificou-se que o relevo da área CP01 é, de forma geral, plano, com pouca variação topográfica, em que não houve padrão na distribuição das castanheiras. No entanto, na CP02, houve maior variação na altitude, com áreas de maior elevação, nas quais foram verificadas árvores com maior produção de frutos. A altitude no Castanhal Filipinas apresentou o mesmo padrão observado no Castanhal Cachoeira, em que FP01 apresentou pequena variação da altitude, com áreas mais baixas em relação à área FP02, com a maioria dos indivíduos localizados nas porções mais altas (Figura 6). Na área FP02, houve maior variação da altitude, com indivíduos em todas as cotas; no entanto, as árvores mais produtivas ocorreram nas regiões mais altas (Figura 7).



**Figura 6.** Distribuição espacial das propriedades físicas e químicas do solo no Castanhal Filipinas - Área 1, no estado do Acre. As linhas e valores nos mapas correspondem à altitude

da área, os círculos correspondem à produção média de frutos entre os anos 2010 e 2020 e os valores apresentados nas legendas são os atributos do solo.

Na área FP01 a ocorrência de castanheiras foi maior nas áreas em que o pH foi mais baixo (Figura 6a); enquanto na FP02, as árvores foram observadas nas áreas com maior amplitude de variação do pH (Figura 7a). Em geral, foram observados indivíduos com baixa e média produção de frutos onde os teores de COT variaram de baixo a alto, respectivamente (Figuras 6b e 7b). Para a SB foi verificada uma distribuição similar à observada para o COT na área FP02 (Figura 7e). Não foi possível espacializar a SB na área FP01, devido a sua distribuição aleatória no solo. Na área FP01 os indivíduos ocorreram em diferentes níveis de P e N (Figuras 6c e 6d); enquanto na área FP02, as castanheiras-da-amazônia com baixa e média produção de frutos foram observadas, em geral, nas áreas onde os teores de P e N foram maiores (Figuras 7c e 7d).



**Figura 7.** Distribuição espacial das propriedades físicas e químicas do solo no Castanhal Filipinas - Área 2, no estado do Acre. As linhas e valores nos mapas correspondem à altitude

da área, os círculos correspondem à produção média de frutos entre os anos 2010 e 2020 e os valores apresentados nas legendas são os atributos do solo.

De modo geral, a maioria das castanheiras ocorreu nas regiões em que os teores de saturação por alumínio foram mais baixos nas duas áreas do Castanhal Filipinas (Figuras 6e e 7f). Para os teores de areia, silte e argila não foi observado padrão de distribuição nas áreas FP01 e FP02 (Figuras 6f, 6g, 6h, 7g, 7h e 7i). A partir das informações da  $D_s$  e  $D_p$ , verificou-se que os indivíduos ocorreram nas áreas em que os valores dessas variáveis foram menores na área FP01 (Figuras 6i e 6j). Na área FP02 foram observadas castanheiras com maior produção onde os valores dessas variáveis foram menores (Figuras 7j e 7k). Constatou-se que os indivíduos ocorreram nas áreas com maior porosidade em ambas as áreas do Castanhal Filipinas (Figuras 6k e 7l).

## 2.6 DISCUSSÃO

Os Latossolos Vermelhos Distróficos argissólicos do Sudoeste Amazônico são profundos, bem estruturados, com baixa fertilidade natural, textura média e presença abundante de silte (FERREIRA et al., 2017). As castanheiras podem produzir mais sementes em solos profundos com textura franca argilosa e argilo-arenosa, quando comparadas a solos rasos (IVANOV et al., 2018). Portanto, isso pode explicar a ocorrência de castanheiras com alta produção de frutos nessa classe de solo.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos típicos são solos predispostos a processos erosivos e com drenagem imperfeita, o que pode levar à redução da sua profundidade efetiva (FERREIRA et al., 2017). Essas características podem explicar o maior número de castanheiras com baixa produção de frutos nessa classe de solo. O Latossolo Vermelho e o Argissolo Vermelho-Amarelo foram os solos que ocorreram em maior extensão nos castanhais estudados. A ocorrência de castanheiras em Argissolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Vermelho-Amarelos é comum (SPERA et al., 2019); no entanto, foi observado neste estudo que as castanheiras também ocorrem em Latossolos Vermelhos, apresentando alta produção de frutos. Na Amazônia, em geral, Latossolos Vermelho-Amarelos, Latossolos Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelos ocorrem comumente em áreas de planalto (LEPSCH, 2010), o que pode explicar a ocorrência dos castanhais nessas áreas.

A ausência ou a escassez de castanheiras com alta produção de frutos nas áreas de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico petroplíntico e em Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico se deve, provavelmente, à baixa fertilidade natural e à presença de plintita e petroplintita. A presença de plintita no solo leva a uma drenagem imperfeita e impede a penetração das raízes, ocasionando baixa absorção de água e nutrientes. Na área de Argissolo Vermelho Distrófico abrupto foram encontradas castanheiras com baixa e média produção de frutos. Esse resultado, provavelmente, se deve à presença de mudança textural abrupta, que pode limitar o fluxo interno de água e favorecer a formação de um lençol freático suspenso, causando deficiência de oxigênio no período de maior pluviosidade. Analisando a distribuição das classes de solo visando a estratificação dos ambientes, manejo e correlação com a produtividade de *B. excelsa* no Castanhal Filipinas, Bardales et al. (2011) verificaram que os Argissolos Vermelho-Amarelos que ocorrem nesse castanhal são mais suscetíveis a instabilidade, com predisposição a erosão. A declividade da área (6 a 14 %) e a profundidade do solo (variando de raso a profundo) podem ter favorecido o aparecimento de concreções e processos de erosão moderada a forte nessa classe de solo (BARDALES et al., 2011). Os autores observaram que, embora as castanheiras tenham baixa produção nesse tipo de pedoambiente, há grande número de árvores.

Por meio da análise de Cluster, verificou-se que há diferença no número de castanheiras e produção de frutos entre os Castanhais Cachoeira e Filipinas. Esse resultado refletiu nos agrupamentos dos perfis de solos, nos quais o Argissolo Vermelho Distrófico latossólico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico petroplíntico e Argissolo Vermelho Distrófico abrupto foram agrupados por não apresentarem castanheira com alta produção de frutos e também por ocorrerem apenas no Castanhal Filipinas (Figura 3). As classes de solos Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico e Latossolo Vermelho Distrófico argissólico foram agrupados, provavelmente, por possuírem castanheiras com alta produção de frutos. Porém, no Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico havia apenas três castanheiras, uma em cada classe de produção. A área de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico possivelmente foi isolada por apresentar castanheiras com alta e baixa produção de frutos. Além disso, essa classe de solo ocorreu em ambos os castanhais; porém,

no Castanhal Cachoeira, apresentou maior número de árvores com alta produção e o Castanhal Filipinas com baixa produção de frutos.

De forma geral, o coeficiente de variação (CV %) observado neste estudo foi baixo a moderado, evidenciado especialmente pelo uso da geoestatística, que indicou moderada a alta dependência espacial para a maioria das variáveis. É comum as propriedades do solo apresentarem moderada a alta variabilidade dos dados, visto que os fatores ambientais podem interferir nessas variáveis (CARVALHO et al., 2003). No que se refere à dependência espacial das propriedades físicas e químicas do solo, para a SB, foi observada distribuição aleatória na área FP01, em função do espaçamento adotado na amostragem de terra, maior que o necessário para detectar a dependência espacial. Neste estudo, aproximadamente 60 % das variáveis apresentaram moderada dependência espacial. Segundo Cambardella et al. (1994), a moderada dependência espacial ocorre quando há homogeneização do solo. Isso pode ter ocorrido devido ao uso e manejo adotados nessas áreas (CAVALCANTE et al., 2007).

Ao avaliar os semivariogramas das propriedades do solo, foi observado que algumas variáveis (isto é, pH, COT e N) da área FP02 apresentaram valores de alcance inferiores (114,87 m) em relação às áreas CP01, CP02 e FP01, indicando maior variabilidade e menor continuidade espacial e, conseqüentemente, menor produção de frutos quando comparado ao Cachoeira. Essa variabilidade pode ser devido à forte tendência à erosão e à predisposição a instabilidade, além da variação da declividade dessa área (BARDALES et al., 2011). De acordo com Wanderley et al. (2012), o alcance (a) é a distância em que as amostras são espacialmente correlacionadas, ou seja, representa a distância máxima de dependência da propriedade avaliada e, após essa distância, as amostras são espacialmente independentes, não apresentando dependência espacial. Esse padrão indica que quanto menor o alcance, maior a variabilidade, pois amostras localizadas em uma área de raio igual ao alcance são mais homogêneas (MARQUES JÚNIOR et al., 2008).

Quanto à distribuição espacial das propriedades do solo nos castanhais, a predominância de castanheiras em áreas com valores de pH mais baixos, como na CP02, também foi observada por Locatelli et al. (2002). Os autores verificaram bom desenvolvimento em diâmetro e altura nas castanheiras em áreas com baixo pH, CTC e altos níveis de saturação por alumínio. Isso indica que o desenvolvimento vegetativo da espécie não ocorre necessariamente em solos mais ácidos, mas favorece o processo de acidificação do solo devido à absorção de nutrientes pelas castanheiras e plantas do sub-bosque, segundo Costa et al. (2017). Os autores também afirmam que os indivíduos mais produtivos absorvem mais nutrientes, resultando em menores valores de SB, favorecendo a acidificação, e conseqüentemente, a redução da fertilidade do solo. Essa relação pode explicar a ocorrência das castanheiras em locais com baixos valores de SB e regiões com maiores teores de m % nas áreas do Castanhal Cachoeira. No entanto, a ocorrência de valores baixos de pH e níveis elevados de m % é comum em solos do estado do Acre (WADT, 2002; BERNINI, 2010). O elevado teor de m % não causa fitotoxicidade, pois o extrator utilizado para determinar os teores de  $Al^{+3}$  (KCl) provoca a dissolução do alumínio estrutural, que é uma forma não trocável, aumentando os resultados dos valores analíticos, porém sem refletir os verdadeiros teores de alumínio trocável no solo, que são menores (WADT, 2002).

Em geral, para o COT, resultados semelhantes foram verificados nas áreas dos dois castanhais. Nas áreas CP02, FP01 e FP02 foi observado que as variáveis COT e SB favoreceram uma maior produção de frutos, exceto na área FP01 para SB, que apresentou efeito pepita puro. Na área CP01 não ocorreu associação na distribuição do COT em relação à produção de frutos. A relação entre o COT e a produção de frutos pode ter ocorrido porque o acúmulo de resíduos vegetais melhora as propriedades do solo, proporcionando um ambiente edáfico mais favorável para o desenvolvimento vegetal. A mesma associação não foi

encontrada para a distribuição de P nos castanhais. Resultados diferentes foram encontrados para a relação entre o P e a produção de frutos no estudo conduzido por Kainer et al. (2007). Os autores verificaram que houve indivíduos com maior produção de frutos em locais com baixa concentração de fósforo, indicando a alta demanda da espécie por este nutriente.

Em geral, nas áreas estudadas, não foi observada relação da distribuição para as variáveis areia, silte e argila em função da produção de frutos da castanheira. De acordo com Guerreiro et al. (2017), a castanheira-da-amazônia apresenta melhor adaptação e, conseqüentemente, maior produção de frutos em solos com textura variando de argilosa a muito argilosa. Segundo os mesmos autores, solos com textura arenosa não são adequados para maximizar o potencial de desenvolvimento da espécie, provavelmente, devido à baixa concentração de nutrientes e retenção de umidade. No entanto, Ivanov et al. (2018) verificaram que os indivíduos de *B. excelsa* produzem menor quantidade de sementes em solos de textura argilosa quando comparado aos indivíduos que se desenvolvem em solos com textura franco-argilosa e argilo-arenosa, ou seja, solos com menor adsorção de nutrientes e principalmente menor retenção de umidade, já que a distribuição das chuvas na região favorece o abastecimento de água ao longo do ano. O padrão estabelecido por Locatelli et al. (2002) foi observado neste estudo, pois praticamente todas as áreas com alta produção e maior número de indivíduos foram verificadas em regiões com maior altitude. Spera et al. (2019) apontam em seu estudo que a castanheira-da-amazônia tem preferência por áreas com essa característica.

Os Castanhais Cachoeira e Filipinas apresentaram resultados semelhantes quanto às variáveis Ds e Dp. As áreas com menores valores dessas propriedades apresentaram alta produção de frutos e/ou maior número de árvores. Esse padrão possivelmente se deve à baixa adaptação da espécie a áreas com drenagem imperfeita em solos excessivamente compactados ou adensados (LOCATELLI et al., 2005). Analisando os atributos do solo que influenciam o desenvolvimento das castanheiras em áreas de restauração de mineração de bauxita na Amazônia, Melo et al. (2018) verificaram que valores mais altos de Ds causam efeito negativo no crescimento de *B. excelsa*. O padrão observado corrobora com os resultados encontrados nas áreas FP01 e FP02, pois a maior ocorrência da castanheira-da-amazônia foi verificada em áreas com maior porosidade, ou seja, em solos com menor retenção de água.

