



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

NELSON KEN NARUSAWA NAKAKOJI

**AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO SOBRE A INCIDÊNCIA DO
AMARELECIMENTO FATAL EM PALMA DE ÓLEO**

BELÉM - PA
2023

NELSON KEN NARUSAWA NAKAKOJI

**AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO SOBRE A INCIDÊNCIA DO
AMARELECIMENTO FATAL EM PALMA DE ÓLEO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de concentração: Agronomia

Linha de Pesquisa: Produção Vegetal em Sistemas Agrícolas

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias

Coorientador: Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha

**BELÉM - PA
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N163a Nakakoji, Nelson Ken Narusawa
Avaliação dos atributos do solo sobre a Incidência do Amarelecimento Fatal em Palma de óleo /
Nelson Ken Narusawa Nakakoji. - 2023.
86 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - , Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias

Coorientador: Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha.

1. *Elaeis guineensis* Jacq. . 2. BioAS. 3. Atividade Biológica do Solo. 4. Degradação da Raiz. 5. Dendê.
I. Farias, Paulo Roberto Silva, *orient.* II. Título

CDD 633.851

NELSON KEN NARUSAWA NAKAKOJI

**AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO SOBRE A INCIDÊNCIA DO
AMARELECIMENTO FATAL EM PALMA DE ÓLEO**

Dissertação apresentada à Coordenação do curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Data de Aprovação: 25/07/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias – Presidente
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Prof^a. Dra. Edna Santos de Souza – 1º Examinadora
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA

Dr. Ricardo Salles Tinôco – 2º Examinador
Gerente Agrícola Amacoco

Prof. Dr. Artur Vinicius Ferreira dos Santos – 3º Examinador
Universidade Federal do Pará – UFPA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa e companheira Ítala Narusawa, pela compreensão, paciência, amor e por dividir todos os momentos comigo, pela ajuda nas análises desse estudo e pelo alto nível das discussões oferecidas pelo nosso longo e incrível convívio.

Aos meus filhos, Melissa e Fernando, somente pelo fato de existirem, meu incentivo perene em continuar com alegria na construção de um mundo melhor e mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Dharma e a devoção ao Bodhisattva Avalokiteshvara, pelas práticas meritórias, pela manutenção da alegria e do equilíbrio no Samsara.

Aos meus avós e minha mãe, Itsuji Narusawa, Mitsue Narusawa e Taeko Narusawa, pela formação educacional e moral.

Agradeço à minha companheira Ítala Narusawa, por seu constante companheirismo, apoio e por ser a pessoa com quem tenho compartilhado inúmeros aprendizados ao longo dos anos de nosso casamento. Sua compreensão e apoio intelectual foram inestimáveis para a concretização desta jornada.

À Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (PGAgro) pela educação gratuita e de qualidade, pela infraestrutura e pelos vínculos criados com os professores, servidores e colegas através desta instituição.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo fornecimento da bolsa de estudo no período do mestrado.

À Agroindustrial Palmasa S/A, por disponibilizar a área de estudo, o inventário fitossanitário, pela concessão de mão de obra quando foi necessária, pelas análises de solo e pela parceria na realização desta dissertação.

À servidora Neila Silva Nazaré Sardinha da PGAgro, pela paciência e pela dedicação ao trabalho em sempre orientar da melhor forma possível os tramites burocráticos da instituição.

Ao setor de transporte da UFRA, pelo transporte de equipamentos e pela locomoção, quando foi necessário.

Agradeço ao meu coorientador, o professor Dr. Norberto Cornejo Noronha, por sempre dispor de tempo, pelo repasse de conhecimento e por todos os *feedbacks* que esta dissertação exigiu.

Ao meu orientador, o professor Dr. Paulo Roberto Silva Farias, por acreditar no meu potencial, por me acolher como seu orientado, pelas instruções em geoestatística e pela jornada enriquecedora e produtiva que foi este mestrado.

À toda minha família, que me deu amor, incentivos, propuseram tempo, dedicação e recursos financeiros para que pudesse frequentar a pós-graduação e concluir esta jornada. A minha imensurável GRATIDÃO a todos.

“A terra não é um ‘recurso’, mas um organismo vivo que possui necessidades.”
- Ana Maria Primavesi.

AValiação DOS Atributos DO SOLO SOBRE A INCIDÊNCIA DO AMARELECIMENTO FATAL EM PALMA DE ÓLEO

RESUMO

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma cultura de extrema importância para o Pará, sendo o principal Estado produtor de palma de óleo no Brasil. No entanto, os produtores enfrentam um desafio significativo devido à incidência de uma doença conhecida como Amarelecimento Fatal (AF) da palma de óleo, cuja etiologia ainda é desconhecida. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar os atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo sobre a incidência do Amarelecimento Fatal da palma de óleo. O estudo foi realizado em uma área de cultivo de 12,77 hectares pertencente à agroindústria Palmasa S/A, localizada no município de Igarapé-açu. Foram coletadas amostras de solo em 100 pontos, distribuídos em uma grade regular de 40 m x 40 m. As amostras foram submetidas à análise BioAs da EMBRAPA para avaliar os atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo. Em seguida, foi realizada a interpolação por krigagem ordinária dos atributos da BioAs e da incidência do AF para a obtenção de mapas de predição. Os resultados sugerem que áreas com maior incidência de AF apresentaram maior teor de argila, magnésio (Mg) e potássio (K), além de maior atividade biológica do solo, representada pelos índices IQS Biológico, F1 - Ciclar nutrientes, β -glicosidase e Arilsulfatase. Essas áreas também se caracterizaram por cotas altimétricas mais baixas e menor teor de fósforo (P) disponível.

Palavras-chave: *Elaeis guineensis* Jacq.; BioAS; Atividade Biológica do Solo; Degradação da Raiz.

EVALUATION OF SOIL ATTRIBUTES ON THE INCIDENCE OF FATAL YELLOWING IN OIL PALM

ABSTRACT

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is an extremely important crop for Pará, the main oil palm producing state in Brazil. However, producers face a significant challenge due to the incidence of a disease known as Fatal Yellowing (FA) of the oil palm, the etiology of which is still unknown. The aim of this study was to evaluate the biological, chemical and granulometric attributes of the soil in relation to the incidence of Fatal Yellowing of the oil palm. The study was carried out in a 31.55-acre cultivation area belonging to the Palmasa S/A agro-industry, located in the municipality of Igarapé-açu. Soil samples were collected at 100 points, distributed on a regular 40 m x 40 m grid. The samples were submitted to EMBRAPA's BioAs analysis to assess the soil's biological, chemical and granulometric attributes. The BioAs attributes and FA incidence were then interpolated using ordinary kriging to obtain prediction maps. The results suggest that areas with a higher incidence of FA had a higher clay, magnesium (Mg) and potassium (K) content, as well as higher soil biological activity, represented by the indices Biological SQI, F1 - Nutrient cycling, β -glucosidase and Arylsulphatase. These areas were also characterised by lower elevations and lower available phosphorus (P) content.

Keywords: *Elaeis guineensis* Jacq.; BioAS; Soil Biological Activity; Root Degradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Modelo esquemático do semivariograma experimental.....	29
Figura 02 – Esquema dos modelos de semivariograma mais usuais na geoestatística.	30
Figura 03 – Mapa da Área de Estudo.	33
Figura 04 – Grade Amostral de Coleta do Experimento.	36
Figura 05 – Grade Amostral de Coleta do Experimento.	37
Figura 06 – Grade Amostral de Coleta da Altimetria.....	38
Figura 07 – Representação esquemática do modelo utilizado para o cálculo do IQS Fertibio, IQS Biológico, IQS Químico, F1 – Ciclar nutrientes, F2 – Armazenar nutrientes e F3 – Suprir nutrientes.	40
Figura 08 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) Arilsulfatase; B) β -glicosidase; C) IQs Fertibio; D) IQs Biológico.	48
Figura 09 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) IQs Químico; B) F1 – Ciclar Nutrientes; C) F2 – Armazenar Nutrientes; D) F3 – Suprir Nutrientes.	49
Figura 10 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) Argila (%); B) Matéria Orgânica; C) pH (H ₂ O); D) Fósforo (P).	50
Figura 11 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) Potássio (K); B) Cálcio (Ca); C) Magnésio (Mg); D) Alumínio (Al).	51
Figura 12 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) CTC; B) V (%); C) m (%).	52
Figura 13 – Mapas de Predição da Incidência do AF e atributos da BioAs – A) Mapa de predição da incidência do Amarelecimento Fatal (AF); B) Arilsulfatase.	59
Figura 14 – Mapas de predição dos atributos da BioAs – A) β -glicosidase; B) IQs Fertibio; C) IQs Biológico; D) IQs Químico; E) F1 – Ciclar Nutrientes; F) F2 – Armazenar Nutrientes...60	
Figura 15 – Mapas de predição dos atributos da BioAs – A) F3 – Suprir Nutrientes; B) Argila (%); C) Matéria Orgânica; D) pH (H ₂ O); E) Fósforo (P); F) Potássio (K).	61
Figura 16 – Mapas de predição dos atributos da BioAs – A) Cálcio (Ca); B) Magnésio (Mg); C) Alumínio (Al); D) CTC; E) V (%); F) m (%).	62
Figura 17 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) Teor de Arilsulfatase; B) Teor de β -glicosidase; C) IQs Fertibio; D) IQs Biológico.	64
Figura 18 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) IQs Químico; B) F1 – Função Ciclar Nutrientes; C) F2 – Função Armazenar Nutrientes; D) F3 –	

Função Suprir Nutrientes.....	65
Figura 19 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) Teor de Argila (%); B) Teor de Matéria Orgânica (%); C) Teor de pH ; D) Teor de P (mg/dm ³).	66
Figura 20 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) Teor de K (cmolc/dm ³ .); B) Teor de Ca (cmol _c / dm ³ .); C) Teor de Mg (cmol _c / dm ³); D) Teor de Al (cmol _c / dm ³).	67
Figura 21 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) Teor de CTC Ph7 (cmol _c / dm ³); B) Teor de v (%); C) Teor de m (%) ; D) Altitude (m).	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Estatística descritiva dos atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo em profundidade de 0 – 0,1 m.	53
Tabela 02 – Matriz de Correlação dos atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo em profundidade de 0 – 0,1 m.	15
Tabela 03 – Parâmetros geoestatísticos dos atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo e de Incidência de AF em uma área de plantação de Palma de Óleo de 9 anos no município de Igarapé-açu, no Nordeste Paraense.....	57

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Equação do Semivariograma Experimental.....	41
(2) Equação do Modelo Esférico	42
(3) Equação do Modelo Exponencial	42
(4) Equação do Modelo Gaussiano.....	42
(5) Equação do Coeficiente de Determinação do Modelo Semivariográfico Testado (R^2).....	42
(6) Equação da Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático do Modelo Semivariográfico Testado (RMSE).....	43
(7) Equação do Índice de Dependência Espacial (IDE)	43
(8) Equação do Coeficiente de Determinação da Validação Cruzada (R^2_{VC})	43
(9) Equação da Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático da Validação Cruzada (RMSE _{VC}).....	44
(10) Equação da Interpolação da Krigagem Ordinária.....	44
(11) Equação da Interpolação Função de Base Radial (Spline)	45
(12) Equação do Coeficiente de Determinação da Interpolação Função de Base Radial Spline (R^2_{spline})	45
(13) Equação da Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático da Interpolação Função de Base Radial Spline (RMSE _{spline}).....	45
(14) Expressão Matemática do Teste de Mann-Whitney	46
(15) Expressão Matemática da aproximação da normal z do Teste de Mann-Whitney..	46

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	<i>Geral</i>	<i>18</i>
1.1.2	<i>Específicos</i>	<i>18</i>
	REFERÊNCIAS	19
1.2	REVISÃO DE LITERATURA	22
1.2.1	<i>A Palma de Óleo</i>	<i>22</i>
1.2.2	<i>Amarelecimento Fatal da Palma de Óleo (AF)</i>	<i>23</i>
1.2.3	<i>Nova Bioanálise de Solo da Embrapa (BioAS).....</i>	<i>25</i>
1.2.4	<i>Modelo Digital de Terreno (MDT)</i>	<i>26</i>
1.2.5	<i>Geoestatística.....</i>	<i>28</i>
2	AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO SOBRE A INCIDÊNCIA DO AMARELECIMENTO FATAL EM PALMA DE ÓLEO	31
2.1	INTRODUÇÃO	31
2.2	MATERIAIS E MÉTODOS	33
2.2.1	<i>Caracterização da Área de Estudo</i>	<i>33</i>
2.2.1.1	<i>Localização</i>	<i>33</i>
2.2.1.2	<i>Descrição do Plantio</i>	<i>34</i>
2.2.2	<i>Levantamento dos Dados</i>	<i>35</i>
2.2.2.1	<i>Levantamento dos Dados do Amarelecimento Fatal (AF) da Palma de Óleo</i>	<i>35</i>
2.2.2.2	<i>Levantamento dos Dados da Bioanálise (BioAS).....</i>	<i>36</i>
2.2.2.3	<i>Levantamento dos Dados Altimétricos</i>	<i>38</i>
2.2.3	<i>Procedimentos da Bioanálise (BioAS).....</i>	<i>39</i>
2.2.3.1	<i>Análise de Fertilidade do Solo</i>	<i>39</i>
2.2.3.2	<i>Análise Granulométrica do Solo</i>	<i>39</i>
2.2.3.3	<i>Análise da Atividade Enzimática do Solo.....</i>	<i>39</i>
2.2.3.4	<i>Geração da Bioanálise (BioAS)</i>	<i>40</i>
2.2.4	<i>Análise Exploratória dos Dados</i>	<i>41</i>
2.2.5	<i>Confecção do Mapa de Predição dos Atributos da BioAS e do Amarelecimento Fatal (AF) da Palma de Óleo</i>	<i>41</i>
2.2.6	<i>Confecção do Modelo Digital do Terreno (MDT).....</i>	<i>44</i>
2.2.7	<i>Extração dos Dados e Análise Comparativo Entre Grupos</i>	<i>45</i>

2.2.8	<i>Softwares Utilizados</i>	46
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
2.3.1	<i>ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS</i>	47
2.3.1.1	Teste de Normalidades	47
2.3.1.2	Estatística Descritiva	53
2.3.2	<i>Análise de Correlação</i>	55
2.3.3	<i>Geoestatística</i>	57
2.3.4	<i>Análise Viso-Espacial entre os Mapas de Predição da BioAs, MDT e a Incidência do AF</i>	58
2.3.5	<i>Atributos da BioAs e MDT vs Incidência do Amarelecimento Fatal (AF) da Palma de Óleo</i>	63
2.4	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE	83

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é reconhecida como uma das palmeiras oleaginosas mais produtivas e lucrativas no que diz respeito à produção de óleo vegetal, altamente utilizado em processados alimentícios e não alimentícios (QAIM *et al.*, 2020), sendo amplamente difundido em regiões tropicais (TAN *et al.*, 2022). Nas últimas décadas, houve uma expansão significativa no setor de palma de óleo, com um aumento expressivo da área plantada, principalmente nos países do sudeste asiático, como Indonésia e Malásia (LUKE *et al.*, 2020; SAID *et al.*, 2021). Esses dois países respondem quase 85% do óleo de palma exportado globalmente (FAO, 2022).