Os valores de alcance (a) e os mapas com a distribuição espacial das propriedades do solo nos castanhais indicaram maior variabilidade espacial para pH, COT, SB, P, N, areia total, silte, argila total e porosidade. O maior número de propriedades com alta variabilidade foi observado na área FP02, em relação às demais áreas. Esses atributos podem estar associados à baixa produção de frutos no Filipinas. De acordo com Gandah et al. (2000), a heterogeneidade dos atributos do solo pode interferir na produção de algumas espécies. Essa variabilidade pode ser explicada pelo material de origem do solo ou pelas diferentes formas de relevo encontradas nos castanhais (CAMBARDELLA et al., 1994).

A espécie *B. excelsa* apresentou distribuição em diferentes classes de solo, e, conseqüentemente, apresentou produção de frutos distinta entre os castanhais. Naturalmente, a associação da classe de solo com a altitude e a distribuição das propriedades químicas e físicas do solo determinaram parte da capacidade da produção de frutos. Portanto, a ausência de alta produção de frutos no Castanhal Filipinas, em comparação ao Castanhal Cachoeira, pode ser atribuída, em parte, às classes de solo que ocorrem naquela área, principalmente associadas aos atributos físicos do solo e a altitude da área. Os mapas gerados por meio da geoestatística fornecem subsídios para orientar o manejo da espécie, o que pode aumentar a produção de frutos nos castanhais com menos produção, pois indicam a localização das classes de solo, os teores de nutrientes e a ocorrência de castanheiras com baixa, média e alta produção de frutos. Além disso, os resultados deste estudo podem estimular o desenvolvimento de outras pesquisas, visando conhecer o potencial produtivo das culturas

nativas, melhorar características do solo e planejar estrategicamente o manejo. Portanto, os resultados desta pesquisa podem auxiliar o desenvolvimento agrícola local.

O corte das lianas associadas a indivíduos de *B. excelsa*, a adubação de cobertura com fósforo e o aumento do número de árvores a serem coletadas pelos extrativistas já foram sugeridos por Kainer et al. (2007), que analisaram a variação da produção de frutos da espécie *B. excelsa* no Castanhal Filipinas. Relacionando as variações na produção e estado nutricional da castanheira-da-amazônia com os atributos do solo, Costa et al. (2017) propuseram, como forma de repor os nutrientes, depositar no solo os resíduos de poda e as cascas do ouriço, uma vez que o fruto possui elevados teores de cálcio, magnésio e potássio. Com base neste estudo, juntamente com essas recomendações de manejo, sugere-se o plantio de mudas da castanheira-da-amazônia em clareiras onde ocorrem solos que foram relacionados com a alta produção de frutos.

## 2.7 CONCLUSÕES

Embora a ocorrência de plantas e a produção de frutos da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*) tenham sido associadas às classes e as propriedades físicas e químicas do solo, a produção de frutos diferiu entre as áreas. Em geral, as propriedades físicas do solo foram fatores limitantes para que a castanheira-da-amazônia apresentasse alta produção de frutos e/ou maior ocorrência de árvores. O Castanhal Filipinas apresentou baixa produção de frutos e maior variabilidade espacial das propriedades do solo em relação ao Castanhal Cachoeira.

## 2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMERICAS REGIONAL WORKSHOP (Conservation & Sustainable Management of Trees, Costa Rica, November 1996). *Bertholletia excelsa* Bonpl. **The IUCN Red List of Threatened Species**, 1998.
- BARDALES, N. G.; MOURA, D. C. S.; SILVA, L. M.; WADT, L. H. O. Levantamento semi-detalhado e classificação de solos no Seringal Filipinas, Epitaciolândia, Acre. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: SBCS, 2011. p. 1-4.
- BERNINI, T. A. **Caracterização mineralógica, identificação das substâncias húmicas e quantificação do alumínio em solos da formação Solimões-Acre**. 2010. 85f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.
- BERTWELL, T. D.; KAINER, K. A.; CROPPER JUNIOR, W. P.; STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O. Are Brazil nut populations threatened by fruit harvest? **Biotropica**, v. 50, n. 1, p. 50-59, 2018.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.
- CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1329-1339, 2007.
- COOPEAGRO. **Plano de Desenvolvimento Sustentável do Projeto de Assentamento Chico Mendes**. Acre: Município de Epitaciolândia, estado do Acre, 2001.
- COSTA, J. R.; CASTRO, A. B. C.; WANDELLI, E. V.; CORAL, S. C.; SOUZA, S. A. G. Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 4, p. 843-850, 2009.
- COSTA, M. G.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. Atributos do solo relacionados com a produção da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*). **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-10, 2017.
- ELIAS, G. A.; SANTOS, R. Produtos florestais não madeireiros e valor potencial de exploração sustentável da floresta atlântica no sul de Santa Catarina. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 249-262, 2016.
- FERREIRA, R. R. M.; BARDALES, N. G.; SILVA, L. M.; MIQUELONI, D. P.; WADT, L. H. O. **Levantamento de solos semidetalhado sob crescimento de castanhal nativo na região leste do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2017.
- GANDAH, M.; STEIN, A.; BROUWER, J.; BOUMA, J. Dynamics of spatial variability of millet growth and yields at three sites in Niger, West Africa and implications for precision agriculture research. **Agricultural Systems**, v. 63, n. 2, p. 123-140, 2000.
- GUERREIRO, Q. L. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; 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. **Africal Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 4, p. 237-250, 2017.

HOLDRIDGE, L. R. **Ecología basada en zonas de vida**. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1978.

HOMMA, A. K. O. Extrativismo vegetal ou plantio: qual a opção para a Amazônia? In: HOMMA, A. K. O. (ed.). **Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia e domesticação**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 17-43.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IVANOV, G. B.; FLEIG, F. D.; TONINI, H. Fatores edafoclimáticos relacionados à produção de sementes em castanhais nativos de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-6, 2018.

KAINER, K. A.; WADT, L. H. O.; STAUDHAMMER, C. L. Explaining variation in Brazil nut fruit production. **Forest Ecology and Management**, v. 250, n. 3, p. 244-255, 2007.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LOCATELLI, M.; MARTINS, E. P.; VIEIRA, A. H.; PEQUENO, P. L. L.; SILVA FILHO, E. P.; RAMALHO, A. R. **Plantio de castanha-do-brasil: uma opção para reflorestamento em Rondônia**. Porto Velho: Embrapa, CPAF-Rondônia, 2002.

LOCATELLI, M.; VIEIRA, A. H.; MARTINS, E. P.; SOUZA, V. F.; MACEDO, R. S. **Crescimento em diâmetro de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) cultivada em solo de baixa fertilidade**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2005.

MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 143-152, 2008

MELLO, Y. R.; OLIVEIRA, T. M. N. Análise estatística e geoestatística da precipitação média para o município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 229-239, 2016.

MELO, V. F.; BATISTA, A. H.; BARBOSA, J. Z.; BARBEIRO, L.; GOMES, R.; DULTRA, M. T. M. Soil quality and reforestation of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) after laterite-type bauxite mining in the Brazilian Amazon forest. **Ecological Engineering**, v. 125, p. 111-118, 2018.

MMA - Ministério do Meio Ambiente, SEDR - Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável, Departamento de Extrativismo. **Castanha-do-Brasil: boas práticas para o extrativismo sustentável orgânico**. Brasília: MMA, 2017.

MULLER, C. H. **Castanha-do-brasil: estudos agronômicos**. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1981.

MYERS, G. P.; NEWTON, A. C.; MELGAREJO, O. The influence of canopy gap size on natural regeneration of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in Bolivia. **Forest Ecology and Management**, v. 127, n. 1-3, p. 119-128, 2000.

NEVES, C. A. A castanheira do Pará. **Revista de Agricultura**, v. 13, n. 10-12, p. 462-476, 1938.

NEVES, E. S.; WADT, L. H. O.; GUEDES, M. C. 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, 2016.

OLIVEIRA, P. C. G.; FARIAS, P. R. S.; LIMA, H. V.; FERNANDES, A. R.; OLIVEIRA, F. A.; PITA, J. D. Variabilidade espacial de propriedades químicas do solo e da produtividade de citros na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 708-715, 2009.

ORTIZ, E. G. Brazil nut (*Bertholletia excelsa*). In: SHANLEY, P.; PIERCE, A. R.; LAIRD, S. A.; GUILLEN, A. (eds.). **Tapping the green market: certification & management of non-timber forest products**. London: Earthscan Publications Ltd., 2002. p. 61-74.

PELISSARI, A. L.; ROVEDA, M.; CALDEIRA, S. F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, C. K. Geostatistical modeling of timber volume spatial variability for *Tectona grandis* L.F. precision forestry. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 115-122, 2017.

PERES, C. A.; BAIDER, C. Seed dispersal, spatial distribution and population structure of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa*) in southeastern Amazonia. **Journal of Tropical Ecology**, v. 13, n. 4, p. 595-616, 1997.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE DO GOVERNO DO ESTADO DO ACRE - SEMA. **Diagnóstico socioeconômico e cadastro da Reserva Extrativista Chico Mendes – Plano Resex sustentável**. Rio Branco: SEMA, 2010.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 699-705, 2014.

SERRANO, R. O. P. **Regeneração e estrutura populacional de *Bertholletia excelsa* H. B. K. em áreas com diferentes históricos de ocupação, no vale do Rio Acre (Brasil)**. 2005. 45f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2005.

SILVA, C. S.; MENDONÇA, B. A. F.; PEREIRA, M. G.; ARAÚJO, E. J. G.; CASTELLANI, D. C. Spatial dependency and correlation of properties of soil cultivated with oil palm, *Elaeis guineensis*, in agroforestry systems in the eastern Brazilian Amazon. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 4, p. 280-289, 2018.

SILVA, D. W.; CLAUDINO, L. S.; OLIVEIRA, C. D.; MATEI, A. P.; KUBO, R. R. Extrativismo e desenvolvimento no contexto da Amazônia brasileira. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 38, p. 557-577, 2016.

SILVA, L. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; GOMES, R. P.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena**, v. 185, 2020.

SPERA, S. T.; MAGALHÃES, C. A. S.; BALDONI, A. B.; CALDERANO, S. B. Caracterização pedológica de locais de estudo de populações naturais de castanheira-do-brasil no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 7, n. 2, p. 145-161, 2019.

STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O.; KAINER, K. A.; CUNHA, T. A. Comparative models disentangle drivers of fruit production variability of an economically and ecologically important long-lived Amazonian tree. **Scientific Reports**, v.11, n. 2563, p. 1-12, 2021.

STONE, S. S. **From tapping to cutting trees: participation and agency in two community-based timber management projects in Acre, Brazil**. Dissertation (Master in Philosophy) – University of Florida, Gainesville, 2003.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

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

VILHENA, M. R. **Ciência, tecnologia e desenvolvimento na economia da castanha-do-brasil: a transformação industrial da castanha-do-Brasil na COMARU - Região Sul do Amapá**. 2004. 149p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

WADT, L. H. O.; KAINER, K. A.; STAUDHAMMER, C. L.; SERRANO, R. O. P. Sustainable forest use in Brazilian extractive reserves: natural regeneration o Brazil nut in exploited populations. **Biological Conservation**, v. 141, n. 1, p. 332-346, 2008.

WADT, P. G. S. **Manejo de solos ácidos do estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2002.

WANDERLEY, H. S.; AMORIM, R. F. C.; CARVALHO, F. O. Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 3, p. 347-354, 2012.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. Cambridge: Academic Press, 1980. p. 319-344.

ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DO ACRE - ZEE. **Recursos Naturais e Meio Ambiente**. Rio Branco: Secretaria de estado de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, 2000.

### 3      CAPÍTULO II

## **FATORES EDÁFICOS ASSOCIADOS COM A PRODUÇÃO DE FRUTOS E O DIÂMETRO DE *Bertholletia excelsa* Bonpl. EM CASTANHAIS NATIVOS**

### 3.1 RESUMO

Alguns estudos já avaliaram a correlação de atributos do solo com a ocorrência de castanheiras e produção de frutos em castanhais nativo. No entanto, atualmente, não foi confirmado se os atributos edáficos influenciam nessa diferenciação da produção de frutos da espécie *B. excelsa*; e se sim, qual(is) atributo(s) interfere(m). Este trabalho teve como objetivo investigar associações entre os atributos físicos e químicos do solo com o diâmetro a 1,30 m do solo – DAP da espécie *B. excelsa* e a sua produção de frutos, em dois castanhais nativos localizados na Amazônia Ocidental. O estudo foi realizado em dois castanhais nativos, denominados Cachoeira e Filipinas, no estado do Acre. Em cada castanhal foram demarcadas duas áreas de 600 x 600 m. Todas as castanheiras com o diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) maiores ou iguais a 50 cm foram mensuradas e a produção média de frutos foi calculada a partir da contagem de frutos, entre os anos de 2010 e 2020. As árvores foram divididas em três classes de produção: baixa ( $\leq 1,5$  lata), média (1,6 a 3,9 latas) e alta ( $\geq 4,0$  latas). Foram coletadas 240 amostras de terra, sendo determinados os atributos químicos (pH, carbono orgânico total, nitrogênio total, fósforo disponível, capacidade de troca catiônica, ferro, zinco, manganês e cobre) e físicos do solo (granulometria, densidade do solo, densidade de partículas e estimativa da porosidade total). Foi considerada a média de quatro amostras de terra entorno de cada árvore. A análise fatorial (AF) foi realizada para associar as variáveis da vegetação com os atributos do solo, enquanto a análise de Cluster testou a similaridade entre as propriedades do solo e a produção de frutos e o DAP. As Redes Neurais Artificiais (RNAs) foram ajustadas para verificar se os atributos do solo explicavam as classes de produção de frutos. No Cachoeira, castanhal com maior produção, a areia se associou positivamente com a produção de frutos e com o DAP na análise fatorial e Cluster. No Filipinas, castanhal com menor produção, a argila se correlacionou com a produção de frutos na AF; enquanto na análise de Cluster, a produção ficou agrupada com as variáveis argila e cobre. Para as RNAs, foi verificado um baixo percentual de acerto no Cachoeira, enquanto no Filipinas, houve correta classificação das classes de produção de frutos por meio dos atributos do solo, demonstrando que existe diferença nas propriedades do solo entre as classes de produção. A textura do solo foi correlacionada positivamente com a produção de frutos de *B. excelsa* nos dois castanhais. Em geral, solos com textura franca foram verificados maiores valores de produção quando comparados com solos de textura franca-arenosa. No Filipinas os atributos do solo foram capazes de classificar corretamente as classes de produção de frutos.