Representando o continente americano, a Colômbia se destaca como o quarto maior produtor mundial de óleo de palma, ficando atrás apenas da Indonésia, Malásia e Tailândia (FERNANDES *et al.*, 2022). Em relação ao Brasil, o país ocupa a nona posição global, correspondendo a 0,72% da produção mundial (BENEZOLI *et al.*, 2021). Conforme a Associação Brasileira de Produtores de Palma de Óleo (ABRAPALMA, 2018), o Brasil passou por um ciclo de expansão na cultura da palma de óleo. A área cultivada, que era de pouco mais de 103 mil hectares em 2009, foi ampliada para 226 mil hectares em 2016.

Nesse cenário, o Estado do Pará se destaca como responsável por 98,47% de toda a produção nacional de cacho do fruto fresco (CFF), seguido pela Bahia (1,47%) e Roraima (0,05%) (IBGE, 2020). Entre os municípios paraenses, os principais produtores são Tailândia (37,03%), Tomé-Açu (21,10%), Concórdia do Pará (10,85%), Acará (8,26%), Bonito (6,30%), Moju (5,55%), Igarapé-Açu (2,48%), Santo Antônio do Tauá (1,82%), Abaetetuba (0,98%) e São Domingos do Capim (0,94%) (IBGE, 2020).

No entanto, a cultura da palma de óleo nos municípios paraenses enfrenta um desafio significativo com a incidência de uma doença conhecida como Amarelecimento Fatal (AF) da palma de óleo. A etiologia dessa enfermidade ainda é desconhecida e tem se tornado uma preocupação crescente entre os produtores. O AF se manifesta por meio de sintomas visíveis nas folhas, começando com um amarelecimento pálido nos folíolos basais das folhas intermediárias (3, 4, 5 e 6), seguido pela necrose nas extremidades dos folíolos e, eventualmente, a seca total dessas folhas. Nas fases mais avançadas, o AF resulta na necrose da folha flecha, na murcha generalizada das folhas e, por fim, na morte da planta, que se apresenta totalmente seca, sem qualquer fluxo de seiva (BOARI, 2008).

Essa anomalia também é relatada em outros países latino-americanos, como Colômbia,

Equador, Suriname, Costa Rica, Nicarágua e Panamá (TORRES *et al.*, 2016). A presença dessa enfermidade em diferentes países da América Latina reforça a compreensão de que essa anomalia não está limitada apenas ao local em análise, mas possui uma abrangência regional. Vale ressaltar que o primeiro registro dessa doença no Estado do Pará ocorreu em 1974, nos plantios de palma de óleo da empresa DENPASA (Dendê do Pará S/A). Desde então, a doença se alastrou rapidamente, atingindo 125 plantas com AF em 1981, 465 plantas em 1984 e 2.205 plantas em 1985 (GOMES JUNIOR *et al.*, 2010). Em 2000, mais de 3.000 hectares já estavam comprometidos pela doença em todo o Estado, e entre 1974 e 2006, cerca de 5.300 hectares foram devastados por essa enfermidade (GOMES JUNIOR *et al.*, 2010).

Em relação a fatores bióticos, na tentativa de descobrir um Agente Etiológico, vários estudos foram realizados ao longo dos anos, como causas entomológicas (CELESTINO FILHO *et al.*, 1993), fitoplasma (VAN SLOBBE, 1991), fungos e bactérias (VAN SLOBBE, 1988; SILVA, 1989), vírus e viroides (SINGH *et al.*, 1988; RIESNER e BEUTHER, 1989; RIBEIRO, 1990; KITAJIMA, 1991; BEUTHER *et al.*, 1992; TRINDADE *et al.*, 2005) e nematoides (SILVA, 1989; FERRAZ, 2001), sendo todas ausentes ou inconclusivas de relações causais com a incidência do AF.

Estudos abordando os fatores abióticos têm revelado uma maior associação com a incidência do Amarelecimento Fatal (AF). Análises geoestatísticas baseadas em dados fornecidos pela DENPASA têm demonstrado que não existe um padrão espacial definido para um agente biológico específico, tanto no surgimento quanto no crescimento dos focos de AF (BERGAMIN FILHO *et al.*, 1998; LARANJEIRA *et al.*, 1998). Além disso, uma avaliação que relacionou a topografia do terreno com a incidência do AF revelou uma maior prevalência da doença em áreas de menor altitude e em proximidade com corpos d'água, sugerindo uma possível influência da água no desenvolvimento do AF (SANTOS, 2018).

Dessa forma, disfunções metabólicas identificadas em plantas afetadas pelo Amarelecimento Fatal (AF) têm se mostrado relevantes nesse debate. Estudos sugerem que a tiramina, um metabólico utilizado pelas plantas em resposta ao ataque de insetos, herbívoros e salinidade (LEFÈVRE *et al.*, 2001; GUILLET e DE LUCA, 2005; SERVILLO *et al.*, 2017), e a glicerofosforilcolina (GPC), um regulador interno dos lipídios celulares e outras vias metabólicas, como o metabolismo do glicerol, são deficientes em plantas afetadas pelo AF (RODRIGUES – NETO *et al.*, 2018), sugerindo um acometimento maior de AF em regiões mais úmidas, onde a atividade biológica do solo possa ser mais proeminente.

Diante desse contexto, a implementação de novas abordagens analíticas, como a Bioanálise de Solo da Embrapa (BioAS), que incorpora o componente biológico às análises

rotineiras de fertilidade do solo, mostra-se como uma proposta viável para investigar a incidência do AF. Essa análise permite avaliar o nível de degradação do solo ao quantificar a atividade de enzimas como a Arilsulfatase e a β – Glicosidade, que estão relacionadas aos componentes químicos e físicos do solo. A combinação dessas informações, resulta em índices de qualidade do solo (IQs) e funções (F), proporcionando uma avaliação abrangente e integrada das condições do solo (MENDES *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a utilização de métodos de interpolação, como a krigagem ordinária e a função de base radial (Spline), em conjunto com informações de topografia do terreno, desempenha um papel fundamental na investigação dos atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo em relação à incidência do Amarelecimento Fatal (AF). Essas técnicas permitem estimar os atributos em locais não amostrados, permitindo a elaboração de mapas detalhados mesmo com um número limitado de amostras (YAMAMOTO, 2020). Essa abordagem amplia as possibilidades de análise dos atributos do solo que podem estar relacionados aos índices de AF, proporcionando uma compreensão mais abrangente e explícita dos fatores que influenciam a ocorrência da doença.

Dessa forma, considerando a importância econômica da cultura da palma de óleo no Estado do Pará, bem como o crescente impacto do Amarelecimento Fatal (AF) na palmicultura local, e considerando as potenciais causas abióticas relacionadas ao solo que podem contribuir para a ocorrência do AF, esta pesquisa adotou a hipótese de que a análise da dependência espacial entre os atributos da Bioanálise de Solo (BioAS), por meio de métodos de interpolação e elaboração de mapas de variabilidade espacial, poderá fornecer uma visão mais abrangente e holística do papel das condições do solo na incidência do AF. Essa abordagem busca integrar tanto a análise visual das distribuições espaciais como a análise estatística dos dados, permitindo uma compreensão mais aprofundada e completa do fenômeno.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Avaliar atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo em relação à incidência do Amarelecimento Fatal (AF) da palma de óleo (dendezeiro - *Elaeis guineensis* Jacq.).

1.1.2 Específicos

- Gerar mapas que representem a variabilidade dos atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo;
- Gerar um mapa que represente a variabilidade dos atributos altimétricos do terreno;
- Produzir um mapa que represente a incidência do Amarelecimento Fatal da palma de óleo;
- Estabelecer relações entre as variáveis do solo, as características altimétricas do terreno e a incidência do AF, a fim de compreender as interações entre esses fatores.

REFERÊNCIAS

- ABRAPALMA. **Associação Brasileira de Produtores de Palma de Óleo**. 2018. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/pt/a-palma-no-brasil-e-no-mundo/>. Acesso em: 20 dez. 2022.
- BENEZOLI, V. H. *et al.* Modeling Oil Palm crop for Brazilian climate conditions. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103-130, 2021.
- BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L.; LARANJEIRA, F. F.; BERGER, R. D.; HAU, B. Análise temporal do amarelecimento fatal do dendezeiro como ferramenta para elucidar sua etiologia. **Fitopatologia Brasileira**, v. 23, n. 3, p. 391-396. 1998.
- BEUTHER, E.; WIESE, U.; LUKAS, N.; VAN SLOBBE, W. G.; RIESNER, D. Fatal yellowing of oil palms: search for viroids and doubled-stranded RNA. **Journal of Phytopathology**, v. 136, n. 4, p. 296-311. 1992.
- BOARI, A. J. **Estudos realizados sobre o amarelecimento fatal dendezeiro (*Elaeis guinensis* Jacq.) no Brasil**. Documentos 348, ISSN 1517-2201, Nov. de 2008.
- CELESTINO FILHO, P.; LOUISE, C.; LUCCHINI, F. Estudos de transmissão do amarelecimento fatal do dendezeiro (*Elaeis guineenses* Jacq) com insetos suspeitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO FATAL DO DENDEZEIRO, 14., 1993, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba, SP: [s.n.], p. 194. 1993.
- FAO, Base de Dados Estatísticos FAOSTAT (2022). Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 25 jul. 2023.
- FERNANDES, J. A. F. *et al.* Contexto socioambiental del cultivo extensivo de palma en Colômbia. **Mercator (Fortaleza)**, v. 21, 2022.
- FERRAZ, L. C. C. B. Relatório final: apoio técnico na especialidade de nematologia de plantas. In: DENPASA. **Pesquisa sobre amarelecimento fatal**. Belém, PA: DENPASA, 2001.
- GOMES JUNIOR, R. A. *et al.* **Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2010.
- GUILLET, G.; DE LUCA, V. Wound-inducible biosynthesis of phytoalexin hydroxycinnamic acid amides of tyramine in tryptophan and tyrosine decarboxylase transgenic tobacco lines. **Plant physiology**, v. 137, n. 2, p. 692-699, 2005.
- IBGE. **Igarapé-Açú**. IBGE/ Cidades/ Panorama, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/igarape-acu/panorama> . Acesso em: 15 dez. 2022.
- KITAJIMA, E. W. **Report to UEPAE de Belém about E. M. observations on tissues of healthy and by AF affected palms from Denpasa**. Brasília, DF: UNB, 2 p. Não publicado. 1991.
- LARANJEIRA, F. F.; BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM L.; BERGER, R. D.; HAU, B.

- Análise espacial do amarelecimento fatal do dendezeiro como ferramenta para elucidar sua etiologia. **Fitopatologia Brasileira**, v. 23, n. 3, p. 397- 403, 1998.
- LEFÈVRE, A.; GRATIA, I.; LUTTS, S. Discriminação entre os componentes iônico e osmótico do estresse salino em relação ao nível de poliamina livre em arroz (*Oryza sativa*). **Fitotecnia**, v. 161, n. 5, p. 943-952, 2001.
- LUKE, S. H. *et al.* Managing Oil Palm plantations more sustainably: large-scale experiments within the Biodiversity and Ecosystem Function in Tropical Agriculture (BEFTA) Programme. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, p. 75, 2020.
- MENDES, I. de C. *et al.* Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. **Embrapa Cerrados-Documents (INFOTECA-E)**, 2021.
- QAIM, M. *et al.* **Environmental, economic, and social consequences of the oil palm boom**. 2020.
- RIBEIRO, S. G. **Relatório das análises de eletroforese em gel, realizados no CENARGEN**. Brasília, DF: [s.n.], 17 p., 1990.
- RIESNER, D.; BEUTHER, E. **Investigations of diseased and symptomless oil palms from Denpasa oil palm estate: search for viroids and for doublestranded RNA**. Report to Denpasa. Dusseldorf, Germany: Herinch Heine Univversität Dusseldorf, 22 p. 1989.
- RODRIGUES – NETO *et al.* Metabolic fingerprinting analysis of oil palm reveals a set of differentially expressed metabolites in fatal yellowing symptomatic and non-symptomatic plants. **Metabolomics**, v. 14, p. 1-16, 2018.
- SAID, F. F. *et al.* A probe into the status of the oil palm sector in the malaysian value chain. **Economies**, v. 9, n. 3, p. 106, 2021.
- SANTOS, A. V. F. **Estudo geoestatístico e altimétrico do amarelecimento fatal em plantio orgânico de palma de óleo na Amazônia Oriental**. Tese de Mestrado. UFRA/Campus Belém, 2018.
- SERVILLO, L. *et al.* Vias da tiramina na defesa de plantas cítricas: glicoconjugados de tiramina e seus derivados N-metilados. **Revista de química agrícola e alimentar**, v. 65, n. 4, p. 892-899, 2017.
- SILVA, H. M. **Relatório de avaliação dos trabalhos com amarelecimento fatal**. Belém, PA: [s. n.], 5 p. 1989.
- SINGH, R. P.; AVILA, A. C.; DUSI, A. N.; BOUCHER, A.; TRINDADE, D. R.; VAN SLOBBE, W. G.; RIBEIRO, S. G.; FONSECA, M. E. R. Association of viroid like nucleic acids with the fatal yellowing disease of oil palm. **Fitopatologia Brasileira**, v. 13, n. 4, p. 392-394, 1988.
- TAN, X. J. *et al.* Expert systems in Oil Palm precision agriculture: A decade systematic review. **Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences**, 2022.

- TORRES, G. A. *et al.* Bud Rot Caused by *Phytophthora palmivora*: A Destructive Emerging Disease of Oil Palm. **Phytopathology**, v. 106, n. 4, p. 320-329, apr., 2016.
- TRINDADE, D. R.; POLTRONIERI, L. S.; FURLAN JÚNIOR, J. Abordagem sobre o estado atual das pesquisas para a identificação do agente causal do amarelecimento fatal do dendezeiro. In: POLTRONIERI, L. S.; TRINDADE, D. R.; SANTOS, I. P. (ed.). **Pragas e doenças de cultivos amazônicos**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, p. 439-450. 2005.
- VAN SLOBBE, W. G. Amarelecimento fatal na plantação de dendê na DENPASA - Brasil. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE A SÍNDROME DA GUIA PODRE NO DENDEZEIRO, 1988, Paramaribo. **Anais...** Paramaribo, [s. n., 1988].
- VAN SLOBBE, W. G. **Amarelecimento fatal**: final report. Belém, PA: DENPASA, 100 p. 1991.
- YAMAMOTO, J. K. **Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais**. 1.ed., São Paulo: Gráfica Paulos, p.308, 2020.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 A Palma de Óleo

A Palma-de-óleo, também conhecida como dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.), é uma planta classificada como uma monocotiledônea e pertencente à família Arecaceae, subfamília Arecoideae (CHIA *et al.*, 2009). Originária da África, essa palmeira foi introduzida nas regiões tropicais do continente americano a partir do século XV. No Brasil, ela chegou no século XVI e se adaptou especialmente à região litorânea do sul da Bahia (SUFRAMA, 2003).

No Brasil, a partir dessa oleaginosa, é obtido o óleo de palma, também conhecido como azeite de dendê, enquanto é globalmente chamado de *Palm Oil*. Os óleos extraídos da amêndoa e do mesocarpo apresentam composições de ácidos graxos distintas, o que resulta em diferentes usos industriais, tanto na indústria alimentícia quanto em produtos não alimentícios. É importante destacar que o óleo extraído da amêndoa é considerado mais refinado e possui um valor de mercado mais elevado (MURPHY, 2003).