**Palavras-chave:** castanheira-da-amazônia, atributos do solo, análise multivariada, Redes Neurais Artificiais.

### 3.2 ABSTRACT

Some studies have already evaluated the correlation of soil attributes with the occurrence of chestnut trees and fruit production in native chestnut groves. However, currently, it has not been confirmed whether the edaphic attributes influence this differentiation of fruit production of the species *B. excelsa*; and if so, which attribute(s) interfere. This work aimed to investigate associations between physical and chemical soil attributes with the diameter at 1.30 m from the soil – DBH of the species *B. excelsa* and its fruit production, in two native chestnut groves located in the Western Amazon. The study was carried out in two native chestnut groves, called Cachoeira and Filipinas, in the state of Acre. In each chestnut grove, two areas measuring 600 x 600 m were demarcated. All chestnut trees with a diameter at 1.30 m from the ground (DBH) greater than or equal to 50 cm were measured and the average fruit production was calculated from the fruit count, between the years 2010 and 2020. The trees were divided into three production classes: low ( $\leq 1.5$  cans), medium (1.6 to 3.9 cans) and high ( $\geq 4.0$  cans). A total of 240 soil samples were collected, and the chemical (pH, total organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, cation exchange capacity, iron, zinc, manganese and copper) and physical attributes of the soil (granulometry, soil density, density of particles and estimation of total porosity). The average of four soil samples around each tree was considered. Factor analysis (FA) was performed to associate vegetation variables with soil attributes, while Cluster analysis tested the similarity between soil properties and fruit production and DBH. The Artificial Neural Networks (ANNs) were adjusted to verify if the soil attributes explained the classes of fruit production. In Cachoeira, chestnut grove with the highest production, sand was positively associated with fruit production and with DAP in factorial and cluster analysis. In the Filipinas, chestnut with the lowest production, clay correlated with fruit production in AF; while in the Cluster analysis, the production was grouped with the variables clay and copper. For the ANNs, a low percentage of correct answers was verified in Cachoeira, while in the Filipinas, there was a correct classification of fruit production classes through soil attributes, demonstrating that there is a difference in soil properties between production classes. Soil texture was positively correlated with fruit production of *B. excelsa* in the two chestnut groves. In general, loam textured soils were found to have higher production values when compared to loam-sandy textured soils. In the Filipinas, soil attributes were able to correctly classify fruit production classes.

**Keywords:** Brazil nut, soil attributes, multivariate analysis, Artificial Neural Networks.

### 3.3 INTRODUÇÃO

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) pertence à família Lecythidaceae, sendo nativa do Bioma Amazônico. Atualmente, está na categoria vulnerável na lista oficial de espécies da flora brasileira ameaçadas de extinção (BRASIL, 2022). É uma espécie encontrada geralmente em florestas de terra firme (MORI, 1992), podendo ocorrer em agrupamentos denominados de castanhais (SALOMÃO, 1991) ou de forma mais distribuída e aleatória como registrado na Amazônia Sul-Occidental (WADT et al., 2005). Sua semente, denominada de castanha, tem alto valor nutricional e comercial, e tem gerado renda para as comunidades extrativistas. De acordo com dados da Extração Vegetal e Silvicultura do IBGE (2021), em 2020 o Brasil produziu 33.118 toneladas de castanheira-da-amazônia, correspondendo à R\$ 98,55 milhões em valor de produção.

É por meio do solo que ocorre a sustentação física e a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas (REICHERT et al., 2007). Os solos da região amazônica, de maneira geral, são caracterizados por apresentarem baixa fertilidade natural, em que a ciclagem de nutrientes é responsável pela reposição dos macronutrientes e micronutrientes nos solos florestais (MOLINE; COUTINHO, 2015). Tendo em vista que os fatores edáficos interferem diretamente no desenvolvimento dos vegetais, Guerreiro (2017) avaliou a relação espacial dos atributos do solo com a distribuição de indivíduos de *B. excelsa*, e observou que as variáveis silte, argila, macroporosidade, pH, fósforo, zinco e cobre apresentaram relação espacial com a castanheira-da-amazônia. Por outro lado, Costa et al. (2017), analisando os atributos químicos do solo relacionados com às variações na produção de frutos de *B. excelsa*, observaram que os indivíduos mais produtivos removeram uma maior quantidade de bases trocáveis, favorecendo o aumento da acidez do solo.

Com a aplicação da estatística multivariada, utilizando diferentes atributos do solo, é possível construir agrupamentos de variáveis com características semelhantes, permitindo a obtenção de um melhor entendimento da variabilidade dos processos que ocorrem no solo (SENA et al., 2002). A análise fatorial tem como objetivo transformar um conjunto de variáveis em grupos menores (fatores), encontrando dentro de cada fator atributos que são altamente correlacionados negativamente ou positivamente; logo, possibilitando uma melhor compreensão da relação entre essas variáveis (JOHNSON; WICHERN, 2007; MANLY, 2008). Já a análise de Cluster classifica e agrupa determinadas variáveis, de acordo com a similaridade entre elas (SENA et al., 2002). Silva et al. (2020) com a finalidade de diminuir o número de atributos do solo e da vegetação por meio da análise fatorial, conseguiram reduzir de 20 variáveis analisadas em três fatores, o primeiro fator relacionado com a matéria orgânica do solo, o segundo descreveu o desenvolvimento do estrato arbóreo e o terceiro representou os teores de bases no solo.

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são sistemas computacionais que usam como princípio a organização do sistema nervoso biológico (DUBOSE; KLIMASAUSKAS, 1989), sendo uma ferramenta de reconhecimento e classificação de padrões (BONHAM-CARTER, 1994). A aplicação da RNA consiste em definir o número de observações da camada de entrada (variáveis do solo, por exemplo), nos quais os dados são processados por meio de uma ou mais camadas ocultas e é encontrado um padrão de saída correspondente (camada de saída), fase denominada de treinamento (ZHAI et al., 2006; SOARES et al., 2014). As RNAs podem ser aplicadas para entender como os atributos do solo interferem na produtividade de grãos (LEAL et al., 2015). Ao avaliar a eficiência do uso dos atributos do solo para o estabelecimento de sítios de manejo e predição da produtividade de grãos de milho por meio das RNAs e análise de regressão, Leal et al. (2015) verificaram por meio das RNAs uma melhor predição na produtividade de grãos. Beucher et al. (2019) comparando técnicas de

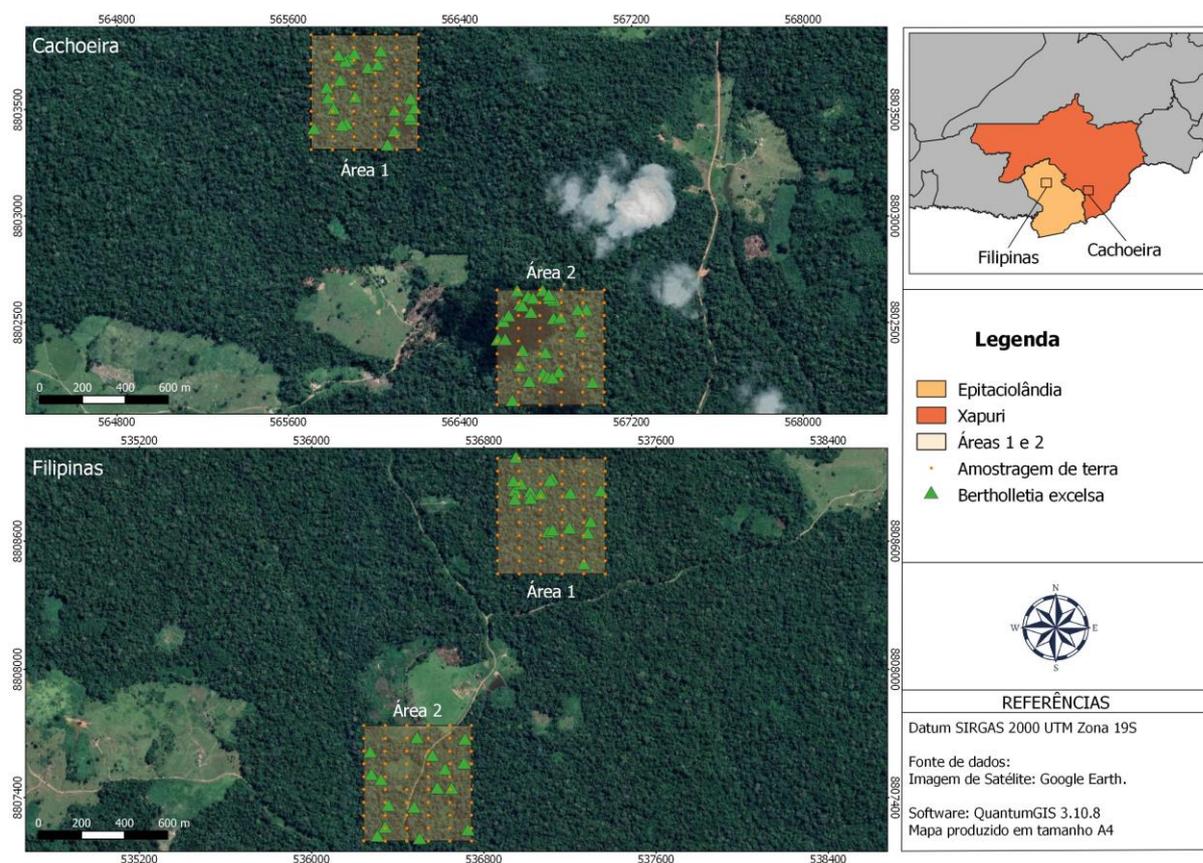
classificação, como as RNAs e árvore de decisão, para mapear as classes de drenagem do solo, verificaram que com o emprego da RNA observou-se melhor desempenho quando comparada com a outra classificação.

Alguns estudos já avaliaram a correlação de atributos do solo com a ocorrência de castanheiras e produção de frutos em castanhais nativos (COSTA et al., 2017; GUERREIRO et al., 2017; STAUDHAMMER et al., 2021). Um desses estudos foi feito no estado do Acre, onde há dois castanhais (Cachoeira e Filipinas), distantes entre si cerca de 30 km, que possuem características climáticas semelhantes, porém, com produção de frutos muito distintas (STAUDHAMMER et al., 2021). No entanto, atualmente, não foi confirmado se os atributos edáficos influenciam nessa diferenciação da produção de frutos da espécie *B. excelsa*; e se sim, qual(is) atributo(s) interfere(m). Nesta situação, há a hipótese de que os atributos do solo influenciam na produção de frutos da castanheira-da-amazônia. O objetivo deste estudo foi investigar associações entre a produção de frutos e o diâmetro a 1,30 m do solo – DAP da espécie *Bertholletia excelsa* com os atributos físicos e químicos do solo nestes dois castanhais nativos localizados na Amazônia Ocidental, Cachoeira e Filipinas.

## 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.4.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em dois castanhais nativos, Cachoeira e Filipinas, no estado do Acre, Brasil (Figura 8). Os castanhais são ex-seringais e estão localizados em Unidades de Conservação de uso sustentável, com uma distância de 30 km entre eles. O Cachoeira está situado no Projeto de Assentamento Agroextrativista (PAE) Chico Mendes, em Xapuri, e o Filipinas na Colocação Rio de Janeiro, Resex Chico Mendes, município de Epitaciolândia. Foram alocadas duas áreas com dimensão de 36 ha cada nos dois castanhais, com uma distância mínima de 800 m entre as áreas em cada castanhal. A precipitação média anual nas áreas de estudo é de 1.830 mm (INMET, 2015), o clima da região é do tipo “Aw”, de acordo com o sistema de classificação de Köppen, com temperatura média anual de 25 °C, diminuindo até a 8 °C durante os meses de junho a agosto (ALVARES et al., 2013). A altitude da região está entre 160 e 350 m e o relevo varia de suave ondulado a ondulado (ZEE, 2000).



**Figura 8.** Mapa de localização dos castanhais nativos, Cachoeira e Filipinas, na Amazônia Ocidental, com detalhe a localização das áreas (1 e 2) em cada castanhal, a amostragem de terra e os indivíduos da espécie *Bertholletia excelsa* com DAP maior ou igual a 50 cm.

A fitofisionomia predominante nos castanhais é a Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas com dossel emergente (IBGE, 2021). No Cachoeira, também ocorre Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas com bambus e pastagens; enquanto no Filipinas, ocorre também Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas com palmeiras e Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas com bambus (IBGE, 2021). A área florestal na qual o castanhal Cachoeira apresenta maiores níveis de distúrbios, como a prática do manejo florestal

sustentável, mas não há indicativo que essa perturbação interfira na produção de castanhas (STAUDHAMMER et al., 2021). Na área 2 no Filipinas, há a presença de estradas que atravessam os castanhais (Figura 8). Estudos anteriores identificaram indivíduos com menor desenvolvimento e baixa produção de frutos de *B. excelsa* no Filipinas (STAUDHAMMER et al., 2021).

As classes de solo predominantes no Cachoeira são os Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico e o Latossolo Vermelho Distrófico argissólico (SILVA et al., 2021). São solos com e sem presença de concreções de petroplintita, profundos, bem estruturados e localizados em áreas de relevo plano (FERREIRA et al., 2017). No Filipinas ocorrem os Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico petroplíntico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico e Latossolo Vermelho Distrófico argissólico (SILVA et al., 2021). São solos com e sem presença de concreções lateríticas, forte tendência à erosão e altos teores de saturação por alumínio, acidez elevada e presença de linhas de pedra (BARDALES et al., 2011). Nesse castanhal, as castanheiras com maior produção foram verificadas em solos mais desenvolvidos, profundos e localizados em áreas de relevo plano (BARDALES et al., 2011).

### 3.4.2 Atributos do solo

Com o objetivo de analisar os atributos químicos e físicos do solo, foram alocadas duas áreas com dimensões de 600 x 600 (36 ha) em cada castanhal. No total, 240 amostras de terra foram coletadas por castanhal, das quais 120 amostras deformadas na profundidade de 0,00-0,20 m para a determinação dos atributos químicos e granulometria, e 120 amostras indeformadas na profundidade de 0,07-0,13 m para a análise da densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp) e estimativa da porosidade total.

Foram analisados e calculados os seguintes atributos do solo: pH (H<sub>2</sub>O), carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (N), fósforo disponível (P), capacidade de troca catiônica (Valor T), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), cobre (Cu) e análise granulométrica do solo para a determinação dos teores de areia total, silte e argila total, com a finalidade de classificar a textura do solo (Tabela 4).

**Tabela 4.** Classificação da textura do solo em dois castanhais nativos localizados na Amazônia Ocidental, Acre.

Castanhal	Granulometria			Textura <sup>1</sup>
	Areia	Silte	Argila	
		g kg <sup>-1</sup>		
Cachoeira	442,60	392,10	165,28	Franca
Filipinas	601,80	264,10	134,12	Franco-arenosa

<sup>1</sup>Classificação proposta por Freire et al. (2013).

O pH foi medido em uma mistura de 1:2,5 de solo e água. Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> foram determinados por titulação com hidróxido de sódio 0,025 mol L<sup>-1</sup> e Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> por titulação com ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) 0,125 mol L<sup>-1</sup>. Fósforo, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> e micronutrientes (Fe, Zn, Mn e Cu) foram extraídos com Mehlich<sup>1</sup>. Fósforo foi determinado por colorimetria e K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> e micronutrientes por fotometria de chama. A capacidade de troca catiônica foi obtida pela soma dos teores de Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup> + H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>. O COT foi quantificado por oxidação, utilizando dicromato de potássio em ácido sulfúrico. A determinação do N foi obtida por digestão sulfúrica, seguida por destilação Kjeldahl. O método da pipeta foi utilizado para a caracterização granulométrica das amostras. As frações de argila, silte, areia

grossa, areia fina e areia total foram separadas. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico com base na relação massa/volume e a densidade das partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. A porosidade total foi calculada com base na relação entre as propriedades densidade de partículas e densidade do solo. As análises químicas e físicas do solo seguiram os métodos descritos por Teixeira et al. (2017), com exceção do N que foi quantificado de acordo com Tedesco et al. (1995).

### 3.4.3 Atributos da vegetação

Castanheiras com diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) maiores ou iguais a 50 cm foram mensuradas em ambos os castanhais, por meio do monitoramento da contagem de frutos. A produção média dos frutos foi calculada, sendo quantificados os frutos de 51 e 34 árvores reprodutivas no Cachoeira e Filipinas, respectivamente, entre os anos de 2010 a 2020, nos meses de janeiro e fevereiro após a queda dos mesmos. Após a contagem dos frutos, as árvores foram divididas em três classes de produção de frutos, considerando a unidade de medida local: baixa ( $\leq 1,5$  lata), média (1,6 a 3,9 latas) e alta ( $\geq 4,0$  latas). A unidade de medida “lata” é a medida tradicional de volume da região (18 L) e a quantidade de frutos necessários para encher uma lata varia de acordo com a localidade. Para os castanhais Cachoeira e Filipinas, o número de frutos para encher uma lata de 18 L é de 59 e 77 frutos, respectivamente, (dados não publicados) e esses valores foram utilizados para classificar as castanheiras nas classes de produção.

### 3.4.4 Análise de dados

Para os atributos do solo, foi considerada a média de quatro amostras de terra em torno de cada árvore, para cada variável do solo analisada. A produção de frutos, DAP e os atributos do solo foram submetidos à análise descritiva com o objetivo de verificar a dispersão dos dados. Foram obtidos a média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV %). Valores de  $CV < 12\%$ ,  $12 < CV < 60\%$  e  $CV > 60\%$  foram considerados como baixa, moderada e alta variabilidade dos dados, respectivamente (WARRICK; NIELSEN, 1980).

Para testar a associação dos atributos do solo com a produção de frutos e o DAP, foi utilizada a análise fatorial (AF). De acordo com Johnson e Wichern (2007), o modelo de fatores para as observações de um vetor aleatório observável é  $X = [X_1, X_2, \dots, X_p]^T$ , com vetor de médias  $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p]^T$ , matriz de covariância  $\Sigma_{p \times p}$  e matriz de correlação  $P_{p \times p}$ . Sejam  $Z_i = \frac{(X_i - \mu_i)}{\sigma_i}$  as variáveis padronizadas, em que  $\mu_i$  e  $\sigma_i$ , representam a média e o desvio padrão da variável  $X_i, i = 1, 2, \dots, p$ . Diante disso, os modelos da AF para o Cachoeira [1] e Filipinas [2] construídos neste estudo, a partir da matriz de correlação foram dados por:

$$Z_i = l_{i1}F_1 + l_{i2}F_2 + l_{i3}F_3 + \varepsilon_i \quad [1]$$

em que,  $i = 1, 2, \dots, 17$ ;  $l_{ij}, j = 1, 2, 3$ , são cargas da  $i$ -ésima variável sobre o  $i$ -ésimo fator;  $F_j, j = 1, 2, 3$ , são os fatores comuns; e  $\varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, 17$  são os erros ou o fator específico associado à  $i$ -ésima variável.

$$Z_i = l_{i1}F_1 + l_{i2}F_2 + l_{i3}F_3 + l_{i4}F_4 + \varepsilon_i \quad [2]$$

em que,  $i = 1, 2, \dots, 17$ ;  $l_{ij}, j = 1, 2, 3, 4$ , são cargas da  $i$ -ésima variável sobre o  $i$ -ésimo fator;  $F_j, j = 1, 2, 3, 4$ , são os fatores comuns; e  $\varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, 17$  são os erros ou o fator específico associado à  $i$ -ésima variável.

A AF foi efetuada de acordo com os seguintes parâmetros: construção da matriz de correlação, com valores maiores ou iguais a 0,30; averiguação da adequabilidade dos dados por meio do teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), com valor maior ou igual a 0,50, e do teste de esfericidade de Bartlett, que testa a hipótese nula de que as variáveis não são correlacionadas; determinação da matriz de cargas fatoriais utilizando o método de componentes principais; rotação dos fatores pelos métodos de rotação ortogonal OBLIMIN (Cachoeira) e VARIMAX (Filipinas); extração dos fatores por meio da variância explicada, nos quais os fatores precisaram explicar 60 % da variância; e interpretação dos fatores a partir das cargas fatoriais (cargas maiores ou iguais a 0,50) (HAIR et al., 2005; HAIR et al., 2009; FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2010).

Os dados foram submetidos à análise de agrupamento de Cluster com o objetivo de verificar a similaridade entre os atributos químicos e físicos do solo e a produção de frutos e o DAP. Nessa análise, utilizou-se a distância Euclidiana [3] como medida de similaridade e o Método da Ligação Completa como algoritmo de agrupamento.

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{l=1}^M (x_{il} - x_{jl})^2} \quad [3]$$

em que,  $x_{il}$  é o valor da variável  $X_l$  para o objeto  $i$  e  $x_{jl}$  é o valor da mesma variável para o objeto  $j$ .

Com o propósito de verificar se as variáveis do solo explicaram as classes de produção de frutos em cada castanhal foi ajustada as redes neurais artificiais (RNAs). Para a aprendizagem supervisionada foi utilizado o modelo *Multilayer Perceptron* (MLP) (ou Perceptron Multicamadas), com a função de ativação logística. A MLP consistiu no uso de uma camada de entrada [4], nas quais as variáveis foram normalizadas em intervalos de -1 a 1 e apresentadas à rede (variáveis independentes); a camada oculta [5], no qual foi realizado o processamento dos dados; e a camada de saída [6 e 7], no qual o resultado é apresentado para uma classe prevista (variável dependente). No presente estudo foram utilizadas duas camadas ocultas, pois apresentaram melhor desempenho nas análises.

$$a_j = \sum_{i=1} (x_i w_{ij}) + b_i \quad [4]$$

$$c_j = \frac{e^{a_j} + e^{-a_j}}{e^{a_j} - e^{-a_j}} \quad [5]$$

$$d_k = \sum_{j=1} (c_j w_{jk}) + b_k \quad [6]$$

$$Y_K = d_k \quad [7]$$

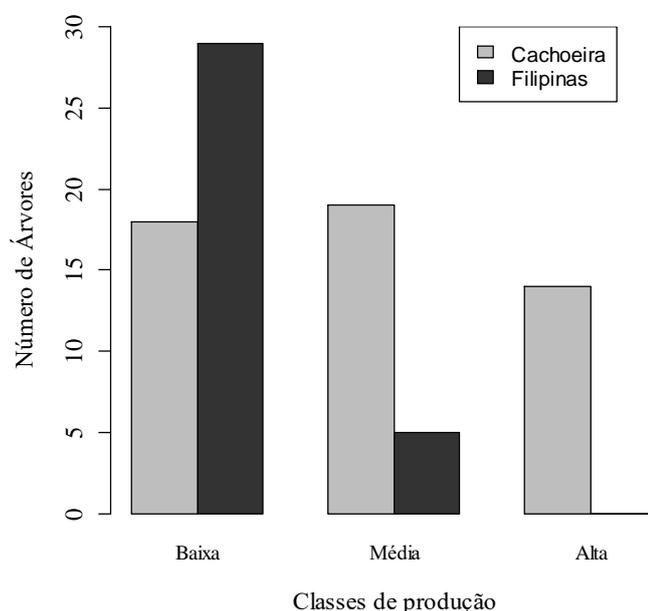
Para o treinamento das RNAs, foram escolhidas aleatoriamente 70 % das amostras e 30 % ficaram para a validação (SOARES et al., 2014). As variáveis de entrada utilizadas foram aquelas que apresentaram correlação com a produção de frutos por meio da análise fatorial e o agrupamento de Cluster nos dois castanhais e também foram empregadas todas as variáveis do solo (pH, COT, N, P, Valor T, Fe, Zn, Mn, Cu, areia, silte, argila, Ds, Dp e porosidade) como camada de entrada. A variável produção foi retirada dessas análises para não ocorrer tendência nos resultados. O critério para a escolha da melhor rede se baseou na que apresentou o melhor percentual de acerto total.

Todas as análises de dados foram realizadas por meio do *software* R 4.1.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2021).

### 3.5 RESULTADOS

#### 3.5.1 Produção de frutos

Foi verificada distribuição aproximadamente homogênea do número de árvores nas classes de produção de frutos de *B. excelsa* no Cachoeira (Figura 9), para as duas áreas em conjunto, sendo verificado maior número de indivíduos com média produção de frutos (19 árvores), seguida de árvores com baixa produção (18 árvores) e alta produção (14 árvores). No Filipinas foi observada distribuição heterogênea das classes de produção, com maior número de árvores com baixa produção de frutos (29 árvores); enquanto cinco árvores apresentaram produção média e nenhum indivíduo apresentou alta produção.



**Figura 9.** Distribuição do número de árvores por classes de produção de frutos de *Bertholletia excelsa*, em dois castanhais nativos, Cachoeira e Filipinas, na Amazônia Ocidental, Acre.

#### 3.5.2 Análise fatorial

Para a produção de frutos foram verificados maiores valores absolutos de mediana no Cachoeira (190,00) quando comparado com o Filipinas (33,35), mas ambos apresentaram alta variabilidade na distribuição nos dois castanhais (72,62 e 110,47 %, respectivamente) (Tabela 5). Para a mediana do DAP das árvores presentes no Filipinas foi observado maior valor absoluto (112,00 cm) comparando-se com o Cachoeira (98,40 cm), com moderada distribuição nos castanhais (30,74 e 35,97 %, respectivamente). No entanto, os valores mínimos e máximos do DAP foram maiores no Cachoeira, ao contrário do Filipinas, no qual verificaram-se menores valores.

**Tabela 5.** Estatística descritiva para os atributos da vegetação e do solo em dois castanhais nativos, Cachoeira e Filipinas, na Amazônia Ocidental, Acre.