A palma de óleo, ao ser cultivada, inicia sua produção a partir do terceiro ano após o plantio, atingindo sua máxima produtividade entre os 7 e 12 anos. Os frutos dessa cultura apresentam uma proporção de óleo de aproximadamente 55 a 58% (BARCELOS *et al.*, 1995; LIMA *et al.*, 2002). Devido a essas características, a palma de óleo é considerada uma cultura agronomicamente perene, com capacidade de produzir continuamente ao longo do ano, sem problemas de sazonalidade. Sua expectativa de vida útil é de cerca de 25 anos, com uma média de rendimento de 20 a 22 toneladas de cacho de fruto fresco (CFF) por hectare/ano (SILVA, 2015).

Dessa forma, essa palmeira destaca-se entre as oleaginosas cultivadas pela sua elevada produtividade. Estima-se que essa cultura possa render entre 4 e 5 toneladas de óleo por hectare (SEDAP, 2020), equivalendo a cerca de 1,5 vezes a produtividade do óleo de coco, duas vezes a do óleo de oliva e mais de 10 vezes a do óleo de soja (SILVA, 2015). Essa característica torna a palma de óleo uma cultura altamente eficiente na produção de óleo vegetal em comparação com outras oleaginosas conhecidas.

Com isso, essa oleaginosa desempenha um papel fundamental na indústria de óleos vegetais, sendo uma das culturas agrícolas mais importantes e produtivas do mundo. Cerca de 40% de todo o óleo vegetal produzido globalmente é proveniente dos plantios de palma de óleo (FAO, 2015; MURPHY, GOGGIN, PATERSON, 2021). A sua demanda tem crescido significativamente ao longo das últimas décadas, impulsionada pelo aumento da população

mundial, mudanças nos hábitos alimentares e o aumento da utilização de biocombustíveis (USDA, 2021). Levantamentos realizados no período de 1995 a 2020, demonstram que a produção mundial de óleo de palma aumentou consideravelmente, passando de 15 milhões de toneladas para 72 milhões de toneladas (USDA, 2021).

Nesse cenário, o Brasil ocupa a nona posição na produção mundial de óleo de palma (BENEZOLI *et al.*, 2021). Dentre os Estados brasileiros, o Pará se destaca como o maior produtor de palma de óleo, com uma área plantada de 231.669 hectares e uma área colhida de 200.000 hectares, dos quais 40 mil hectares são destinados a agricultores familiares (SEDAP, 2020). Entre os municípios paraenses, destacam-se como principais produtores de palma de óleo: Tailândia com 37,03% da produção, Tomé-Açu com 21,10%, Concórdia do Pará com 10,85%, Acará com 8,26%, Bonito com 6,30%, Moju com 5,55%, Igarapé-Açu com 2,48%, Santo Antônio do Tauá com 1,82%, Abaetetuba com 0,98% e São Domingos do Capim com 0,94% (IBGE, 2020). Esses dados reforçam a importância do Pará como o principal polo produtor de palma de óleo no Brasil, contribuindo significativamente para a economia agrícola do país e evidenciando o papel fundamental desempenhado pela região na produção dessa cultura.

1.2.2 Amarelecimento Fatal da Palma de Óleo (AF)

A palma de óleo desempenha um papel de extrema importância para o Estado do Pará. No entanto, a cultura enfrenta um desafio significativo devido à presença da doença denominada Amarelecimento Fatal da palma de óleo (AF), cuja etiologia ainda é desconhecida. O AF é uma enfermidade que gera uma crescente preocupação entre os palmicultores paraenses, uma vez que não apresenta danos visíveis nos tecidos internos da planta, mas manifesta sintomas externos, como o amarelecimento e necrose das folhas.

Uma das primeiras consequências da doença é a degradação do sistema radicular, principalmente das raízes terciárias e quaternárias, sendo as partes mais tenras da planta (VAN SLOBBE, 1991; ALBERTAZZI, BULGARELLI, CHINCHILLA, 2005). O sintoma visual mais evidente é o amarelecimento dos folíolos basais das folhas intermediárias, localizados ao redor da folha flecha, que evolui para a completa dessecação da planta. No entanto, ao contrário de doenças como a doença do anel vermelho ou a fusariose, que causam danos nos tecidos internos da palma de óleo, o Amarelecimento Fatal se caracteriza pela ausência de danos visíveis nos tecidos internos e pela ausência de patógenos associados (ALBERTAZZI, BULGARELLI, CHINCHILLA, 2005; BOARI, 2008).

O primeiro caso registrado dessa doença no Pará ocorreu em 1974, nos plantios de palma

de óleo da empresa DENPASA (Dendê do Pará S/A). Desde então, a doença se disseminou rapidamente, afetando cada vez mais plantas. Em 1981, foram identificadas 125 plantas com Amarelecimento Fatal (AF), número que aumentou para 465 em 1984 e para 2.205 em 1985 (GOMES JUNIOR *et al.*, 2010). Até o ano 2000, mais de 3.000 hectares já estavam comprometidos pela doença em todo o Estado, e entre 1974 e 2006, cerca de 5.300 hectares foram devastados pelo Amarelecimento Fatal (GOMES JUNIOR *et al.*, 2010). Esses números evidenciam a rápida propagação e o impacto significativo que essa doença teve na cultura da palma de óleo no Pará.

Diversos estudos foram conduzidos ao longo dos anos para investigar os fatores bióticos relacionados ao AF da palma de óleo, na tentativa de descobrir um agente etiológico. Foram analisadas possíveis causas entomológicas (CELESTINO FILHO *et al.*, 1993), a presença de fitoplasmas (VAN SLOBBE, 1991), fungos e bactérias (VAN SLOBBE, 1988; SILVA, 1989), vírus e viroides (SINGH *et al.*, 1988; RIESNER e BEUTHER, 1989; RIBEIRO, 1990; KITAJIMA, 1991; BEUTHER *et al.*, 1992; TRINDADE *et al.*, 2005) e nematoides (SILVA, 1989; FERRAZ, 2001). No entanto, todas essas pesquisas não encontraram evidências conclusivas que estabelecessem uma relação causal entre esses agentes e a incidência do Amarelecimento Fatal. Dessa forma, a busca pelo agente etiológico responsável pelo AF permanece inconclusiva.

Estudos que investigaram os fatores abióticos têm proporcionado maior entendimento sobre a incidência do Amarelecimento Fatal (AF). Análises geoestatísticas baseadas em dados fornecidos pela DENPASA indicaram a ausência de um padrão espacial definido para um agente biológico, tanto no surgimento quanto no crescimento dos focos de AF (BERGAMIN FILHO *et al.*, 1998; LARANJEIRA *et al.*, 1998). Além disso, uma avaliação que relacionou a topografia do terreno com a incidência do AF demonstrou uma maior propagação da doença em locais de menor elevação e próximos a corpos d'água, evidenciando a influência da água no desenvolvimento do AF (SANTOS, 2018). Essas descobertas destacam a importância dos fatores abióticos, como a topografia e a disponibilidade de água, na ocorrência do Amarelecimento Fatal.

Dessa forma, os estudos relacionados às disfunções metabólicas estão ganhando cada vez mais destaque nesse debate. Um estudo realizado comparando os metabólitos extraídos das folhas saudáveis e das folhas afetadas pela doença demonstrou a deficiência de nove substâncias nas plantas com Amarelecimento Fatal (AF), abrindo caminho para a investigação de pontos cruciais relacionados à doença (RODRIGUES – NETO *et al.*, 2018). Essas substâncias são indicativas de possíveis deficiências nutricionais e/ou problemas de manejo nos

agroecossistemas.

No entanto, é importante ressaltar que muitas das vias metabólicas dessas substâncias ainda não são completamente compreendidas pela ciência atual. As interações complexas entre os metabólitos e as vias metabólicas específicas dentro das plantas ainda requerem um aprofundamento nas pesquisas para melhor compreensão de sua relação com o Amarelecimento Fatal (RODRIGUES – NETO *et al.*, 2018). Apesar disso, os resultados desse estudo fornecem indícios valiosos que podem orientar futuros estudos relacionados as condições dos solos, à fisiologia e ao metabolismo das plantas afetadas pelo AF.

Essas descobertas ressaltam a importância de uma abordagem holística na investigação do Amarelecimento Fatal, compreender os mecanismos subjacentes ao desenvolvimento e à progressão do AF é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle e manejo da doença, visando minimizar seus impactos econômicos e ambientais na cultura da palma de óleo.

1.2.3 Nova Bioanálise de Solo da Embrapa (BioAS)

A nova Bioanálise de Solo da Embrapa (BioAS) é uma tecnologia inovadora lançada em julho de 2020, que tem se mostrado promissora para a análise e avaliação dos solos. O grande diferencial da BioAS é a integração do componente biológico às análises químicas tradicionais realizadas nos solos, como pH, H+Al, P, Ca, K, Mg, entre outros parâmetros (MENDES *et al.*, 2021).

Para mensurar a atividade biológica presente no solo, a BioAS utiliza a análise da atividade de duas enzimas específicas: a Arilsulfatase e β -glicosidase. Essas enzimas estão associadas aos ciclos do enxofre e do carbono, respectivamente (MENDES *et al.*, 2020). A arilsulfatase está relacionada à mineralização do enxofre orgânico presente no solo, enquanto a β -glicosidase está associada à decomposição da matéria orgânica e à ciclagem do carbono (TABATABAI, 1994).

Através da análise dessas enzimas, a BioAS permite uma avaliação mais abrangente da qualidade e da atividade biológica do solo, fornecendo informações valiosas sobre os processos biológicos e a saúde do ecossistema edáfico. Essa abordagem integrada proporciona uma visão mais precisa e holística das condições do solo, permitindo uma melhor compreensão dos processos de degradação, bem como das deficiências nutricionais e dos desequilíbrios presentes no sistema (MENDES *et al.*, 2020).

Dessa forma, os resultados da BioAs demonstram vários índices e funções do solo, calculados a partir da interpretação dos resultados de análises enzimáticas e das análises

tradicionais de fertilidade do solo, sendo elas: os Índices de Qualidade IQS_{Fertibio}, IQS_{Biológico} e IQS_{Químico}, além das funções: F1 – Ciclar nutrientes, F2 – Armazenar nutrientes e F3 – Suprir nutrientes (MENDES *et al.*, 2018).

Em termos práticos, o IQS Biológico demonstra a grau de saúde da partição biológica do solo, enquanto o IQS Químico afere o grau dos elementos químicos no solo, e a junção desses dois índices gera o IQS Fertibio, um índice mais robusto que mensura tanto a fertilidade do solo como seu grau de degradação (MENDES *et al.*, 2021).

Para as funções do solo, temos o F1 – Ciclar Nutrientes, que avalia a atividade biológica do solo, o seu poder de ciclar nutrientes, formação e decomposição da matéria orgânica. F2 – Armazenar nutrientes, quantifica o poder de armazenamento de nutrientes que o solo possui, verifica a textura, qualidade das argilas e ao conteúdo e qualidade da matéria orgânica. F3 – Suprir nutrientes, verifica a qualidade dos nutrientes que o solo possui, como sua acidez e mineralização e disponibilidade dos macronutrientes (MENDES *et al.*, 2020).

Como tecnologia social, esta nova análise adotou um sistema de padronização, onde as aferições dos IQs e suas Funções variam em um intervalo de 0 a 1, onde 0 é considerado muito baixo e 1 muito alto, além de utilizar um esquema de cores variando do vermelho (muito baixo) ao verde (muito alto), facilitando assim a interpretação para o público não técnico, sendo de fácil entendimento e interpretação (MENDES *et al.*, 2018).

No entanto, algumas interações são salientadas na interpretação, indicando estabilidade, saúde e qualidade dos solos. Se as funções F1 e F2 estiverem demonstrando muito alto ou alto, demonstra-se que o manejo do agroecossistema está correto e sustentável. Se F1 e F2 estiverem médios ou baixos/muito baixo, refrete uma prática degradativa, devendo repensar na forma de manejo (MENDES *et al.*, 2020).

Existem também os padrões transitórios, em que se indicam estados de declínio ou de regeneração dos solos. Dessa forma, se F1 apresentar valores muito baixo a baixos e F2 apresentar valores altos ou muito altos, essa situação indica que o solo está em declínio, e que certamente há algo de errado sendo feito no manejo desse agroecossistema, como também se F1 está como valores alto a muito alto e F2 estiver baixo a muito baixo, essa situação demonstra que o manejo está correto está surtindo efeito, e o solo está se regenerando (MENDES *et al.*, 2020).

1.2.4 Modelo Digital de Terreno (MDT)

A captação precisa das características do terreno e sua topografia emerge como um pilar crucial para uma compreensão abrangente de uma variedade de processos ambientais, abrangendo tanto abordagens analíticas quanto subjetivas (SALEKIN *et al.*, 2023). Dessa

forma, durante as últimas duas décadas, os modelos digitais de elevação (MDEs) têm desempenhado um papel fundamental em diversas pesquisas científicas.

Essa importância é amplificada pelos avanços nas tecnologias de sensoriamento remoto, juntamente com a disseminação crescente de fontes digitais de elevação e ferramentas de análise topográfica, desencadeando com isso, uma crescente capacitação de pesquisadores e profissionais de diversas disciplinas a computar eficientemente variáveis relacionadas ao terreno e a desenvolver índices com base em inferências plausíveis (KIENZLE, 2004).

Desta maneira, esses modelos têm servido como base sólida para uma variedade de estudos, incluindo pesquisas geológicas detalhadas, elaboração de modelos hidrológicos precisos e análises dinâmicas de ecossistemas complexos (MAGRUDER *et al.*, 2021). A utilização desses dados tem, em última instância, possibilitado a habilidade de caracterizar minuciosamente, monitorar constantemente e analisar de forma abrangente o ambiente em suas três dimensões, conferindo-lhe uma compreensão mais profunda e abrangente das interações que ocorrem no mundo tridimensional (SCHUMANN e BATES, 2018).

Com isso, uma ferramenta topográfica amplamente empregada para análise e caracterização da superfície terrestre é a modelagem digital. Esses modelos representam matematicamente a superfície da Terra por meio da derivação e interpolação sistemática de pontos de elevação coletados (HABIB *et al.*, 2018; HABIB, 2021; SALEKIN *et al.*, 2018). A aplicação da interpolação em pontos de elevação de alta densidade, obtidos por meio de tecnologias de sensoriamento remoto (como detecção e alcance de luz) ou (em campo) através dos sistemas globais de navegação por satélite, podem resultar na criação de um MDE preciso, cuja resolução espacial está relacionada à densidade dos pontos (DARNELL *et al.*, 2008; SALEKIN *et al.*, 2018).