Variáveis	Estatística					
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	s	CV (%)
Cachoeira						

Produção (nº de frutos)	0,00	516,11	209,42	190,00	152,09	72,62
DAP (cm)	55,70	225,40	101,70	98,40	36,58	35,97
pH (H <sub>2</sub> O)	4,17	4,79	4,39	4,38	0,14	3,33
COT (g kg <sup>-1</sup> )	3,88	11,28	7,06	6,57	1,57	22,20
N (g kg <sup>-1</sup> )	0,69	1,33	0,95	0,95	0,14	15,08
P (mg dm <sup>-3</sup> )	4,06	7,46	5,26	5,14	0,71	13,60
Valor T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,27	6,32	4,79	4,90	0,77	16,08
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	78,25	188,75	130,26	127,00	27,24	20,91
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,42	5,85	0,99	0,66	1,05	105,92
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	6,62	124,93	45,18	40,62	28,02	62,02
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,57	1,25	0,86	0,84	0,18	20,94
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	310,50	550,50	442,60	431,30	58,10	13,13
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	180,50	546,80	392,10	400,10	84,88	21,64
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	95,75	321,50	165,28	148,00	48,09	29,09
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	1,22	1,46	1,36	1,38	0,05	3,94
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	2,48	2,70	2,60	2,59	0,08	3,27
Porosidade (%)	40,97	53,17	47,47	48,14	3,11	6,55
Filipinas						
Produção (nº de frutos)	0,00	301,10	65,60	33,35	72,47	110,47
DAP (cm)	51,20	164,90	106,78	112,00	32,83	30,74
pH (H <sub>2</sub> O)	3,88	4,35	4,07	4,03	0,15	3,64
COT (g kg <sup>-1</sup> )	3,88	11,60	8,50	8,93	1,97	23,24
N (g kg <sup>-1</sup> )	0,65	1,00	0,80	0,81	0,10	12,30
P (mg dm <sup>-3</sup> )	3,05	4,61	3,67	3,62	0,32	8,89
Valor T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,33	5,79	4,33	4,36	0,66	15,25
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	94,25	417,00	272,53	328,25	109,30	40,11
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,20	0,81	0,36	0,33	0,13	35,83
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,34	106,66	29,41	19,50	28,68	97,55
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,65	1,16	0,88	0,88	0,11	12,42
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	480,00	696,70	601,80	593,20	54,99	9,14
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	179,70	369,10	264,10	262,70	49,26	18,65
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	99,88	185,50	134,12	132,62	21,79	16,25
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	1,13	1,40	1,29	1,31	0,07	5,54
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	2,58	2,70	2,64	2,64	0,03	1,18
Porosidade (%)	46,72	56,48	51,13	50,55	2,42	4,73

s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; produção = produção média de frutos entre os anos de 2010 e 2020 de *Bertholletia excelsa*; DAP = diâmetro a 1,30 m do solo; COT = carbono orgânico total; N = nitrogênio total; P = fósforo disponível; Valor T = capacidade de troca catiônica do solo; Fe = ferro; Zn = zinco; Mn = manganês; Cu = cobre; Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas.

Para os atributos do solo, de maneira geral, foram verificados valores absolutos de média e mediana próximos em cada castanhal, com as medianas menores que as médias (Tabela 5). Os atributos químicos e físicos do solo apresentaram valores de coeficiente de variação (CV) com baixa ( $CV < 12\%$ ) a moderada ( $12 < CV < 60\%$ ) variabilidade dos dados. Enquanto para os micronutrientes de moderada a alta ( $CV > 60\%$ ) variabilidade. No

que concerne a textura do solo, no Cachoeira, a média absoluta (442,60 g kg<sup>-1</sup>) e mediana absoluta (431,30 g kg<sup>-1</sup>) dos teores de areia foram menores quando comparados ao Filipinas (601,80 e 593,20 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente).

Na análise fatorial foi observado que os dados apresentaram valores adequados pelos testes KMO e esfericidade de Bartlett para a aplicação da AF. O teste KMO foi de 0,58 e 0,50 para o Cachoeira e Filipinas, respectivamente, e o teste de Bartlett foi significativo a p<0,01 nos dois castanhais, rejeitando a hipótese nula de que as variáveis não são correlacionadas. A AF aplicada para o Cachoeira foi definida em três fatores, os quais representaram 65,20 % da variação acumulada dos dados (Tabela 6).

**Tabela 6.** Eixos fatoriais extraídos para os atributos da vegetação e do solo e as respectivas cargas fatoriais, autovalores, variância total e acumulada e comunalidade do Cachoeira na Amazônia Ocidental, Acre.

Atributos	Eixo Fatorial <sup>(*)</sup>			Comunalidade
	1	2	3	
Produção	0,16	-0,01	<b>0,70</b>	1,10
DAP	0,15	0,15	<b>0,65</b>	1,20
pH	-0,47	<b>0,70</b>	0,24	2,00
COT	<b>0,61</b>	0,48	-0,02	1,90
N	<b>0,85</b>	0,23	-0,18	1,20
P	0,18	<b>0,79</b>	-0,18	1,20
Valor T	<b>0,84</b>	-0,14	-0,14	1,10
Fe	-0,15	<b>-0,62</b>	-0,14	1,20
Zn	-0,19	<b>0,86</b>	-0,01	1,10
Mn	-0,02	<b>0,80</b>	-0,08	1,00
Cu	<b>0,58</b>	0,15	-0,15	1,30
Areia	0,48	-0,25	<b>0,55</b>	2,40
Silte	<b>-0,84</b>	0,12	-0,34	1,40
Argila	<b>0,91</b>	0,09	-0,05	1,00
Ds	<b>-0,79</b>	-0,12	-0,14	1,10
Dp	<b>0,61</b>	-0,22	-0,38	2,00
Porosidade	<b>0,87</b>	-0,04	-0,12	1,00
Autovalores	6,01	3,38	1,70	-
Variância total (%)	35,30	19,90	10,00	-
Variância acumulada (%)	35,30	55,20	65,20	-

<sup>(\*)</sup> Cargas fatoriais  $\geq 0,50$  (positivas e negativas) foram consideradas significantes (em negrito) para fins de interpretação; produção = produção média de frutos de *Bertholletia excelsa* nos anos de 2010 a 2020; DAP = diâmetro a 1,30 m do solo; COT = carbono orgânico total; N = nitrogênio total; P = fósforo disponível; Valor T = capacidade de troca catiônica do solo; Fe = ferro; Zn = zinco; Mn = manganês; Cu = cobre; Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas.

O primeiro eixo fatorial explicou 35,30 % da variabilidade dos dados e está associado com a capacidade dos solos do Cachoeira em reter cátions, pois os atributos com maiores cargas fatoriais foram argila (0,91), porosidade (0,87), N (0,85), Valor T (0,84), silte (-0,84), Ds (-0,79) e COT (0,61), respectivamente, na medida em que silte e densidade das partículas foram correlacionados negativamente nesse fator (Tabela 6). O Fator 2 exibiu 19,90 % da variabilidade dos dados e está relacionado com os micronutrientes e com o pH do solo. O

Fator 3 apresentou menor variância quando comparado com os outros fatores (10,00 %); porém, é nesse fator que foi exibida associação positiva entre os atributos da vegetação e a variável areia. O teor médio de areia no Cachoeira foi igual a 442,60 g kg<sup>-1</sup>, correspondendo a uma porcentagem de areia igual a 44,26 %, sendo a camada amostrada desse castanhal classificada como de textura franca (Tabela 4).

No Filipinas a AF foi definida em quatro fatores, os quais explicaram 77,90 % da variação acumulada dos dados (Tabela 7). A maioria dos atributos do solo ficou associada ao Fator 1, indicando que esse fator representa os atributos edáficos no Filipinas. As variáveis pH, Zn, Mn, Areia, Ds e Dp ficaram correlacionadas negativamente neste fator. O Fator 2 foi representado apenas por uma variável, o Cu. Enquanto no Fator 3, o DAP e P foram correlacionados positivamente, o que indica efeitos do P no crescimento em diâmetro das castanheiras. No Fator 4, a produção de frutos ficou correlacionada com a variável argila, demonstrando que a textura do solo pode estar influenciando a produção de frutos de *B. excelsa* nos dois castanhais. Vale ressaltar que no Filipinas os teores médios de argila foram baixos, com média de 134,12 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 4).

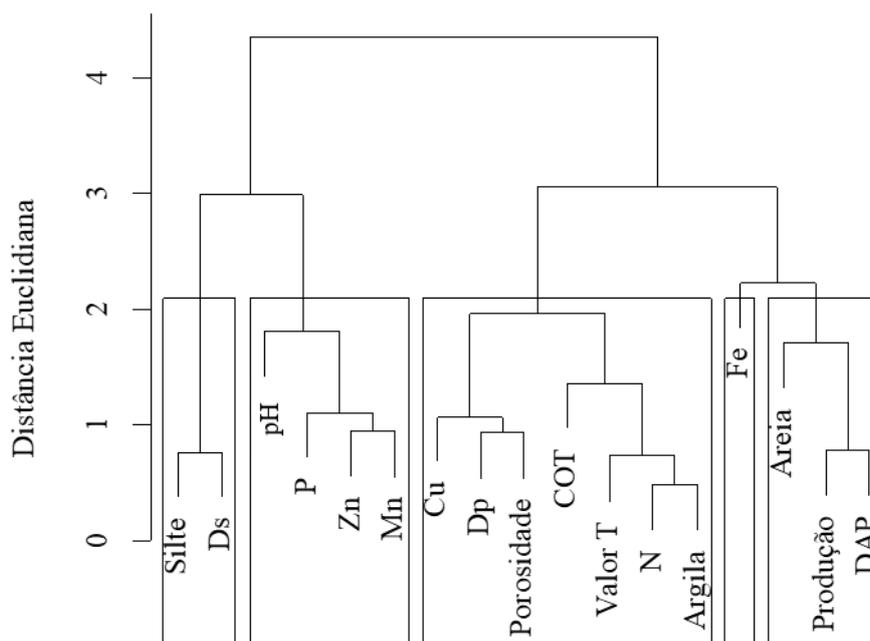
**Tabela 7.** Eixos fatoriais extraídos para os atributos da vegetação e do solo e as respectivas cargas fatoriais, autovalores, variância total e acumulada e comunalidade do Filipinas na Amazônia Ocidental, Acre.

Atributos	Eixo Fatorial (*)				Comunalidade
	1	2	3	4	
Produção	0,00	-0,05	0,33	<b>0,64</b>	1,50
DAP	-0,09	0,19	<b>0,74</b>	0,11	1,20
pH	<b>-0,93</b>	0,19	0,04	0,04	1,10
COT	<b>0,85</b>	0,14	-0,01	0,30	1,30
N	<b>0,80</b>	0,20	-0,08	0,42	1,70
P	0,09	0,01	<b>0,83</b>	-0,09	1,10
Valor T	<b>0,80</b>	0,07	0,11	0,25	1,30
Fe	<b>0,89</b>	-0,16	0,09	-0,11	1,10
Zn	<b>-0,52</b>	0,49	0,15	-0,30	2,80
Mn	<b>-0,88</b>	0,25	-0,10	0,05	1,20
Cu	0,13	<b>0,86</b>	0,12	0,12	1,10
Areia	<b>-0,83</b>	-0,22	0,30	-0,16	1,50
Silte	<b>0,86</b>	0,15	-0,16	-0,18	1,20
Argila	0,15	0,20	-0,39	<b>0,81</b>	1,70
Ds	<b>-0,81</b>	-0,48	-0,06	-0,12	1,70
Dp	<b>-0,65</b>	-0,35	-0,05	0,36	2,20
Porosidade	<b>0,76</b>	0,46	0,06	0,22	1,90
Autovalores	7,86	1,89	1,78	1,70	-
Variância total (%)	46,30	11,10	10,50	10,00	-
Variância acumulada (%)	46,30	57,40	67,90	77,90	-

(\*) Cargas fatoriais  $\geq 0,50$  (positivas e negativas) foram consideradas significantes (em negrito) para fins de interpretação; produção = produção média de frutos de *Bertholletia excelsa* nos anos de 2010 a 2020; DAP = diâmetro a 1,30 m do solo; COT = carbono orgânico total; N = nitrogênio total; P = fósforo disponível; Valor T = capacidade de troca catiônica do solo; Fe = ferro; Zn = zinco; Mn = manganês; Cu = cobre; Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas.

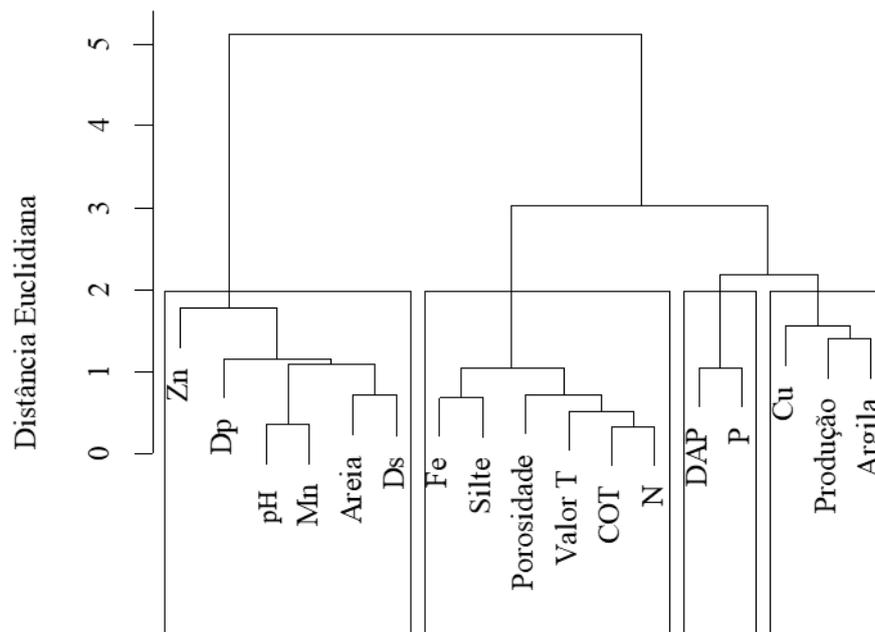
### 3.5.3 Análise de Cluster

A análise de Cluster no Cachoeira resultou na formação do dendrograma, classificando as 17 variáveis em cinco grupos distintos, no qual o eixo vertical representou a distância Euclidiana reescalada de 0 a 4 e no eixo horizontal os atributos da vegetação e do solo geraram os agrupamentos (Figura 10). Os grupos formados foram diferentes dos fatores gerados para esse castanhal na AF, com exceção das variáveis produção de frutos, DAP e areia que permaneceram no mesmo agrupamento (Tabela 6), consolidando a relação entre as variáveis da vegetação com a textura do solo.



**Figura 10.** Dendrograma da análise de Cluster realizada para os atributos da vegetação e do solo no Cachoeira.

No Filipinas, as 17 variáveis foram classificadas em quatro grupos distintos, no qual o eixo vertical representou a distância Euclidiana reescalada de 0 a 5 (Figura 11). O resultado do dendrograma desse castanhal foi parcialmente semelhante ao que foi exposto na análise fatorial (Tabela 7); no entanto, os micronutrientes Zn e Mn foram agrupados com os atributos pH, Ds, Dp e areia. Esse resultado demonstrou como a acidez elevada do solo favoreceu a disponibilidade de micronutrientes. Além disso, o segundo grupo formado por Fe, COT, N, Valor T, silte e porosidade demonstrou que os níveis de carbono orgânico total contribuem para a fertilidade do solo. A produção de frutos e o teor de argila ficaram agrupados com o Cu, formando o quarto grupo, resultado diferente do que foi encontrado na AF, visto que nessa análise a produção de frutos foi correlacionada somente com os teores de argila (Tabela 7).



**Figura 11.** Dendrograma da análise de Cluster realizada para os atributos da vegetação e do solo no Filipinas.

### 3.5.4 Redes Neurais Artificiais

Para o ajuste das RNAs, as melhores redes encontradas, assim como as estruturas das redes para a classificação da produção dos frutos são apresentadas na Tabela 8. Os atributos do solo que ficaram associados e agrupados com a produção de frutos na análise fatorial e Cluster foram ajustados por meio das RNAs, além da inclusão de todos os atributos do solo na análise. As melhores redes ajustadas foram aquelas em que foram verificados os menores números de nós (camadas ocultas), pois o aumento do número de camadas ocultas fez com que diminuísse a precisão do teste.

**Tabela 8.** Variáveis de entrada e estrutura da rede para o ajuste de RNA nos dois castanhais, Cachoeira e Filipinas.

Castanhais	Variável de Entrada	Estrutura da Rede	Amostras de Treinamento	Amostras de Validação	Total de Amostras
Cachoeira	DAP + Areia <sup>1</sup>	2→3→3→3	39	12	51
	pH + COT + N + P + Valor T + Fe + Zn + Mn + Cu + areia + silte + argila + Ds + Dp + porosidade	15→5→3→3			
Filipinas	Argila <sup>2</sup>	1→3→3→2	26	8	34
	Cobre + Argila <sup>3</sup>	2→3→3→2			
	pH + COT + N + P + Valor T + Fe + Zn + Mn + Cu + areia + silte + argila + Ds + Dp + porosidade	15→3→3→2			

<sup>1</sup>Resultado do Fator 3 da Análise Fatorial; <sup>2</sup>Resultado do Fator 4 da Análise Fatorial; <sup>3</sup>Resultado do quarto agrupamento da análise de Cluster.

No Cachoeira as duas análises multivariadas apresentaram o mesmo agrupamento (DAP e areia); portanto, a RNA foi ajustada apenas uma vez para essas variáveis (Tabela 9). De acordo com a matriz de confusão, 66,67 % das classes de produção de frutos foram classificadas corretamente por meio das variáveis DAP e areia no Cachoeira, na qual a classe de média produção de frutos apresentou uma porcentagem de acerto maior quando comparada com as outras classes (100,00 %). Em contrapartida, utilizando todos os atributos do solo, 50,00 % das classes de produção de frutos foram classificadas corretamente, em que a classe alta exibiu maior porcentagem de acerto (100,00 %).

**Tabela 9.** Matriz de confusão entre as classes de produção e a classificação por RNA no Cachoeira.

Classe de Produção	Classe de Produção pela RNA						
	DAP e Areia <sup>1</sup>				Percentual de acerto total	Nº total de amostras <sup>3</sup>	Nº total de acertos
	Baixa	Média	Alta	Total			
Baixa	<b>71,43 %</b>	14,29 %	14,29 %	100,00 %	<b>66,67 %</b>	12	8
Média	0,00 %	<b>100,00 %</b>	0,00 %	100,00 %			
Alta	0,00 %	50,00%	<b>50,00 %</b>	100,00 %			
Classe de Produção	Atributos do solo <sup>2</sup>						
	Baixa	Média	Alta	Total	Percentual de acerto total	Nº total de amostras <sup>3</sup>	Nº total de acertos
Baixa	<b>50,00 %</b>	40,00 %	10,00 %	100,00 %	<b>50,00 %</b>	12	6
Média	0,00 %	<b>0,00 %</b>	100,00 %	100,00 %			
Alta	0,00 %	0,00 %	<b>100,00 %</b>	100,00 %			

<sup>1</sup>DAP e Areia correspondem ao resultado encontrado no Fator 3 da Análise Fatorial para o Cachoeira; <sup>2</sup>pH, COT, N, P, Valor T, Fe, Zn, Mn, Cu, areia, silte, argila, Ds, Dp e porosidade; <sup>3</sup>Número total de amostras teste.

No ajuste da RNA no Filipinas foram utilizadas como camada de entrada os atributos do solo que estiveram correlacionados com a produção de frutos na análise fatorial e no agrupamento de Cluster, sendo utilizado todos os atributos do solo (Tabela 10). No entanto, a classe de alta produção de frutos não foi empregada, pois para esse castanhal não foram registradas castanheiras com esta classe de produção. A utilização da argila, cobre mais argila e todos os atributos do solo classificaram corretamente as classes de produção de frutos, com percentual de acerto total de 100,00 %, em que a classe média de produção de frutos foi 0,00 % de acerto, haja vista que nas amostras teste essa classe não foi sorteada.

**Tabela 10.** Matriz de confusão entre as classes de produção e a classificação por RNA no Filipinas.

Classe de Produção	Classe de Produção pela RNA					
	Argila <sup>1</sup>			Percentual de Acerto Total	Nº total de amostras <sup>4</sup>	Nº total de acertos
	Baixa	Média	Total			
Baixa	<b>100,00 %</b>	0,00 %	100,00 %	<b>100,00 %</b>	8	8
Média	0,00 %	<b>0,00 %</b>	0,00 %			

Classe de Produção	Cobre e Argila <sup>2</sup>					
	Baixa	Média	Total	Percentual de Acerto Total	Nº total de amostras <sup>4</sup>	Nº total de acertos
Baixa	<b>100,00 %</b>	0,00 %	100,00 %	<b>100,00 %</b>	8	8
Média	0,00 %	<b>0,00 %</b>	0,00 %			
Classe de Produção	Atributos do solo <sup>3</sup>					
	Baixa	Média	Total	Percentual de Acerto Total	Nº total de amostras <sup>4</sup>	Nº total de acertos
Baixa	<b>100,00 %</b>	0,00 %	100,00 %	<b>100,00 %</b>	8	8
Média	0,00 %	<b>0,00 %</b>	0,00 %			

<sup>1</sup>Argila corresponde ao resultado encontrado no Fator 4 da Análise Fatorial para o Filipinas; <sup>2</sup>Cobre e Argila referem-se ao resultado do quarto agrupamento encontrado na análise de Cluster para o Filipinas; <sup>3</sup>pH, COT, N, P, Valor T, Fe, Zn, Mn, Cu, areia, silte, argila, Ds, Dp e porosidade; <sup>4</sup>Número total de amostras teste.

### 3.6 DISCUSSÃO

Apesar da proximidade dos castanhais nativos e as características climáticas semelhantes, cada castanhal apresentou resultados distintos relacionados à produção de frutos (STAUDHAMMER et al., 2021). *B. excelsa* é uma espécie que possui grande variação na produção de frutos e sementes, podendo variar entre anos e entre árvores (KAINER et al., 2007; IVANOV, 2011). Bertwell et al. (2018) utilizando 14 anos de dados com os mesmos castanhais deste estudo, estimaram que as castanheiras do Filipinas podem demorar mais tempo para atingir a maturidade (167 anos) quando comparadas com as do Cachoeira (83 anos). Os autores expõem que ambos os castanhais não estão em declínio, mas que essas oscilações na produção de frutos ocorrem com o tempo. Além disso, de acordo com Zuidema e Boot (2002) e Kainer et al. (2007), a produção de frutos é altamente variável em árvores reprodutivamente maduras.

As propriedades do solo apresentaram baixos e moderados coeficientes de variação, com exceção de alguns micronutrientes que apresentaram altos coeficientes de variação. A variabilidade dos atributos do solo é um indicativo preliminar da heterogeneidade dos dados (AQUINO et al., 2014a). Em florestas nativas, isto é, em condições naturais, a variabilidade dos atributos químicos e físicos do solo pode estar relacionada ao material de origem do solo e as pedoformas (CAMBARDELLA et al., 1994). Na região amazônica, Aquino et al. (2014b) observaram uma variabilidade moderada a alta para as variáveis do solo. De acordo com Carvalho et al. (2003), normalmente, a variabilidade dos atributos do solo pode exibir valores de CV que variam de moderado a alto, pois são muitos os fatores ambientais que interferem na dinâmica do solo. Os resultados da estatística descritiva indicaram que os atributos do solo apresentaram variação, na qual essa heterogeneidade pode ter influenciado na variabilidade da produção das castanheiras (CAVALCANTE, 2017).

A relação positiva entre os atributos do solo do Cachoeira foi decorrente dos maiores teores de carbono orgânico total do solo, que indicam maior aporte de material vegetal, promovendo o aumento da capacidade de troca catiônica e porosidade do solo (MOREIRA et al., 2020; JARDIM et al., 2022). A densidade do solo foi correlacionada negativamente com a estrutura e textura; portanto, quanto maior a densidade, mais compactado é o solo; e menor a porosidade total, o que pode diminuir a absorção dos nutrientes (MEURER, 2007). Marcolin e Klein (2011) estimando a densidade do solo em plantio direto no estado do Rio Grande do Sul, verificaram que quanto menor o teor de matéria orgânica do solo (MOS), maior é a sua densidade de partículas. Isso ocorre, segundo os autores, porque a MOS possui menor massa específica quando comparada com os minerais do solo, por isso o seu teor pode afetar a densidade. Este fato pode ser uma justificativa para que a  $D_s$  tenha se correlacionado negativamente com as outras variáveis nos dois castanhais. O silte também correlacionou-se negativamente no mesmo eixo fatorial, e isto ocorreu, provavelmente, devido aos solos apresentarem textura arenosa, sendo observado desta forma maiores valores de  $D_s$  em comparação aos de textura argilosa. Em solos siltosos foram verificados valores de  $D_s$  intermediários (BUENO; VILAR, 1998; LIBARDI, 2005).

No Cachoeira foi observado que os valores médios de pH foram 4,39, o que indica um solo extremamente ácido (FREIRE et al., 2013), o que é natural para solos da região amazônica (LOCATELLI et al., 2017). Os elevados valores de acidez verificados nesse castanhal podem ter influenciado a correlação com os teores dos micronutrientes, sendo que para Zn e Mn foi observada relação positiva com o pH. Esse resultado pode ser explicado pois a diminuição de uma unidade no valor do pH aumenta em cerca de 100 vezes a disponibilidade de Zn e Mn no solo (TISDALE et al., 1985). A correlação negativa do Fe no mesmo fator, provavelmente, é devido à baixa influência do pH nos teores de Fe no solo

(MORO et al., 2013). Vale ressaltar que a espécie estudada apresenta bom desenvolvimento em solos ácidos, com baixa saturação por bases e valores de CTC (LOCATELLI et al., 2003).

Os solos extremamente ácidos do Filipinas elevaram a disponibilidade dos micronutrientes, como Zn e Mn; por outro lado, a acidez desses solos promoveu a diminuição da disponibilidade de COT, N e Valor T (SOUSA et al., 2007). De acordo com Sousa et al. (2007), a faixa ideal de pH para as culturas está entre 5,7 e 6,0, pois é nesta faixa que os macronutrientes estão mais disponíveis para a absorção. Outro micronutriente para o qual também verificou-se valores elevados foi o Fe. O Fe é um dos micronutrientes mais abundantes em solos brasileiros, variando entre 10 a 100 g kg<sup>-1</sup> (ABREU et al., 2007). De acordo com Ferreira (2009), a correção da acidez do solo pode ser benéfica na disponibilidade de micronutrientes, pois em altas concentrações podem causar toxidez às plantas. No Filipinas, o cobre ficou isolado na AF, provavelmente, porque esse elemento encontra-se com médias concentrações (LOPES, 1999; RIBEIRO et al., 1999). Em solos de textura arenosa esse micronutriente pode ser lixiviado (ABREU et al., 2007) e a elevada pluviosidade pode contribuir para este processo (MALAVOLTA, 1987).