Do ponto de vista agrônomo, os Modelos Digitais de Elevação (DEMs), especialmente os Modelos Digitais de Terreno (MDT), desempenham um papel de extrema relevância, ao evidenciarem as altitudes da superfície do solo. Essa informação altimétrica assume particular importância devido à influência significativa da topografia na distribuição espacial das características físicas e nutricionais do solo, afetando processos como infiltração, escoamento, erosão e deposição (SEIBERT *et al.*, 2007; RITCHIE *et al.*, 2007; SCHWANGHART e JARMER, 2011; LI e PAN, 2020). Nutrientes do solo, concentrados na camada superficial (0 - 20 cm), são suscetíveis à erosão por água e vento (GUO e GIFFORD, 2002; LAL, 2019). À medida que escoamento e sedimentos se movem das partes altas para as baixas, nutrientes são transportados das áreas de erosão para as deposicionais (SEIBERT *et al.*, 2007; LI e PAN, 2020).

1.2.5 Geoestatística

A geoestatística é uma grande aliada na área da agricultura de precisão, é uma ferramenta utilizada para determinação da variabilidade espacial de variáveis de interesse na agricultura, sendo elas, tanto do âmbito de fertilidade quanto produtividade, como qualquer outra que seja do interesse, levando em consideração sua dependência espacial (SILVA *et al.*, 2010; SILVA e LIMA, 2012; LIMA *et al.*, 2016; VASU *et al.*, 2017). Sendo assim, a geoestatística caracteriza uma variável pela sua distribuição no espaço, tanto num domínio 2D como no 3D, tendo como objetivo representar da melhor forma áreas não amostras com base em áreas amostradas (YAMAMOTO & LANDIM, 2013).

Desde a década de 50, com o trabalho do estatístico e engenheiro de mineração Danie Gerhardus Krige sobre a avaliação de jazidas minerais (ouro), constatou que sua dependência espacial deveria ser levada em conta, para que fosse possível observar relações em suas variâncias (FARIAS *et al.*, 2002). O trabalho de Krige foi formalizado na década de 60 pelo engenheiro francês Georges Matheron, que incorporando os princípios da estatística clássica aos de Krige, quando a geoestatística começou a ser chamada assim, introduziu o conceito de variável regionalizada, que diz que a localização no espaço está relacionada com a aleatoriedade na variação da medição de um atributo (MOLIN *et al.*, 2015).

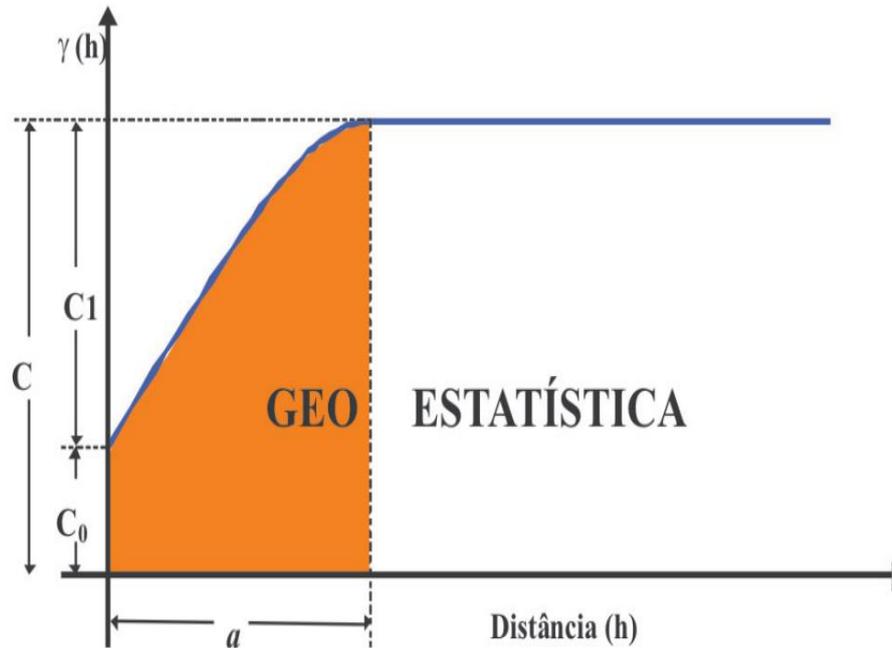
Dentro deste conceito, a amostragem é o primeiro passo para a aplicação da geoestatística, ela pode ser feita em grade regular ou aleatória, visando representar o comportamento da variável de interesse do modo mais realista (YAMAMOTO & LANDIM, 2013). Em análises de solos, o menor número de amostras recomendado é de 1 por hectare, para que se tenha uma boa representatividade da área (MOLIN *et al.*, 2015).

No entanto, em muitos casos, é utilizada uma média de 0,3 a 0,5 amostras por hectares, que por ter uma baixa representatividade não é recomendado. A representatividade vai depender do número amostral que irá ser utilizado na área de estudo. Na grande maioria dos casos, um número superior a 100 amostras é o recomendado para trabalhar a produção de mapas de variabilidade do solo, com uso da geoestatística (MOLIN *et al.*, 2015).

Posterior a uma boa amostragem, é possível fazer o ajuste do semivariograma experimental, sendo a assinatura matemática que permitem medir a variabilidade de um atributo em função da distância, de modo que em uma direção é mais ou menos contínua (YAMAMOTO & LANDIM, 2013). O semivariograma (Figura 01) tem como base três elementos principais: contribuição (C1), efeito pepita (CO) e alcance (A). A variância entre os pontos é medida com base numa distância (h). A partir disso, entre pontos próximos, a distância é pequena, e a variância baixa, e conforme a distância entre pontos aumenta, a variância tem uma tendência a

aumentar (YAMAMOTO & LANDIM, 2013).

Figura 01 – Modelo esquemático do semivariograma experimental.

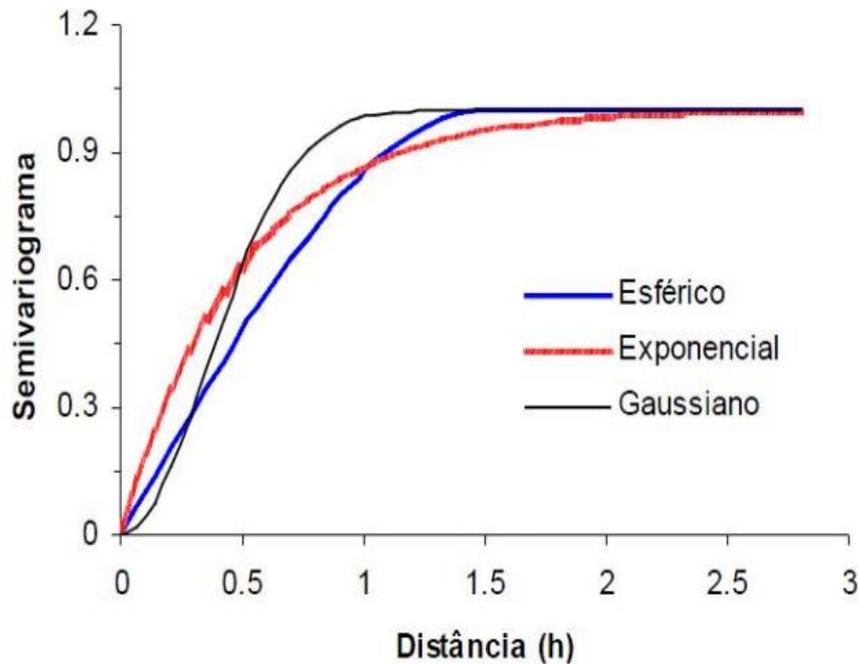


Fonte: Guerra, 1988.

O ajuste do semivariograma experimental é o ponto mais importante da geoestatística, pois é ele que mostra o comportamento de uma variável. Conforme a semivariância cresce, o alcance também cresce chegando até um valor máximo ($C_1 + C_0 = C$), sendo chamado esse valor máximo de patamar e, a partir dele, o gráfico mantém uma estabilidade, não podendo mais ser utilizada a geoestatística para explicar seu comportamento (MOLIN *et al.*, 2015)

A partir do semivariograma experimental adere-se a ele modelos semivariográficos teóricos. Os mais utilizados nas ciências agrárias são: esférico, gaussiano e exponencial (Figura 02), servindo como base para a produção dos mapas de variabilidade espacial (GREGO e OLIVEIRA, 2015).

Figura 02 – Esquema dos modelos de semivariograma mais usuais na geoestatística.



Fonte: Queiroz, 2003.

Estando de posse do semivariograma que melhor representa a variável, pode-se aplicar a krigagem, que é um interpolador geoestatístico que segue o princípio da primeira lei da geografia, onde Tobler (1979) cita que “Todas as coisas estão relacionadas entre si, mas coisas próximas são mais relacionadas que coisas distantes”. Com isso, o uso da krigagem é possível estimar qual o valor de um atributo em um local qualquer, partindo de valores do atributo em locais conhecidos e próximos ao local em que o atributo será estimado.

Por essas características, os métodos de aplicação de Krigagem são geralmente referidos pela sigla BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*). Significando que é uma estimativa ótima, com variância mínima do erro de estimativa (*Best*); que sua estimativa se baseia numa combinação linear de amostras (*Linear*) e que não irá gerar uma estimativa tendenciosa (*Unbiased*) (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

2 AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO SOBRE A INCIDÊNCIA DO AMARELECIMENTO FATAL EM PALMA DE ÓLEO

2.1 INTRODUÇÃO

A palma de óleo (dendezeiro – *Elaeis guineensis* Jacq.) é uma cultura perene que apresenta vantagens significativas em relação a outras oleaginosas cultivadas. Com uma produção contínua ao longo do ano, sem problemas sazonais, essa cultura tem uma perspectiva de vida útil de 25 anos, alcançando rendimentos médios de 20 a 22 toneladas de cacho de fruto fresco (CFF) por hectare por ano (SEDAP, 2020). Em termos de produtividade de óleo, a palma de óleo se destaca em relação a outras oleaginosas conhecidas. Ela é capaz de produzir entre 4 e 5 toneladas de óleo por hectare, o que equivale a 1,5 vezes a produtividade do óleo de coco, duas vezes a do óleo de oliva e impressionantes 10 vezes a do óleo de soja (SILVA, 2015). Esses números reforçam o potencial econômico e a importância da palma de óleo como uma cultura produtiva e rentável no setor agrícola.

Nesse cenário, o Pará se destaca como o maior produtor de palma de óleo no Brasil, representando 98,47% de toda a produção nacional de cacho do fruto fresco (CFF) da palma de óleo, seguido pela Bahia com 1,47% e Roraima com 0,05% (IBGE, 2020). Essa cultura desempenha um papel significativo na economia da região. No entanto, a palmicultura no Pará enfrenta um desafio importante, que é a ocorrência do Amarelecimento Fatal da palma de óleo (AF), uma doença cuja causa ainda é desconhecida.

O AF se caracteriza pelo amarelecimento dos folíolos basais das folhas intermediárias, seguido de necrose nas extremidades dos folíolos, resultando na seca total dessas folhas. Em estágios mais avançados, a doença leva à necrose da folha flecha, a remissão generalizada das folhas e, por fim, à morte da planta, que se apresenta totalmente seca, sem nenhum fluxo de seiva aparente (BOARI, 2008). A ocorrência do AF representa um dos principais desafios para a expansão da cultura da palma de óleo na região, exigindo estudos aprofundados para compreender sua etiologia e desenvolver estratégias de controle e manejo eficazes.

Após décadas de estudos, evidências têm apontado para fatores relacionados às condições do solo (BERNARDES, 2001; CORLEY e TINKER, 2015; TEIXEIRA *et al.*, 2017; NASCIMENTO *et al.*, 2018) e/ou possíveis deficiências nutricionais (RODRIGUES – NETO *et al.*, 2018) como causas potenciais das incidências do Amarelecimento Fatal (AF) da palma

de óleo. Essas investigações têm contribuído para uma melhor compreensão dos mecanismos que desencadeiam o AF, destacando a importância das condições do solo e do manejo nutricional adequado para a saúde das plantas e a possível prevenção dessa doença.

Dessa forma, a implementação de novas abordagens analíticas, como a Bioanálise de Solo da Embrapa (BioAS), que incorpora o componente biológico às análises rotineiras de fertilidade do solo, mostra-se uma proposta viável para investigar o nível de degradação do solo (MENDES *et al.*, 2020). A BioAS avalia a atividade de enzimas como Arilsulfatase e β – Glicosidade, que são indicadores da atividade biológica do solo, e relaciona esses dados com os componentes químicos (pH, Al, Ca + Mg, etc.) e físicos (textura, densidade, retenção de água, etc.), fornecendo índices de qualidade do solo (IQs) e suas respectivas funções (F). Essa abordagem permite uma avaliação mais abrangente e integrada das condições do solo, contribuindo para uma melhor compreensão do nível de degradação e fornecendo subsídios para a adoção de práticas de manejo adequadas (MENDES *et al.*, 2021).

Nesse cenário, a utilização de métodos de interpolações, como a krigagem ordinária e a função de base radial (spline), desempenha um papel fundamental na pesquisa dos atributos da BioAS em relação à incidência do AF. Esse método permite a predição dos atributos ao longo do espaço, o que viabiliza a elaboração de mapas detalhados de determinadas áreas mesmo com um número limitado de amostras (YAMAMOTO, 2020). Essa abordagem amplia as análises dos atributos do solo e sua correlação com os índices de AF, proporcionando uma compreensão mais abrangente dos fatores que influenciam a ocorrência da doença.

Estudos utilizando a interpolação por krigagem ordinária descrevem a autocorrelação espacial da incidência do AF a partir do décimo ano de progressão, com alcance de 200 a 570 m, sendo os modelos de semivariância, o gaussiano, esférico e exponencial (SANTOS, 2018). Nesse contexto, esses padrões, possivelmente se devam a reflexos das condições do solo, que se manifestam na sintomatização do AF.

Dessa forma, diante da importância econômica da cultura da palma de óleo para o Estado do Pará, das crescentes taxas de incidência de AF sobre a palmicultura paraense, das condições do solo sendo as possíveis causas da ocorrência do AF, ao aporte de métodos de interpolações para amplificação das análises de dados, objetivou-se com este estudo avaliar atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo em relação à incidência do Amarelecimento Fatal (AF) da palma de óleo (dendezeiro – *Elaeis guineensis* Jacq.).