Nos solos dos dois castanhais foram observados valores entre baixo e médio para os atributos químicos do solo (AMARAL; SOUZA, 1997; LOPES, 1999; RIBEIRO et al., 1999; COSTA et al., 2016). O fósforo apresentou-se em baixas concentrações nos dois castanhais (< 10 mg dm<sup>-3</sup>), enquanto foram verificados valores baixos de COT no Cachoeira (< 8 g kg<sup>-1</sup>) e valores médios no Filipinas (8 a 14 g kg<sup>-1</sup>). Para a capacidade de troca catiônica do solo (Valor T), foram observados níveis médios no Cachoeira (4,5 a 10 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e baixos no Filipinas (< 4,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) (AMARAL; SOUZA, 1997). Costa et al. (2016) analisaram os teores de carbono e nitrogênio total do solo em sistemas agroflorestais com seringueira, comparando com uma área de floresta nativa, no estado do Acre, encontraram valores próximos a 1,5 g kg<sup>-1</sup> de nitrogênio total na área de floresta nativa, no município de Epitaciolândia. Os micronutrientes apresentaram variações nas concentrações. Para Fe e Mn foram observados níveis elevados nos dois castanhais (> 45 mg dm<sup>-3</sup> e > 12 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente), para o Cu foram verificados valores médios (0,70 a 1,80 mg dm<sup>-3</sup>) e para o Zn valores médios no Cachoeira (0,9 a 2,2 mg dm<sup>-3</sup>) e baixos no Filipinas (< 0,9 mg dm<sup>-3</sup>) (LOPES, 1999; RIBEIRO et al., 1999).

As baixas concentrações de fósforo, provavelmente, podem estar contribuindo com o menor desenvolvimento em diâmetro das castanheiras, especialmente no Filipinas. De acordo com Malavolta (1996), o primeiro indício de deficiência de P é a diminuição do crescimento em diâmetro da planta. O fósforo possibilita o desenvolvimento do sistema radicular, melhora a eficiência da absorção de outros nutrientes, interfere na qualidade dos frutos e na formação das sementes (MALAVOLTA, 1996). Além disso, a deficiência desse macronutriente desacelera a maturidade e a redução da produção (IPNI, 1998). Desta forma, segundo Staudhammer et al. (2013), quando as castanheiras-da-amazônia atingem DAP e maturidade significativos, os recursos são distribuídos de forma igualitária para a produção de frutos e o desenvolvimento em diâmetro das árvores. No Cachoeira, a produção de frutos de *Bertholletia excelsa* esteve correlacionada com o DAP. Assim, como essa área produz mais frutos do que o Filipinas, esse resultado confirma que árvores mais produtivas possuem maior desenvolvimento. Outras pesquisas com essa espécie corroboram os resultados deste estudo, em que indicaram que a produção de frutos da castanheira-da-amazônia é altamente correlacionada com o DAP (WADT et al., 2005; KAINER et al., 2007; STAUDHAMMER et al., 2013). Kainer et al. (2007) indicaram que, árvores mais produtivas estão na faixa de DAP entre 100 a 150 cm.

A associação positiva entre produção de frutos, DAP e teores de areia no Cachoeira pode ser devido a área apresentar textura franca, o que favorece o desenvolvimento dos indivíduos. De acordo com Ivanov (2011), solos de textura franca são classificados como

ótimos para o desenvolvimento de plantas, pois auxiliam na retenção de umidade e nutrientes, ao contrário de solos com textura mais arenosa. O autor analisou a influência de variáveis dendrométricas, anatômicas e ambientais na produção de frutos e sementes de *B. excelsa* em áreas naturais no estado de Roraima, e verificou que indivíduos da espécie com maior potencial produtivo ocorreram em solos profundos de textura franca argilo-arenosa ou argilo-arenosa, quando comparado a solos de textura argilosa e rasos. Em contrapartida, nos solos do Filipinas foi observada textura franco-arenosa, com correlação positiva entre produção de frutos e os teores de argila. Provavelmente, nas regiões que apresentaram maiores teores de argila e menores teores de areia, também são observadas árvores produtivas; no entanto, não atingindo o seu maior potencial produtivo. Segundo Guerreiro et al. (2017), as espécies florestais não conseguem atingir a sua capacidade máxima de desenvolvimento em solos com textura arenosa, provavelmente devido à baixa retenção de cátions.

Os solos do Filipinas possuem predominantemente textura variando de média a franco-arenosa, possuindo forte tendência a erosão, além de ser observada presença de linhas de pedras (BARDALES et al., 2011). Solos de textura franco-arenosa podem apresentar menores teores de matéria orgânica e fósforo (CENTENO et al., 2017) e solos de textura arenosa podem apresentar menor retenção de água e adsorção de cátions quando comparado com solos de textura argilosa, além de possuírem alta densidade do solo, baixos teores de matéria orgânica e serem solos compactados (FREIRE et al., 2013). Bardales et al. (2011) analisaram as distribuições das classes de solos em nível semi-detalhado (1:50.000) no Filipinas, verificando que o elevado teor de silte indica o baixo grau de intemperização desses solos. Adicionalmente, segundo os autores, devido à presença das linhas de pedras (concreções lateríticas) a 54 cm de profundidade, faz com que a profundidade efetiva desse solo seja reduzida. Os autores verificaram a ocorrência de castanheiras com baixa produção de frutos; porém, com grande quantidade de indivíduos, o que corrobora com os resultados encontrados neste estudo.

O baixo percentual de acerto encontrado no Cachoeira utilizando os atributos do solo para classificar as classes de produção de frutos quando comparado com as variáveis DAP e areia demonstra que poucas variáveis do solo podem classificar a produção de frutos neste castanhal. Além disso, o percentual de acerto total encontrado para os atributos DAP e areia foram maiores, porque o DAP é altamente correlacionado com a produção de frutos. Comparando o presente estudo com outros trabalhos que utilizaram as RNAs (LEVINE et al., 1996; GAMBAROVA et al., 2008; LEAL et al., 2015), a porcentagem de acerto do presente estudo é considerada baixa, demonstrando que os atributos do solo não foram capazes de classificar precisamente a produção de frutos no Cachoeira. A classificação correta das classes de produção de frutos por meio dos atributos do solo (argila, Cu + argila e atributos do solo) no Filipinas, além de demonstrar que esses atributos foram capazes de classificar a produção, demonstrou que as variáveis do solo possuem teores diferentes entre as classes, podendo descrever a produção de frutos. Uma possível explicação para tal resultado é que por exibir apenas duas classes de produção e por apresentar baixa variabilidade na produção nessas classes, o ajuste das redes neurais artificiais foi favorável. Outra justificativa é que os atributos dos solos possuem valores distintos entre as classes, interferindo na produção de frutos no Filipinas.

A elevada acidez dos solos do estado do Acre é consequência das características mineralógicas (WADT, 2002) e também devido a absorção dos cátions disponíveis na solução do solo pelas espécies vegetais que estão presentes em vários estratos da floresta (COSTA et al., 2017). Além disso, é notório que alguns solos da região Amazônica, em virtude do material de origem, relevo e clima, apresentem baixos teores de P e capacidade de troca catiônica, escassez de micronutrientes e macronutrientes, alta densidade do solo e em algumas regiões pode ocorrer a elevação do lençol freático (VALE JÚNIOR et al., 2011). As classes

de solos que são observadas no Filipinas também contribuem para uma baixa produção de frutos de *B. excelsa*. Silva et al. (2021) avaliando a ocorrência de indivíduos e produção de frutos da castanheira-da-amazônia em diferentes classes de solos e ao espacializar os atributos químicos e físicos do solo nesse castanhal, verificaram baixa e média produção de frutos em Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico petroplúntico e Argissolo Vermelho Distrófico abrupto.

A espécie *Bertholletia excelsa* pode apresentar alta produção em solos ácidos e com menor fertilidade. No entanto, o cálcio é um macronutriente essencial para indivíduos dessa espécie (STAUDHAMMER et al., 2021). Para Rodrigues (1998) os solos da Amazônia apresentam um impeditivo maior de natureza química do que física. No entanto, Lima et al. (2004) concluíram que as variáveis areia, silte, água disponível, P, Zn, Na<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup> e Mg<sup>2+</sup> influenciaram o desenvolvimento da espécie. Práticas de manejo não modificam a textura do solo, pois são características intrínsecas; contudo, a fertilidade do solo pode ser alterada por meio de adubações. Estudos têm apontado que a adubação com material vegetal (galhos e folhas) é capaz de melhorar a fertilidade do solo, proporcionando maior desenvolvimento em altura e diâmetro das castanheiras-da-amazônia em plantio (FERREIRA et al., 2015). Porém, nos castanhais, após a coleta das sementes, há a deposição dos ouriços (frutos das castanheiras) no entorno das árvores e ocorre naturalmente o aporte de serrapilheira oriunda da floresta.

Na literatura há controvérsias da adubação recomendada com fertilizantes químicos para a espécie *B. excelsa*. Em sistemas agroflorestais no estado de Roraima, Arco-Verde et al. (2009) avaliando o crescimento e a produtividade de diferentes espécies arbóreas e de cultivos agrícolas em um Argissolo, verificaram que no sistema no qual não houve adubação, calagem e gradeamento do solo, ocorreu maior crescimento da espécie *B. excelsa*. Os autores observaram que a espécie mostrou-se mais adaptada em condições com baixa fertilidade natural. Entretanto, Lima e Azevedo (1996) analisaram o crescimento de diferentes espécies florestais, aos três anos de idade, submetidas a diferentes sistemas e tratamentos em um Latossolo Amarelo, e verificaram que a aplicação com 30 % de adubação de cobertura com nitrogênio, fósforo, potássio e magnésio, aumentou em 200 % o desenvolvimento de indivíduos de *B. excelsa*. Diante disso, para uma recomendação eficaz de adubação de cobertura, há a necessidade da realização de estudos em áreas naturais com diferentes níveis de adubações, com a finalidade de verificar se realmente as castanheiras-da-amazônia conseguem responder a fertilização química e identificar quais as dosagens adequadas.

### 3.5 CONCLUSÕES

A textura do solo influenciou a produção de frutos de *Bertholletia excelsa* nos dois castanhais.

De maneira geral, os solos com textura franca apresentaram maiores valores de produção quando comparado com solos de textura franca-arenosa.

No Filipinas, as variáveis químicas e físicas do solo foram capazes de classificar corretamente as classes de produção de frutos, demonstrando que existe diferença nos atributos do solo entre as classes de produção.

### 3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 645-736.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMARAL, E. F.; SOUZA, A. N. **Avaliação da fertilidade do solo no sudeste acreano: o caso do PED/MMA no município de Senador Guiomard**. Rio Branco: Embrapa-CPAF/AC, 1997.
- AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C., OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SILVA, D. M. P.; SILVA, D. A. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 4, p. 988-997, 2014a.
- AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A.; MANDOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 397-406, 2014b.
- ARCO-VERDE, M. F.; SILVA, I. C.; MOURÃO JÚNIOR, M. Aporte de nutrientes e produtividade de espécies arbóreas e de cultivos agrícolas em sistemas agroflorestais na Amazônia. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 11-22, 2009.
- BARDALES, N. G.; MOURA, D. C. S.; SILVA, L. M.; WADT, L. H. O. Levantamento semi-detalhado e classificação de solos no Seringal Filipinas, Epitaciolândia, Acre. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: SBCS, 2011. p. 1-4.
- BERTWELL, T. D.; KAINER, K. A.; CROPPER JUNIOR, W. P.; STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O. Are Brazil nut populations threatened by fruit harvest? **Biotropica**, v. 50, n. 1, p. 50-59, 2018.
- BEUCHER, A.; MØLLER, A. B.; GREVE, M. H. Artificial neural network and decision tree classification for predicting soil drainage classes in Denmark. **Geoderma**, v. 352, p. 351-359, 2019.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: Modeling with GIS**. Oxford: Pergamon, 1994.
- BRASIL. Portaria MMA nº 148, de 7 de junho de 2022. Altera os Anexos da Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014, da Portaria nº 444, de 17 de dezembro de 2014, e da Portaria nº 445, de 17 de dezembro de 2014, referentes à atualização da Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 108, p. 74, 08 jun. 2022.
- BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP/EESC, 1998.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.
- CAVALCANTE, E. A. **Caracterização física e química do solo sob dois castanhais nativos e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um solo sob floresta ombrófila densa**. 2017. 87p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de

Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2017.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O. D.; TIMM, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.

COSTA, F. S.; OLIVEIRA, T. K.; BARDALES, N. G.; COSTA, C. R. **Carbono e nitrogênio do solo submetido a sistemas agroflorestais com seringueira no estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2016.

COSTA, M. G.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. Atributos do solo relacionados com a produção da castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*). **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-10, 2017.

DUBOSE, P.; KLIMASAUSKAS, C. **Introduction to neural networks with examples and applications**. Pittsburgh: NeuralWare Inc., 1989.

FERREIRA, M. J. **Crescimento, estado nutricional e características fotossintéticas de *Bertholletia excelsa* sob tratamentos de adubação em área degradada na Amazônia Central**. 2009. 52f. Dissertação (Mestrando em Ciências de Florestas Tropicais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2009.