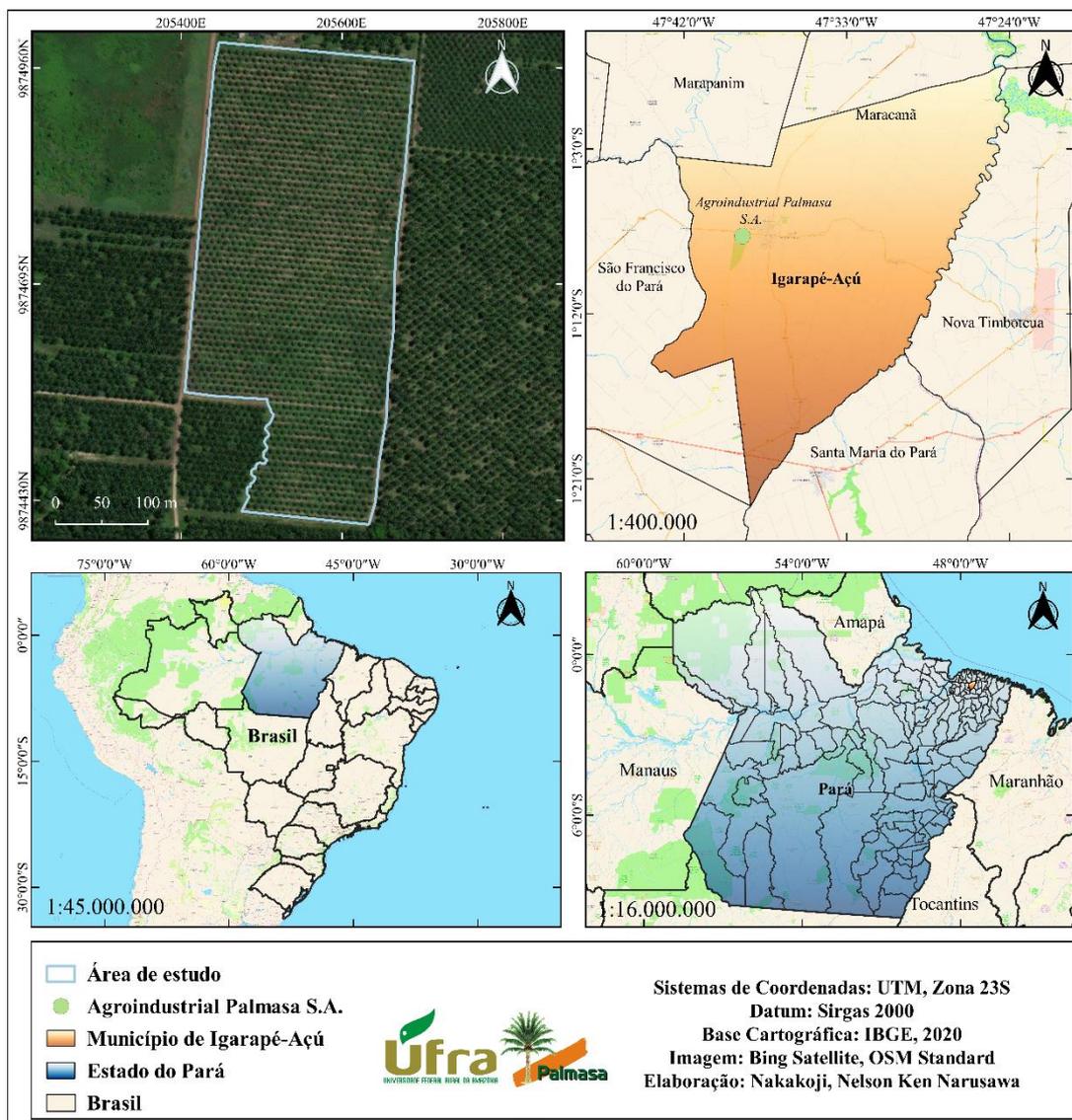
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da Área de Estudo

2.2.1.1 Localização

O estudo foi desenvolvido nas dependências agrícolas da agroindústria Palmasa S/A, situado no município de Igarapé-açu, pertencente à mesorregião nordeste paraense, microrregião Bragantina, no Estado do Pará (IBGE, 2020), nas coordenadas geográficas: $1^{\circ} 7' 47.14''$ e $1^{\circ} 8' 6.55''$ de latitude Sul, $47^{\circ} 38' 49.27''$ e $47^{\circ} 38' 39.91''$ de longitude Oeste (Figura 03).

Figura 03 – Mapa da Área de Estudo.



Fonte: Autor (2023).

O clima da região é do tipo Ami, segundo a classificação de Köppen, que corresponde à categoria de super úmido. A temperatura média de mínima e máxima anual varia de 21,7 °C a 32,2 °C. A precipitação pluviométrica anual varia de 2302,5 mm a 2857,4 mm, com distribuição irregular, sendo que os totais mensais de precipitação mais altos ocorrem entre março e abril e os menos elevados, entre setembro e outubro (PACHÊCO, 2011). O solo predominante da propriedade é o Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 2016).

2.2.1.2 Descrição do Plantio

A área em estudo abrange uma extensão de 12,77 hectares, na qual foi realizado o plantio da cultura da palma de óleo no ano de 2014. O espaçamento adotado para o plantio foi o triângulo equilátero com aresta de 9 metros. A cultivar selecionada para esse cultivo foi a *Elaeis guineenses* var. Tenera, e as sementes pré-germinadas utilizadas foram provenientes do Estado do Amazonas. Anteriormente à implantação atual, a área já possuía um plantio de palma de óleo estabelecido em 1987.

Para a implantação do plantio da palma de óleo, foram executadas várias etapas. Inicialmente, foi realizada a aração do solo a uma profundidade de 40 cm, visando preparar o terreno para o plantio. Em seguida, foram abertas covas para a colocação das mudas. Além disso, foi realizada a adubação inicial do solo com 0,1 kg de planta⁻¹ de fosfato natural reativo de Arad (33% P₂O₅, 37% Ca) durante esse processo.

A partir de 2021, foi implementada a prática de correção da acidez do solo por meio da aplicação de calcário e gesso agrícola. Essa ação visa ajustar o pH do solo para criar condições ideais de desenvolvimento da cultura da palma de óleo. No que diz respeito à adubação anual, desde 2021, a quantidade de fertilizante aplicada é determinada com base na análise de solo e foliar. Dessa forma, a quantidade aplicada varia entre 2 a 6 kg por planta, levando em consideração as necessidades nutricionais específicas de cada área. Os fertilizantes utilizados são: NPK (13:11:24) + 0,25% Cu, 0,25% B, 0,25% Zn; NPK (16:00:26) + 0,7% B By SuNKiss® + Fosfato Natural Reativo.

Além disso, é realizada a roçagem periódica do terreno, com uma frequência média de 3 a 4 meses. Essa prática consiste na remoção da parte aérea da vegetação indesejada, que no geral são gramíneas que nascem espontaneamente nos plantios de palma de óleo, contribuindo assim, para o controle da competição por nutrientes e garantindo condições favoráveis de crescimento para a cultura.

Outras atividades relevantes são a poda das folhas baixas, que consiste na remoção das folhas inferiores da palma de óleo, realizada uma vez ao ano, e a colheita dos cachos da

palma de óleo, realizada com periodicidade de 14 a 15 dias, sendo essas práticas realizadas manualmente. No entanto, o carreamento dos cachos é realizado de forma mecanizada, utilizando tratores que percorrem toda a área de plantio. Esse processo auxilia na eficiência da colheita e transporte dos cachos para a etapa seguinte do processamento, mas degrada as condições físicas dos solos, principalmente nos períodos chuvosos.

2.2.2 Levantamento dos Dados

2.2.2.1 Levantamento dos Dados do Amarelecimento Fatal (AF) da Palma de Óleo

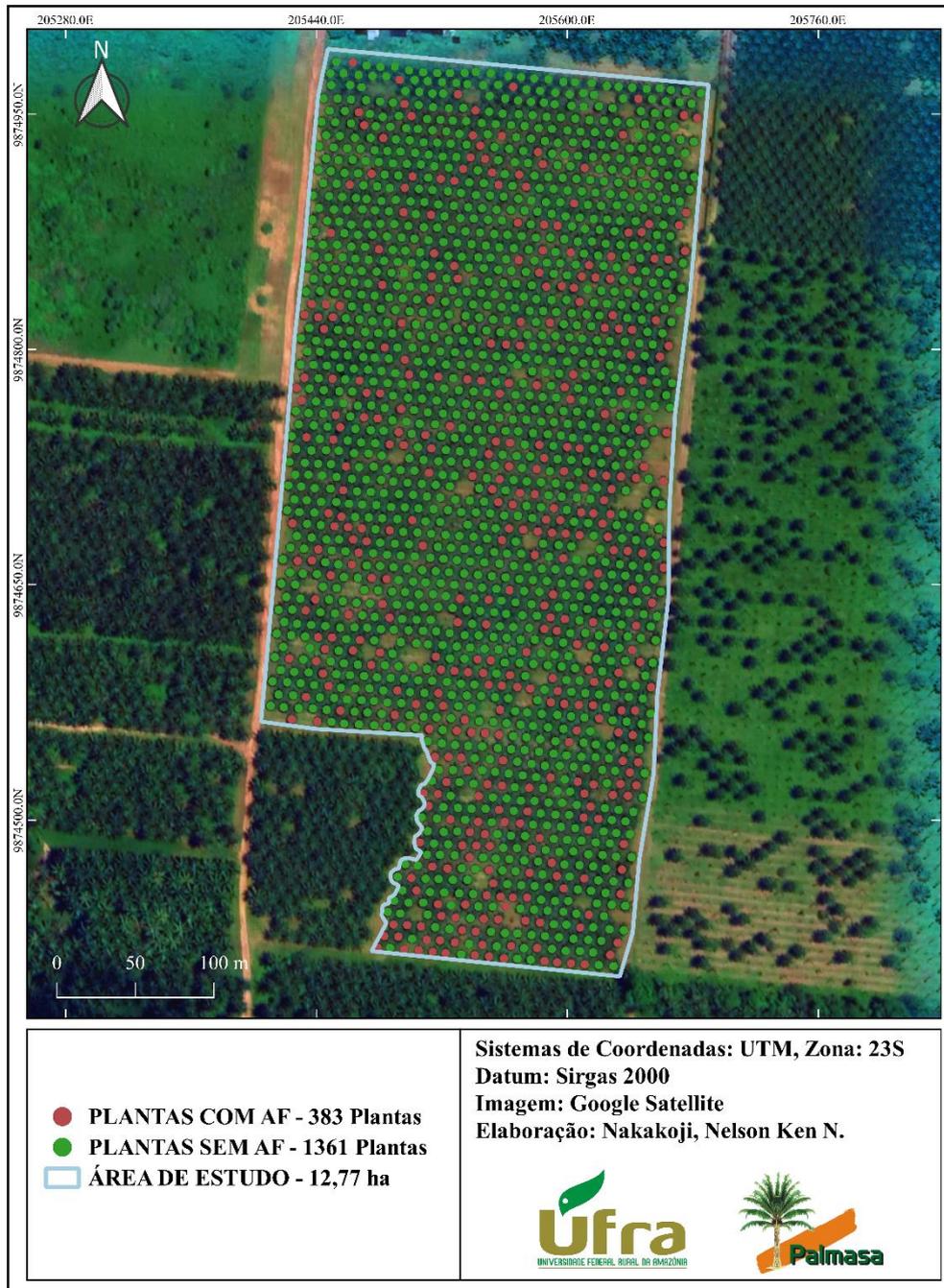
A identificação das plantas afetadas pelo Amarelecimento Fatal (AF) foi realizada pela equipe especializada em fitossanidade da empresa Palmasa. Esse levantamento é feito por meio de uma avaliação visual criteriosa. Os membros da equipe de fitossanidade são devidamente capacitados para identificar características distintas da doença, como demora da abertura da folha flecha ou má formação da folha flecha, amarelecimento dos folíolos basais das folhas médias associado à presença de cachos pouco desenvolvidos ou aborto de cachos. Em casos mais graves, remissões das folhas e seca da planta, demonstrando paralisia de fluxo de seiva, não acompanhada de podridão úmida ou mole de odores fétidos.

Anualmente, é realizado um inventário minucioso dos plantios da empresa, para monitorar a produtividade e a expansão da doença. Essa prática de inventário permite à equipe de fitossanidade obter informações atualizadas sobre a situação da doença em diferentes áreas da plantação e gerar prospecção de produtividade futura para essas áreas.

Para este estudo, foi realizado o inventário fitossanitário do ano de 2022, foi adotada uma abordagem que envolveu a orientação espacial dos dados. Inicialmente, os dados foram registrados como coordenadas no formato (número da linha, número da planta), sendo necessário convertê-los para coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*) para uma melhor análise espacial.

Esse processo consistiu em georreferenciar as plantas, sendo gerado um arquivo shapefile de pontos no programa QGIS 3.29.9. Utilizando imagens de satélite disponíveis nos servidores do Google e do Bing, as plantas foram devidamente georreferenciadas e classificadas na tabela de atributos como "Plantas COM AF" e "Plantas SEM AF", também foram instituídos respectivamente 1 e 0 para posterior interpolação por krigagem ordinária. No total, foram georreferenciadas 1744 plantas, sendo 1361 plantas saudáveis e 383 plantas afetadas pelo Amarelecimento Fatal (Figura 04).

Figura 04 – Grade Amostral de Coleta do Experimento.

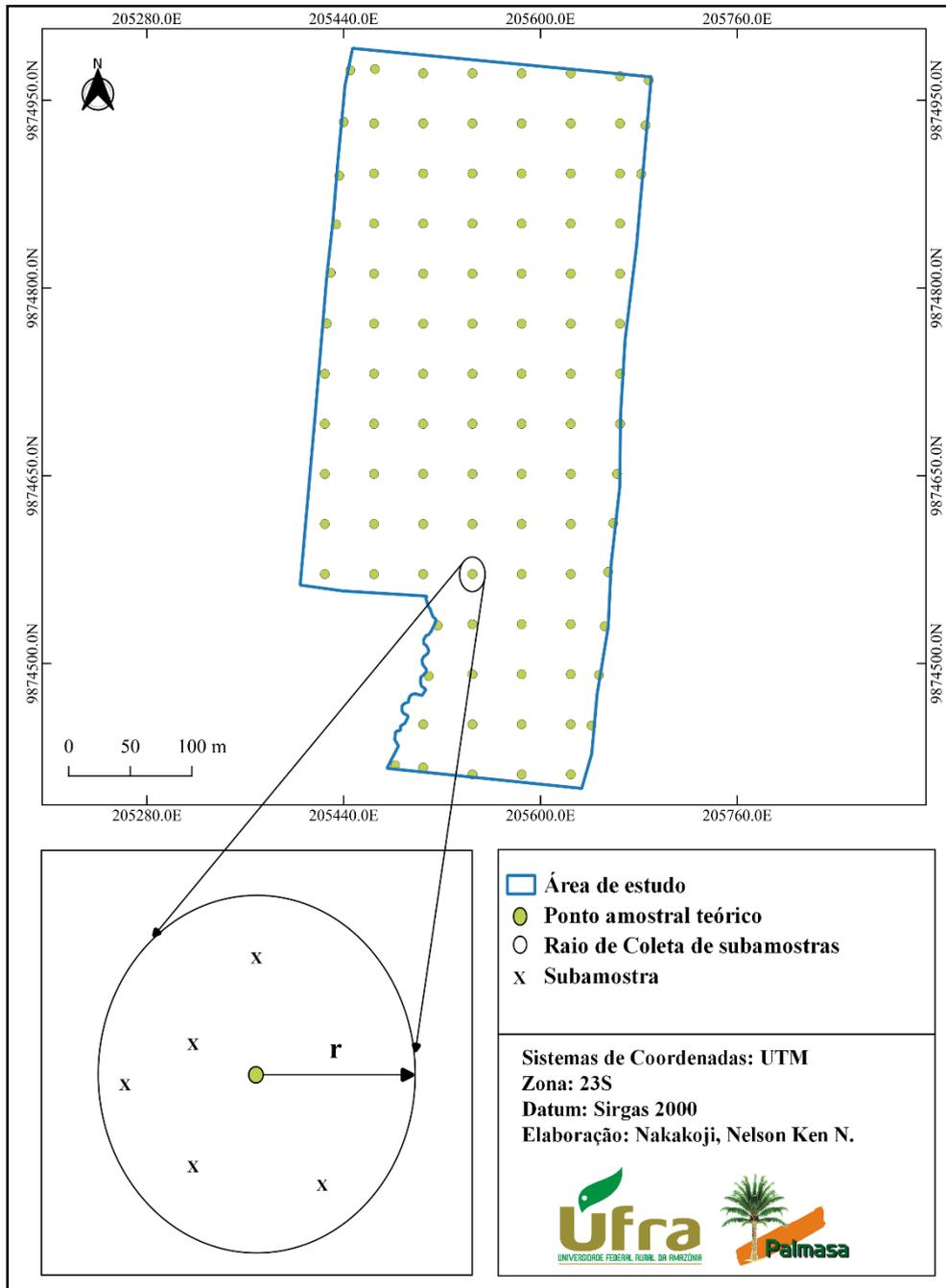


Fonte: Autor (2023).