FERREIRA, M. J.; GONÇALVES, J. F. C.; FERRAZ, J. B. S.; CORRÊA, V. M. Características nutricionais de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* Bonpl. sob tratamento de fertilização em área degradada na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 863-872, 2015.

FERREIRA, R. R. M.; BARDALES, N. G.; SILVA, L. M.; MIQUELONI, D. P.; WADT, L. H. O. **Levantamento de Solos Semidetalhado sob Crescimento de Castanhal Nativo na Região Leste do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2017.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião Pública**, v. 16, n. 1, p. 160-185, 2010.

FREIRE, L. R.; CAMPOS, D. V. B.; ANJOS, L. H. C.; ZONTA, E.; PEREIRA, M. G.; BLOISE, R. M.; MOREIRA, G. N. C.; EIRA, P. A. Análise química de amostras de terra. In: FREIRE, L. R. et al. (coord.). **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: Embrapa; Seropédica: Universidade Rural, 2013. p. 87-106.

GAMBAROVA, E.; GAMBAROV, A.; ISMAYILOV, J. Applying neural networks in rare vegetation communities classification of remotely sensed images. **Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)**, v. 17, n. 2, p. 157-166, 2008.

GUERREIRO, Q. L. M. **Castanhal nativo da Floresta Nacional do Tapajós: atributos edáficos, produção de serapilheira e perfil socioeconômico dos extrativistas**. 2017. 116f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Banco de Dados de Informações Ambientais 2021**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e Silvicultura 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Estações e Dados**. Brasília: INMET, 2015.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE – IPNI. **International Soil Fertility Manual**. Tradução de Alfredo Scheid Lopes. Piracicaba: POTAFOS, 1998.

- IVANOV, G. B. **Influência de variáveis dendrométricas, anatômicas e ambientais na produção de frutos e sementes de *Bertholletia excelsa* H.B.K.** 2011. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Agrárias, Santa Maria, 2011.
- JARDIM, M. A. G.; CAMPOS, A. C. S.; COSTA NETO, S. V. Fatores edáficos como indicadores da regeneração em uma savana na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 2, p. 926-935, 2022.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.
- KAINER, K. A.; WADT, L. H. O.; STAUDHAMMER, C. L. Explaining variation in Brazil nut fruit production. **Forest Ecology and Management**, v. 250, p. 244-255, 2007.
- LEAL, A. J. F.; MIGUEL, E. P.; BAIO, F. H. R.; NEVES, D. C.; LEAL, U. A. S. Redes neurais artificiais na predição da produtividade de milho e definição de sítios de manejo diferenciado por meio de atributos do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 1, p. 436-444, 2015.
- LEVINE, E. R.; KIMES, D. S.; SIGILLITO, V. G. Classifying soil structure using neural networks. **Ecological Modelling**, v. 92, p. 101-108, 1996.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005.
- LIMA, R. M. B.; AZEVEDO, C. P. Desenvolvimento inicial de espécies florestais estabelecidas em consórcio com aplicações de fungos micorrízicos e adubação. In: GASPAROTO, L.; PREISINGER, H. **SHIFT-Projeto ENV-23: recuperação de áreas degradadas e abandonadas através de sistemas e policultivo**. Manaus: Embrapa, Universidade de Hamburg, 1996. p.157-170.
- LIMA, R. M. B.; HIGA, A. R.; SOUZA, C. R. **Influência dos fatores edáficos no crescimento da *Bertholletia excelsa* H.B.K. na Amazônia**. In: 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS. Curitiba: Embrapa, 2004. p. 319-321.
- LOCATELLI, M.; SILVA FILHO, E. P.; VIEIRA, A. H.; MARTINS, E. P.; PEQUENO, P. L. L. Castanha-do-brasil – opção para solo de baixa fertilidade na Amazônia. In: SEMINÁRIO NACIONAL DEGRADAÇÃO E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL, 1., 2003, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sobrade, 2003.
- LOCATELLI, M.; SILVA, L. M.; BATISTA, K. D. Avaliação edáfica e nutricional em espécies arbóreas. In: WADT, L. H. O.; SANTOS, L. M. H.; BENTES, M. P. M.; OLIVEIRA, V. B. V. (org.). **Produtos Florestais Não Madeireiros**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. p. 61-68.
- LOPES, A. S. **Micronutrientes: filosofia de aplicação e eficiência agrônoma**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 1999.
- MALAVOLTA, E. Fertilidade dos solos da Amazônia. In: VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. (eds.). **Amazônia: seus solos e outros recursos naturais**. São Paulo: Editora Agrônoma Ceres Ltda, 1987. p. 374-416.
- MALAVOLTA, E. **Nutri-Fatos: informação agrônoma sobre nutrientes para as culturas**. Piracicaba: POTAFOS, 1996.
- MANLY, B. F. J. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.
- MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 65-90.

MOLINE, E. F. V.; COUTINHO, E. L. M. Atributos químicos do solo da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 1, p. 14-20, 2015.

MOREIRA, S. F.; SANTOS, S. D. O.; PEREIRA JÚNIOR, A. Análise quantitativa e qualitativa de um solo irrigado degradado pela pecuária. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47698-47715, 2020.

MORI, S. A. The Brazil nut industry - past, present, and future. In: PLOTKIN, M.; FAMOLARE, L. (eds.). **Sustainable Harvest and Marketing of Rain Forest Products**, Washington, DC: Island Press, 1992. p. 241-251.

MORO, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; CANTARELLA, H.; NASCENTE, A. S.; MORO, A. L.; BROETTO, F. Acidez do solo afetando concentração de micronutrientes, atividade da enzima nitrato redutase e produtividade em plantas de arroz de terras altas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, suplemente 1, p. 3397-3410, 2013.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2021.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação In: CERRETA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais, 1999.

RODRIGUES, M. R. L. **Disponibilidade de micronutrientes em solos da Amazônia**. 1998. 156p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.

SALOMÃO, R. D. P. Estrutura e densidade de *Bertholletia excelsa* H. & B. ("Castanheira") nas regiões de Carajás e Marabá, estado do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Ciências Naturais**, v. 7, n. 1, p. 47-68, 1991.

SENA, M. M.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J.; TOKESHI, H.; POPPI, R. J. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. **Soil & Tillage Research**, v. 67, n. 2, p. 171-181, 2002.

SILVA, C. S.; SILVA, F. L. C.; PEREIRA, M. G. Análise multivariada e geoestatística no estudo da distribuição espacial de atributos do solo e da vegetação. In: OLIVEIRA, R. J. (ed.). **Silvicultura e Manejo Florestal: técnicas de utilização e conservação da natureza**, 2020. p. 1-15.

SILVA, C. S.; SILVA, L. M.; WADT, L. H. O.; MIQUELONI, D. P.; SILVA, K. E.; PEREIRA, M. G. Soil classes and properties explain the occurrence and fruit production of Brazil nut. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200188, 2021.

SOARES, F. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; RUSSI, J. L.; VIVAN, G. A. Redes neurais artificiais na estimativa da retenção de água do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 2, p. 293-300, 2014.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 205-274.

STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O.; KAINER, K. A. Tradeoffs in basal area growth and reproduction shift over the lifetime of a long-lived tropical species. **Oecologia**, v. 173, n. 1, p. 45-57, 2013.

- STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O.; KAINER, K. A.; CUNHA, T. A. Comparative models disentangle drivers of fruit production variability of an economically and ecologically important long-lived Amazonian tree. **Scientific Reports** v. 11, n. 2563, p. 1-12, 2021.
- TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa, 2017.
- TISDALE, S. I.; NELSON, W. I.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4. ed. New York: Macmillan, 1985.
- VALE JÚNIOR, J. F.; SOUZA, M. I. L.; NASCIMENTO, P. P. R. R.; CRUZ, D. L. S. Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. **Revista Agroambiente On-Line**, v. 5, n. 2, p. 158-165, 2011.
- WADT, L. H. O.; KAINER, K. A.; GOMES-CILVA, D. A. P. Population structure and nut yield of a *Bertholletia excelsa* stand in Southwestern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 211, p. 371-384, 2005.
- WADT, P. G. S. **Manejo de solos ácidos do estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2002.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. Cambridge: Academic press, 1980. p. 319-344.
- ZHAI, Y.; THOMASSON, A.; BOGGESS III, J. E.; SUI, R. Soil texture classification with artificial neural networks operating on remote sensing data. **Computes and Electronics in Agriculture**, v. 54, p. 53-68, 2006.
- ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DO ACRE – ZEE. **Recursos Naturais e Meio Ambiente**. Rio Branco: Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, 2000.
- ZUIDEMA, P. A.; BOOT, R. G. 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, n. 1, p. 1-31, 2002.

#### 4 CONCLUSÕES GERAIS

Embora a ocorrência de plantas e a produção de frutos da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*) tenham sido associadas às classes e as propriedades físicas e químicas do solo, a produção de frutos diferiu entre as áreas, o que foi associado às diferenças edáficas entre os castanhais. Em geral, as propriedades físicas do solo, como a textura, densidade do solo e densidade das partículas, foram fatores limitantes para que a castanheira-da-amazônia apresentasse alta produção de frutos e/ou maior ocorrência de árvores. De maneira geral, os solos com textura franca apresentaram maiores valores de produção, quando comparado com solos de textura franca-arenosa. O Castanhal Filipinas apresentou baixa produção de frutos e maior variabilidade espacial das propriedades do solo. Ainda neste castanhal, as variáveis químicas e físicas do solo foram capazes de classificar corretamente as classes de produção de frutos, demonstrando que existe diferença nos atributos do solo entre as classes de produção.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, G. P.; SILVA, J. C. G. L.; FREGA, J. R.; SANTANA, L. F.; VALERIUS, J. The use of Constant Market Share (CMS) model to assess Brazil nut market competitiveness. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, n. 8, p. 174-180, 2017.
- ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 3, p. 246-254, 2014.
- ALMEIDA, L. S. **Produtos florestais não madeireiros em área manejada: análise de uma comunidade na região de influência da BR 163, Santarém, estado do Pará**. 2010. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Belém, 2010.
- BAYMA, M. M. A.; MALAVAZI, F. W.; SÁ, C. P.; FONSECA, F. L.; ANDRADEI, E. P.; WADT, L. H. O. Aspectos da cadeia produtiva da castanha-do-brasil no estado do Acre, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Ciências Naturais, v. 9, n. 2, p. 417-426, 2014.
- BERTWELL, T. D.; KAINER, K. A.; CROPPER JUNIOR, W. P.; STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O. Are Brazil nut populations threatened by fruit harvest? **Biotropica**, v. 50, n. 1, p. 50-59, 2018.
- COSTA, M. G.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. Atributos do solo relacionados com a produção da castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-10, 2017.
- GOMES, R. P.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; CUNHA, J. M.; FRANCISCON, U.; SILVA, L. S.; OLIVEIRA, I. A.; BRITO, W. B. M. Spatial variability of aggregates and organic carbon under three different uses of Indian black earth in southern Amazonas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 33, p. 1513–1522, 2017.
- GUAN, F.; XIA, M.; TANG, X.; FAN, S. Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in Moso 15 bamboo forests in Yong'an City, China. **Catena**, [S.I.], v. 150, p. 161–172, 2017.
- GUERREIRO, Q. L. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; 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**, [S.I.], v. 12, n. 4, p. 237-250, 2017.
- HOMMA, A.K.O. Extrativismo vegetal ou plantio: qual a opção para a Amazônia? In: HOMMA A.K.O. ed. **Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia e domesticação**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 17-43.
- JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; HONGYU, K.; PERBONI, A.; MARQUES, P. A. A.; DIAS, C. T. S.; COELHO, R. D. Análise multivariada e geoestatística de variáveis físico-hídricas de diferentes solos. **Water Resources and Irrigation Management**, Cruz das Almas, v. 2, n. 3, p. 121-129, 2013.
- KAINER, K. A.; WADT, L. H. O.; GOMES-SILVA, D. A. P.; CAPANU, M. Liana loads and their association with *Bertholletia excelsa* fruit and nut production, diameter growth and crown attributes. **Journal of Tropical Ecology**, [S.I.], v. 22, p. 147–154, 2006.
- KAINER, K. A.; WADT, L. H. O.; STAUDHAMMER, C. L. Explaining variation in Brazil nut fruit production. **Forest Ecology and Management**, [S.I.], v. 250, p. 244-255, 2007.
- LIMA, A. F. L.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M.; SILVA, L. S.; OLIVEIRA, F. P.; MANTOVANELLI, B. C.; BRITO FILHO, E. G.; GOMES, R. P. Spatial variability and sampling density of chemical attributes in archaeological black earths under pasture in

Southern Amazonas, Brazil. **SOIL Discussion**, <https://doi.org/10.5194/soil-2019-26>, in review, 2019.

MENEGUETTI, N. F. S. P.; SOUZA, M. P.; SOUZA FILHO, T. A. Estruturas de governança na cadeia produtiva da castanha-da-amazônia. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 26-43, 2015.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; SOARES, M. D. R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 45, n. 1, p. 1-12, 2015.

SILVA, C. S.; MENDONÇA, B. A. F.; PEREIRA, M. G.; ARAÚJO, E. J. G.; CASTELLANI, D. C. Spatial dependency and correlation of properties of soil cultivated with oil palm, *Elaeis guineensis*, in agroforestry systems in the eastern Brazilian Amazon. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 4, p. 280-289, 2018.

ZUIDEMA, P. A. **Ecology and management of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*)**. Bolivia: Programa Manejo de Bosques de la Amazonia Boliviana (PROMAB), 2003.