2.2.2.2 Levantamento dos Dados da Bioanálise (BioAS)

A coleta dos dados da Bioanálise (BioAS) foi realizada no mês outubro de 2022, no período de estiagem da região, na profundidade de 0 – 0,1 m, com a utilização do trado holandês. Através do software Qgis versão 3.22.9, foi elaborada uma grade regular de 40 m x 40 m de dimensões na área de estudo, construindo 100 pontos de coletas (Figura 05).

Figura 05 – Grade Amostral de Coleta do Experimento.



Fonte: Autor (2023).

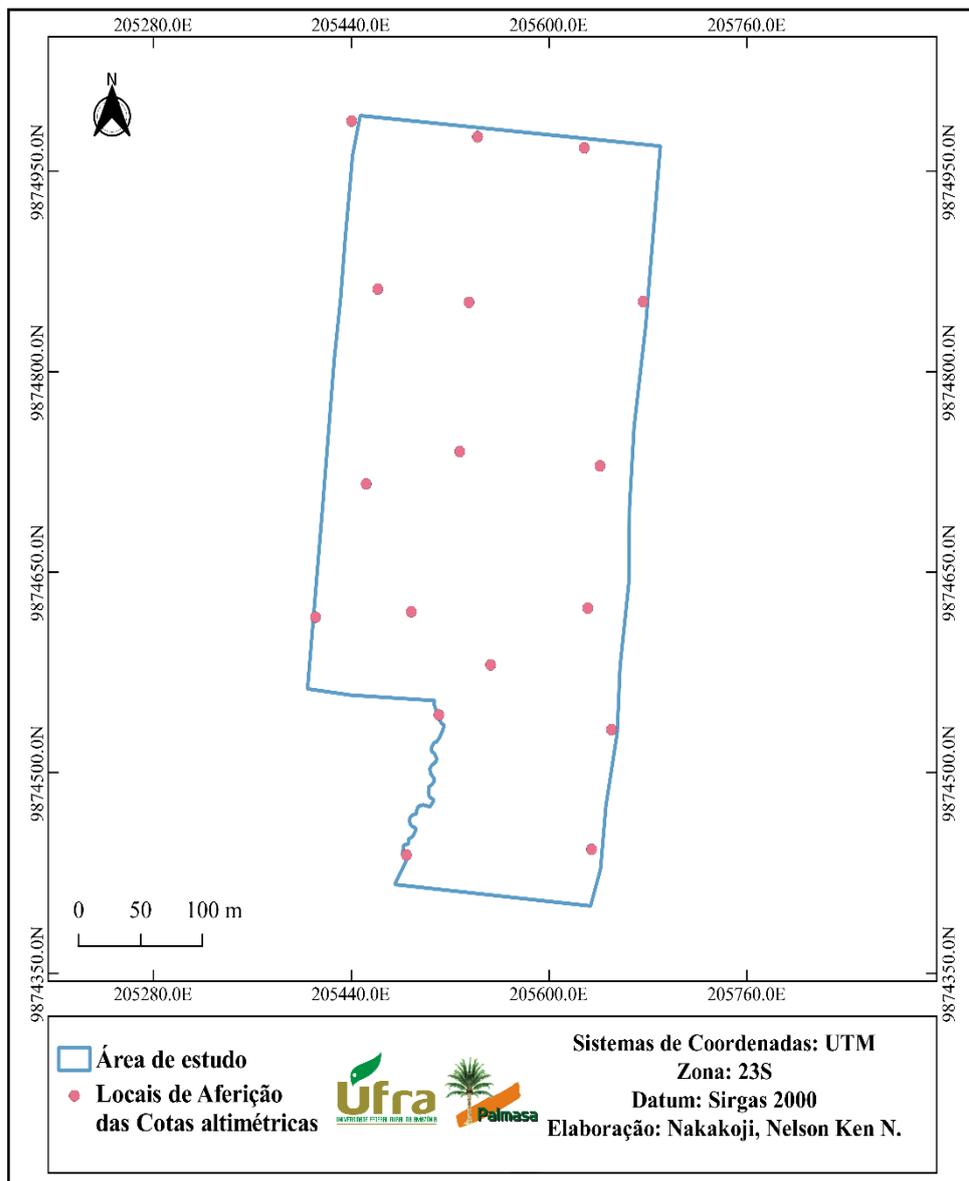
Para auxiliar na localização dos pontos de coleta, utilizou-se o aparelho de navegação GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Garmin 64s. Em cada ponto da grade amostral, foi coletada uma amostra composta, que consistiu na combinação de cinco subamostras. Essas subamostras foram coletadas em um raio de 2 a 5 metros de distância de cada ponto da grade amostral. Essa abordagem de amostragem permite diluir possíveis erros de posicionamento e variações pontuais da variável estudada, contribuindo para uma representação mais precisa do

local de coleta e da variabilidade do solo (MOLIN *et al.*, 2015). Posteriormente, as amostras coletadas foram enviadas para o laboratório credenciado pela Embrapa, denominado Solos & Plantas, localizado no município de Sorriso, no Estado do Mato Grosso.

2.2.2.3 Levantamento dos Dados Altimétricos

A coleta dos dados altimétricos foi realizada em 17 pontos estrategicamente distribuídos pela área de estudo, como apresentado na Figura 06. Para essa tarefa, utilizou-se o equipamento GNSS geodésico da marca Trimble, modelo R8S, que possui uma estimativa de erro de apenas 3 mm.

Figura 06 – Grade Amostral de Coleta da Altimetria.



Fonte: Autor (2023).

Com o objetivo de alcançar uma precisão ainda maior nos dados altimétricos coletados, procedeu-se à correção da base do GNSS por meio de pós-processamento dos dados. Para isso, foi empregada a plataforma avançada IBGE-PPP (Processamento por Ponto Preciso), amplamente reconhecida no campo da geodésia. Essa plataforma possibilitou a obtenção de valores altimétricos precisos, bem como as coordenadas UTM X e Y, do Fuso 23S, para cada ponto de amostragem.

2.2.3 Procedimentos da Bioanálise (BioAS)

2.2.3.1 Análise de Fertilidade do Solo

A análise de fertilidade foi realizada seguindo a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017). O pH foi determinado em potenciômetro, na relação amostra-água de 1:2,5. O fósforo (P) e o potássio (K) foram extraídos com solução de Mehlich I (HCl 0,05 mol + H₂SO₄ 0,0125 mol), sendo o P determinado por espectrofotometria de ultravioleta visível e o K por fotometria de chama. A extração dos teores trocáveis de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) foi feita com KCl 1 mol L⁻¹ e a determinação por titulometria. A extração da acidez potencial (H + Al) foi feita com acetato de cálcio (C₄H₆O₄Ca pH 7,0) e a titulação com solução de hidróxido de sódio (NaOH) na presença de fenolftaleína (C₂₀H₁₆O₄) como indicador. O carbono orgânico total (COT) foi determinado pela oxidação com dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) e titulação com sulfato ferroso amoniacal.

A matéria orgânica (MO) foi estimada com a multiplicação do COT por 1,72. A soma de bases (SB) foi determinada pela soma do (Ca + Mg + K). A CTC efetiva (t) foi determinada pela soma da (SB + Al). A CTC potencial (T) foi determinada pela soma da (SB + Al + H). A percentagem de saturação por alumínio (m%) foi determinado pela expressão $((100 \times \text{Al}) / t)$. A percentagem de saturação por bases (V%) foi determinado pela expressão $((100 \times \text{SB}) / T)$.

2.2.3.2 Análise Granulométrica do Solo

A granulometria foi determinada pelo método da pipeta. Foi realizado a dispersão química com NaOH 1 mol L⁻¹ e dispersão física com agitação dos frascos durante 16 h em mesa agitadora a 120 rpm. A fração argila foi separada por sedimentação, a fração areia por peneiração e a fração silte foi calculada a partir da diferença (GEE e BAUDER, 1986).

2.2.3.3 Análise da Atividade Enzimática do Solo

As atividades das enzimas β-glicosidase e Arilsulfatase foram determinadas, utilizando-se os métodos descritos por Tabatabai (1994), omitindo-se o tolueno. Esta metodologia tem por

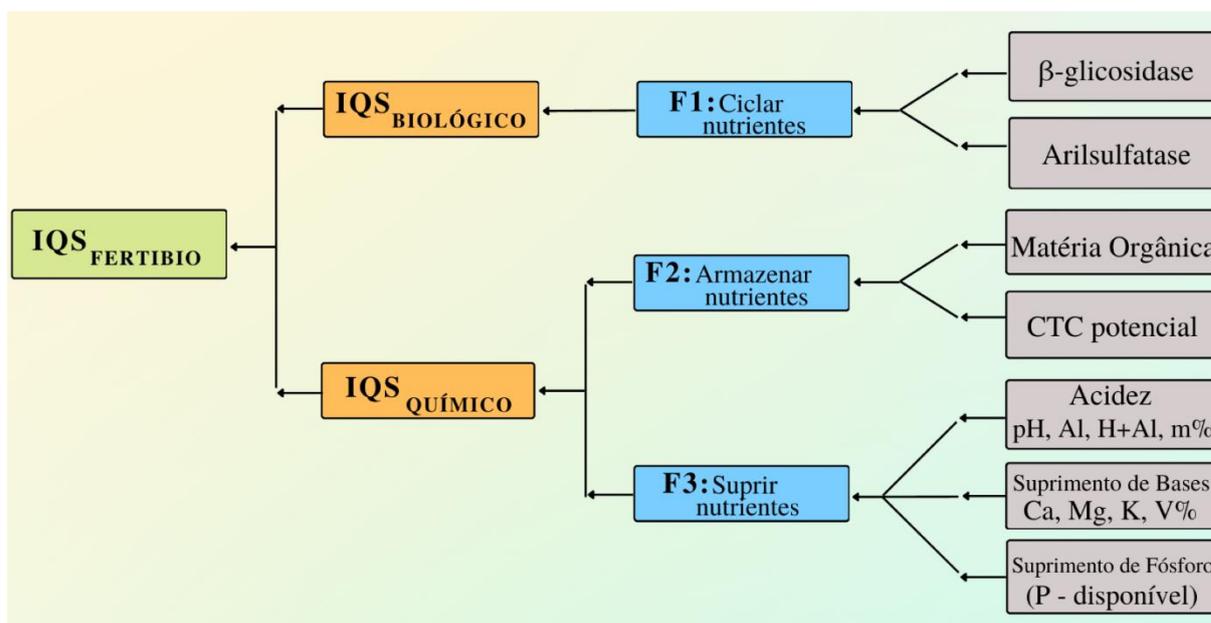
base a incubação, com temperatura a 37°C das amostras de solo, com uma solução tamponada de substratos específicos para cada enzima (β – glicosidase (p – nitrofenil – β – D – glicopiranosídeo (PNG)) e Arilsulfatase (p – nitrofenol sulfato (PNS))), promovendo a liberação do p – nitrofenol, o qual é determinado colorimetricamente, a partir disso é realizado a leitura através do espectrofotômetro com o programa UV Probe (Photometric) que gera os valores e a curva padrão.

As análises de enzimas foram realizadas em triplicata. Para a determinação da quantidade de p – nitrofenol, liberada por cada amostra, foi utilizada como base, uma curva padrão preparada com concentrações conhecidas de p – nitrofenol (0, 10, 20, 30, 40 e 50 μg de p – nitrofenol mL^{-1}). A atividade enzimática do solo foi expressa em microgramas de p – nitrofenol liberado por hora por grama de solo seco ($\mu\text{g p – nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{ solo}$).

2.2.3.4 Geração da Bioanálise (BioAS)

Após a realização de todas as análises laboratoriais, o laboratório credenciado encaminhou os resultados para a plataforma web da Embrapa e utilizando a seguinte ordem (Figura 07), gera-se o laudo final contendo os Índices de Qualidade IQS Fertibio, IQS Biológico e IQS Químico, além das funções: F1 – Ciclar nutrientes, F2 – Armazenar nutrientes e F3 – Suprir nutrientes. Esses atributos gerados são representados padronizadamente no intervalo de 0 a 1.

Figura 07 – Representação esquemática do modelo utilizado para o cálculo do IQS Fertibio, IQS Biológico, IQS Químico, F1 – Ciclar nutrientes, F2 – Armazenar nutrientes e F3 – Suprir nutrientes.



Fonte: Adaptado de Mendes *et al.* (2021).

2.2.4 Análise Exploratória dos Dados

Antes da realização da interpolação por krigagem ordinária e das confecções dos mapas, os dados obtidos da Bioanálise BioAS passaram por análises exploratórias essenciais, que incluíram a investigação da forma dos dados, a distribuição dos valores e a identificação das medidas de tendência central. Dessa forma, foram realizados a construção de histogramas e teste de normalidade Shapiro Wilk para cada atributo. Em seguida, foi realizada análise de estatística descritiva para os dados. Também foi realizado análise de correlação linear. Pelo não atendimento dos parâmetros paramétricos, realizou-se a análise de correlação de Spearman. Foram considerados correlações significativas, valores de $\rho (h\hat{o}) \geq \pm 0,6$.

2.2.5 Confecção do Mapa de Predição dos Atributos da BioAS e do Amarelecimento Fatal (AF) da Palma de Óleo

Para a confecção do mapa de predição dos atributos da BioAS e do Amarelecimento Fatal (AF) da Palma de Óleo, foi utilizado o método geoestatística de interpolação krigagem ordinária. Inicialmente, este método consiste na confecção do semivariograma experimental. A equação matemática que calcula o semivariograma experimental, segundo Farias *et al.* (2002), é:

$$y(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Onde:

$y(h)$ = semivariância estimada em um intervalo de distância (h)

$n(h)$ = número de pares de amostras em um intervalo de distância (h)

$Z(x_i), Z(x_i + h)$ = número de amostras em dois pontos separados por um intervalo de distância (h)

Após o ajuste dos parâmetros dos semivariogramas experimentais, ajustou-se o modelo semivariográfico mais adequado para estimar a semivariância de cada atributo. Para isso, foram testados os modelos esférico, exponencial e gaussiano, sendo estes os mais adequados para a ciência dos solos (GREGO e OLIVEIRA, 2015). Segundo Isaaks e Srivastava (1989), os três modelos são descritos da seguinte forma:

Esférico: Modelo que apresenta uma linearidade próximo à origem, é o modelo mais comumente utilizado. A equação deste modelo é:

$$\begin{aligned}
 Esf(|h|) &= C_0 + C_1 \left[1,5 \left(\frac{|h|}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] & 0 < |h| < a \\
 Esf(|h|) &= C_0 + C_1 & |h| \geq a
 \end{aligned} \tag{2}$$

Exponencial: Este modelo atinge o patamar assintoticamente, casualmente definido como a distância correspondente a 95% do patamar. A equação deste modelo é:

$$Exp(|h|) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{|h|}{a}\right) \right] \quad 0 < |h| < a \tag{3}$$

Gaussiano: Modelo que representa fenômenos extremamente contínuos, caracterizado pelo seu comportamento parabólico nas proximidades da origem. Igualmente ao modelo exponencial, atinge o patamar assintoticamente e seu a é a distância na qual o valor do modelo corresponde também a 95% do patamar. A equação deste modelo é:

$$Gau(|h|) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{3|h|^2}{a^2}\right) \right] \quad 0 < |h| < a \tag{4}$$

Onde (para os três modelos):

C_0 = efeito pepita

C_1 = contribuição

a = alcance

h = distância entre o ponto conhecido e a ser estimado

Como critério de validação dos modelos semivariográficos para os semivariogramas experimentais dos atributos da BioAs, utilizou-se a análise do coeficiente de determinação (R^2) e a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) (GREGO e OLIVEIRA, 2015; BHUNIA; SHIT; CATHOPADHYAY, 2018), quanto mais próximo de 1 for o coeficiente de determinação e mais próximo de 0 a raiz quadrada do erro médio quadrático, mais ajustado será o modelo semivariográfico com o semivariograma experimental. Suas equações matemáticas são respectivamente:

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad \begin{cases} SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \\ SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \end{cases} \tag{5}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

Onde:

n = número de observações

y_i = valor ajustado do semivariograma experimental

\hat{y}_i = valor estimado pelo modelo semivariográfico

\bar{y}_i = média dos valores ajustados do semivariograma experimental

Outro critério avaliado foi o Índice de Dependência Espacial (IDE), sugerido por Trangmar *et al.* (1985) e categorizado por Cambardella *et al.* (1994), que visa categorizar a porção da variabilidade decorrente da dependência espacial em forte, moderado e fraco. O IDE é descrito pela seguinte expressão:

$$IDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) 100 \quad \begin{cases} GDE < 25, \text{ Forte} \\ 25 \leq GDE \leq 75, \text{ Moderado} \\ GDE > 75, \text{ Fraco} \end{cases} \quad (7)$$

Onde:

C_0 = efeito pepita

C_1 = patamar

Como teste decisivo, para discernir o modelo mais adequado entre os modelos semivariográficos que tiveram os critérios avaliativos semelhantes, realizou-se a Validação Cruzada (VC). Consiste em um teste computacional, onde se omite um ponto da grade amostral e realiza-se a sua predição através da interpolação por krigagem ordinária com os pontos restantes (YAMAMOTO, 2020). Esse processo é executado até que todos os pontos passem pelo ciclo de omissão e predição. Assim, cada modelo submetido à VC obtém valores estimados e valores observados. Dessa forma, pôde-se calcular o coeficiente de determinação (R^2_{VC}) e a raiz quadrada do erro médio quadrático ($RMSE_{VC}$) para cada modelo submetido. Quanto mais próximo de 1 for o coeficiente de determinação e mais próximo de 0 a raiz quadrada do erro médio quadrático, mais ajustado o modelo semivariográfico será da variabilidade espacial do atributo coletado. Suas equações matemáticas são respectivamente:

$$R^2_{VC} = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad \begin{cases} SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (e_i - \hat{e}_i)^2 \\ SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)^2 \end{cases} \quad (8)$$

$$RMSE_{VC} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \hat{e}_i)^2} \quad (9)$$

Onde:

n = número de observações

e_i = valor observado no ponto

\hat{e}_i = valor estimado no ponto através da interpolação por krigagem ordinária, utilizando o modelo semivariográfico

\bar{e}_i = média dos valores observado nos pontos

Após a validação dos modelos semivariográficos que melhor representam os atributos da BioAs, realizou-se a interpolação por krigagem ordinária. Esse interpolador geoestatístico permitiu estimar valores de variáveis distribuídas no espaço, utilizando as propriedades estruturais do modelo semivariográfico (Efeito Pepita, Patamar e Alcance), assim, obtendo uma matriz de covariância entre os vizinhos e o ponto a ser estimado. Após está etapa, utilizando a técnica Lagrangiana, foi possível calcular a matriz inversa, a fim de obter os ponderadores das amostras, cuja soma é igual a 1 (YAMAMOTO & LANDIM, 2013). Em seguida, aplicou-se a fórmula matemática da krigagem ordinária para a construção do mapa de predição:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_1 Z[x_i] \quad (10)$$

Onde:

n = número de vizinhos medidos

$Z[x_i]$ = valor conhecido de cada ponto

λ_1 = ponderadores aplicados a cada $Z[x_i]$

2.2.6 Confeção do Modelo Digital do Terreno (MDT)

Para a confecção do Modelo Digital do Terreno (MDT), foi utilizado o método de interpolação função de base radial (Spline). Esse método é mais adequado para cotas altimétricas, ao manter intactos os valores de cada ponto coletado em campo. Em um plano tridimensional, constituído por (x, y e z), a longitude como plano x, a latitude como plano y e os atributos coletados em campo, como plano z, a interpolação função de base radial (Spline) consiste na utilização da função Spline que percorre o plano z utilizando os pontos conhecidos.

Para se ajustar entre esses pontos, é realizado a decomposição do domínio da função em

pequenos problemas locais, dessa forma, os locais percorridos pela função podem ser preditos suavizadamente e os valores dos pontos conhecidos se mantêm inalterados (YAMAMOTO, 2020). Sua expressão matemática é:

Equação 11

$$Z^*(u_0) = \sum_{i=1}^n c_i \varnothing(x_i - x_0) \quad \varnothing(x) = |x|^2 \log|x| \quad (11)$$

Onde:

\varnothing = função Spline

$(x_i - x_0)$ = vetor distância entre o i-ésimo ponto amostral e o ponto a ser interpolado

c_i = constante positiva

Na linguagem de programação R, através do pacote *fields*, função *Tps*, pode-se realizar a interpolação função de base radial (Spline). Nesse pacote, o parâmetro de suavização é escolhido através da validação cruzada, assim, pôde-se calcular o coeficiente de determinação (R^2_{spline}) e a raiz quadrada do erro médio quadrático ($RMSE_{spline}$) para a interpolação das cotas altimétricas e validar o modelo. Quanto mais próximo de 1 for o coeficiente de determinação e mais próximo de 0 a raiz quadrada do erro médio quadrático, mais ajustado o modelo interpolado será da variabilidade espacial do atributo coletado. Suas equações matemáticas são respectivamente:

$$R^2_{spline} = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad \begin{cases} SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (s_i - \hat{s}_i)^2 \\ SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s}_i)^2 \end{cases} \quad (12)$$

$$RMSE_{spline} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - \hat{s}_i)^2} \quad (13)$$

Onde:

n = número de observações

s_i = valor observado no ponto

\hat{s}_i = valor estimado no ponto através da interpolação função de base radial (Spline)

\bar{s}_i = média dos valores observado nos pontos

2.2.7 Extração dos Dados e Análise Comparativo Entre Grupos

Após as confecções do MDT e dos Mapas de predição dos atributos da BioAs, utilizando a ferramenta “*amostrar valores do raster*” do programa Qgis 3.22.9, juntamente ao arquivo shapefile do inventário fitossanitário da área de estudo, pôde-se extrair os valores de cada

atribuo para cada planta da área, dessa forma, criando 2 grupos independentes (Plantas COM AF e Plantas SEM AF) para análise comparativa. Como os dados não atenderam aos pressupostos paramétricos, foi utilizado o teste de Mann-Whitney com 5% de significância.

O objetivo deste teste é verificar se duas amostras independentes são provenientes de um mesmo grupo populacional, para isso, ordenam-se as observações e atribui-se os postos para ambos os grupos. Se a soma dos postos dos grupos for bem próximas, os grupos são provenientes de um mesmo grupo populacional, com isso, mediana e distribuição de frequências são estatisticamente iguais, todavia, se as somas dos postos são distintas, pôde-se inferir que um grupo tende a possuir valores maiores de mediana e distribuição de frequências do que o outro, sendo pertencentes a grupos populacionais distintos (MANN & WHITNEY, 1947). Sua expressão matemática é:

$$\begin{aligned} U_1 &= n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \\ U_2 &= n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2 \end{aligned} \quad (14)$$

Onde:

n_1 e n_2 = respectivos tamanhos de cada amostra

R_1 e R_2 = respectivas somas dos postos de cada amostra

Para testes com grandes amostras (como no caso deste estudo), foi utilizado a aproximação da normal z, para posteriormente obter o p-valor. Sua expressão matemática é:

$$Z_U = \frac{(U - m_U)}{\sigma_U} \quad \left\{ \begin{array}{l} m_U = \frac{n_1 n_2}{2} \\ \sigma_U = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \end{array} \right. \quad (15)$$

Onde:

U = maior valor entre os (U_1 , U_2)

m_U = média dos (U_1 , U_2)

σ_u = erro padrão dos (U_1 , U_2)

Para melhor visualização dos dados, foram construídos gráficos de Boxplot e calculados as medianas para demonstração comparativa dos dados.

2.2.8 Softwares Utilizados

Na organização e tabulação dos dados, utilizou-se o software Microsoft Excel 2016. As

análises exploratórias dos dados, estatísticas de pressuposições paramétricas, teste de Mann-Whitney, teste de correlação de Spearman, construção da matriz de correlação, cálculo de mediana, construção do gráfico de boxplot e construção da MDT, foram realizadas, utilizando a linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2022), juntamente à interface Rstudio.

Para o layout dos mapas e confecção do inventário fitossanitário foi utilizado o software Qgis 3.22.9 juntamente com o plugin *QuickMapServices*. Para a confecção do semivariograma experimental, ajuste do modelo teórico semivariográfico e realização da interpolação por krigagem ordinária foi utilizado o software Qgis 3.22.9 juntamente ao plugin *Smart-map*.

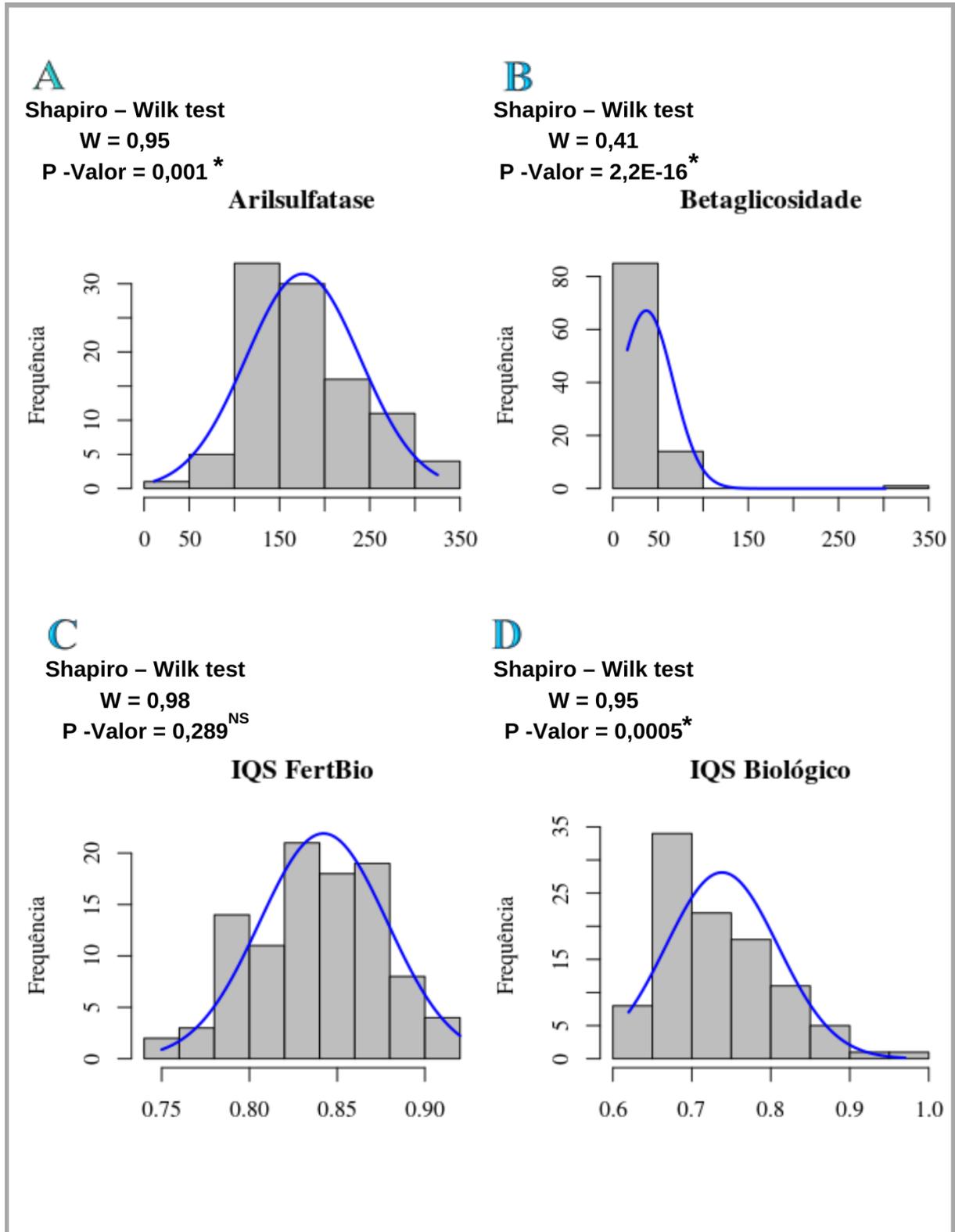
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

2.3.1.1 Teste de Normalidades

Os resultados obtidos revelaram que as variáveis biológicas, químicas e granulométricas do solo, não demonstraram distribuição normal, como excesso das variáveis, IQS Fertibio e percentagem de saturação por bases (V (%)) (Figura 08, Figura 09, Figura 10, Figura 11, Figura 12).

Figura 08 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) Arilsulfatase; B) β -glicosidade; C) IQs Fertibio; D) IQs Biológico.



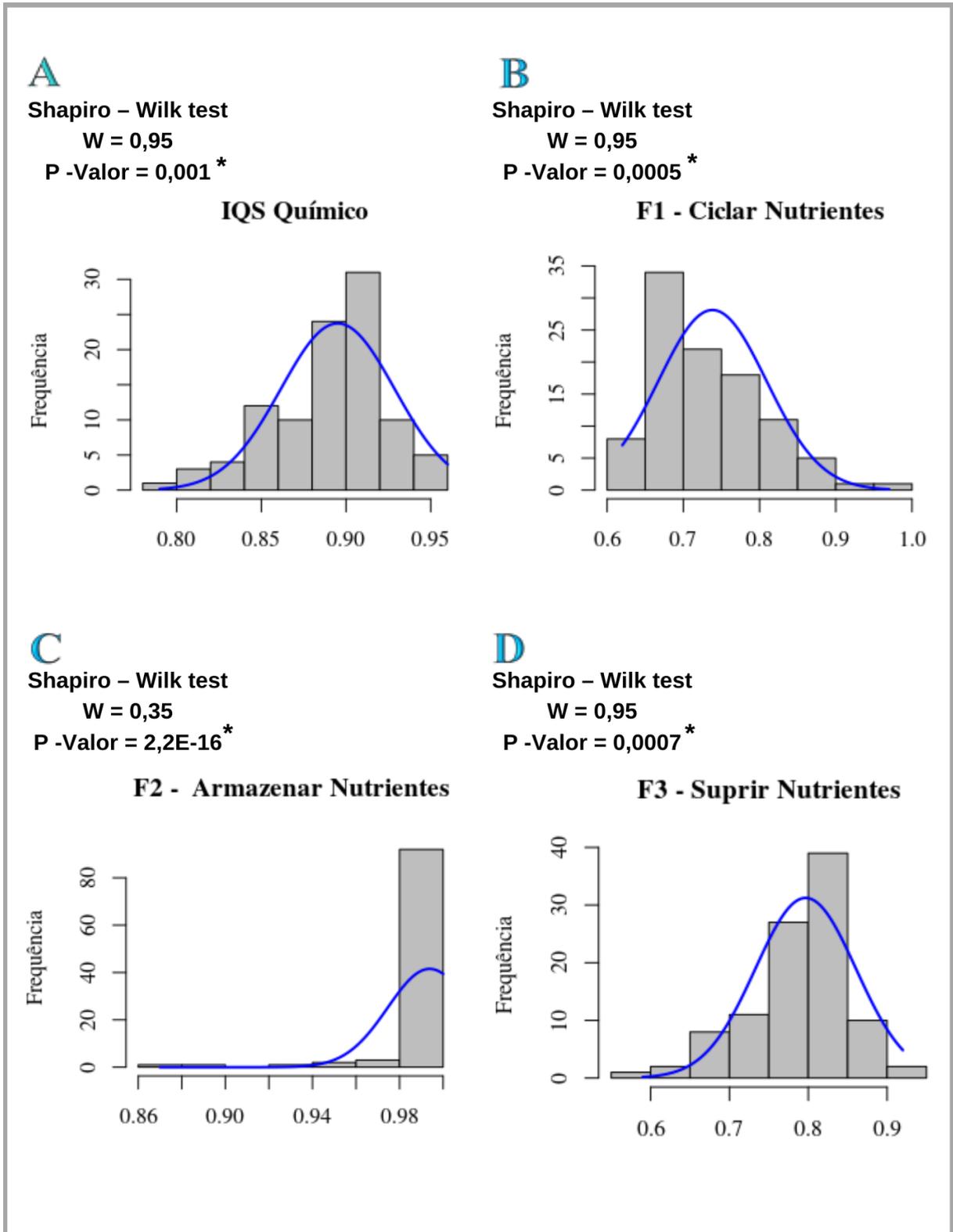
* $P \leq 0,05$ Rejeita H_0 :

^{NS} $P \geq 0,05$ Aceita H_0 .

$\left\{ \begin{array}{l} H_0 = \text{os dados seguem distribuição Normal;} \\ H_A = \text{os dados NÃO seguem distribuição Normal.} \end{array} \right.$

Fonte: Autor (2023).

Figura 09 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) IQs Químico; B) F1 – Ciclar Nutrientes; C) F2 – Armazenar Nutrientes; D) F3 – Suprir Nutrientes.



* $P \leq 0,05$ Rejeita H_0 :

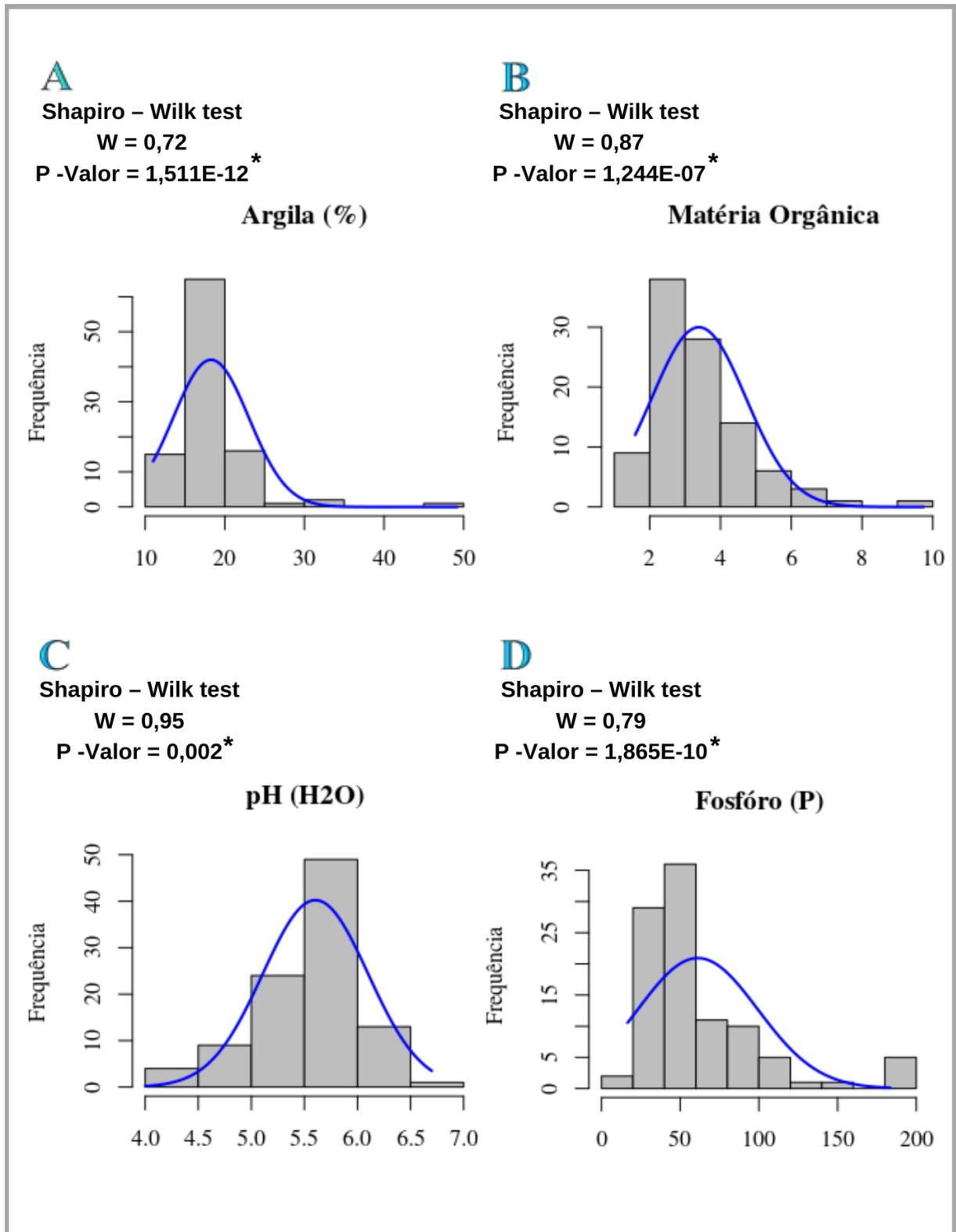
NS $P \geq 0,05$ Aceita H_0 .

{ H_0 = os dados seguem distribuição Normal;

{ H_A = os dados NÃO seguem distribuição Normal.

Fonte: Autor (2023).

Figura 10 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) Argila (%); B) Matéria Orgânica; C) pH (H₂O); D) Fósforo (P).



* $P < 0,05$ Rejeita H₀:

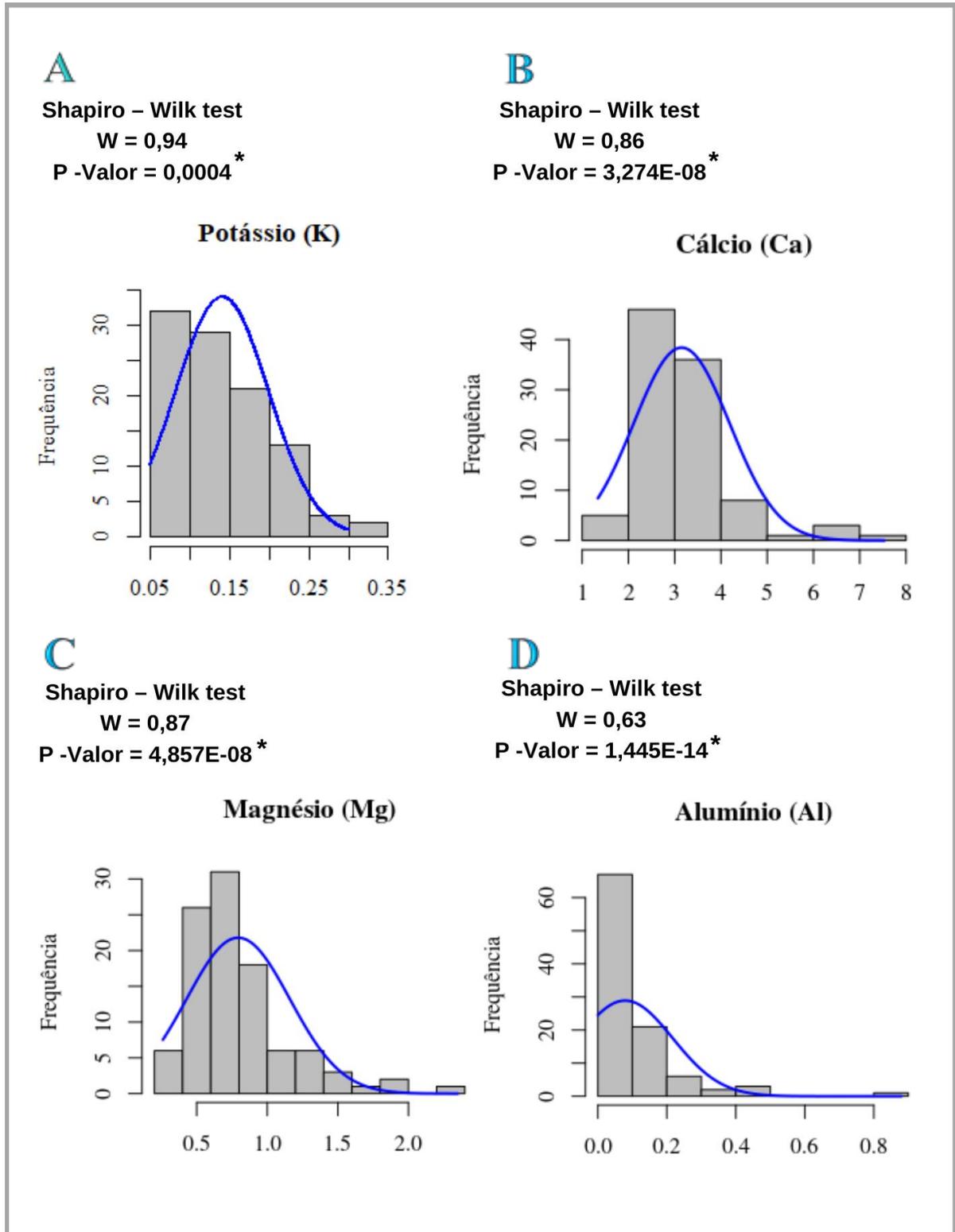
^{NS} $P \geq 0,05$ Aceita H₀.

{ H₀ = os dados seguem distribuição Normal;

{ H_A = os dados NÃO seguem distribuição Normal.

Fonte: Autor (2023).

Figura 11 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) Potássio (K); B) Cálcio (Ca); C) Magnésio (Mg); D) Alumínio (Al).



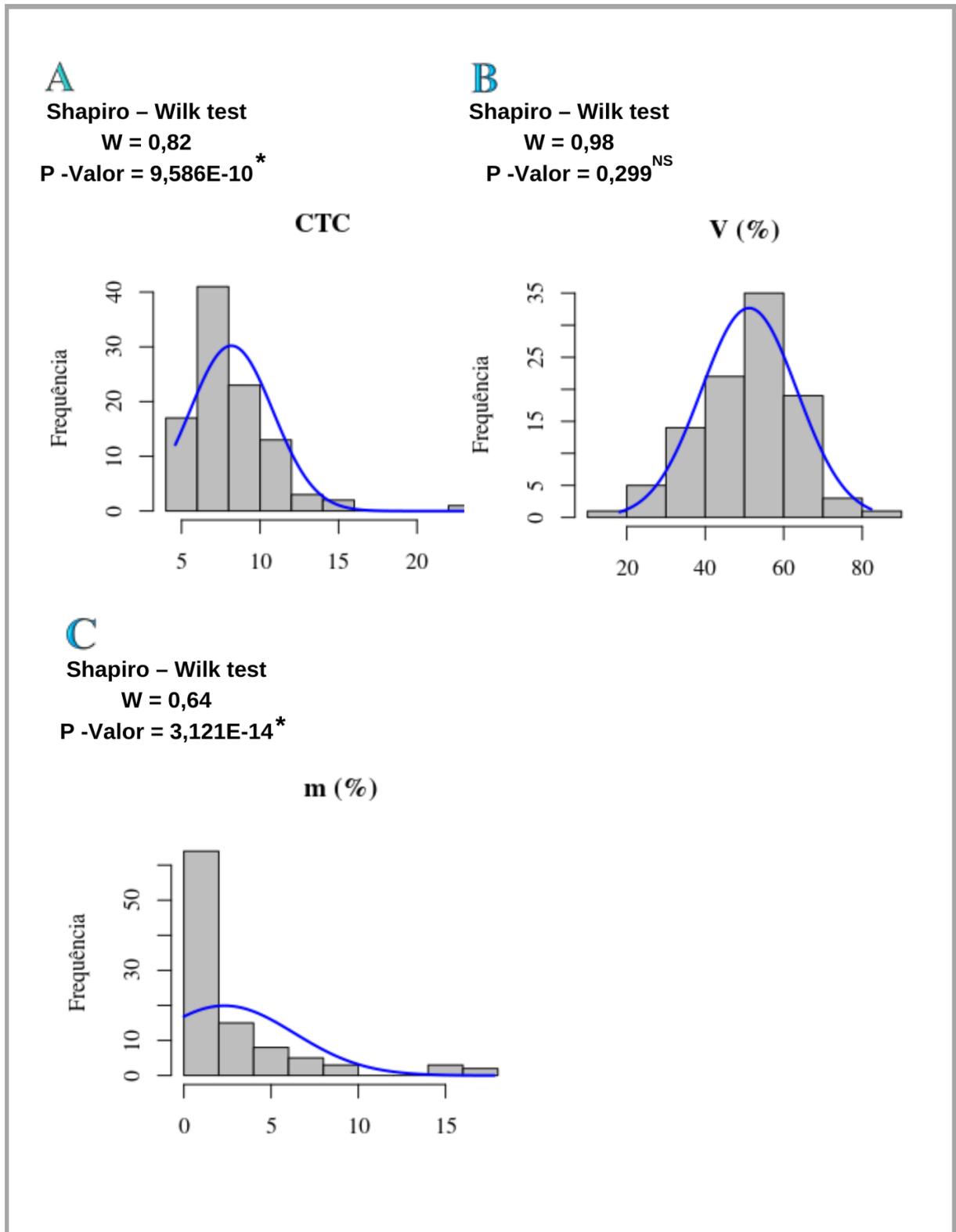
* $P \leq 0,05$ Rejeita H_0 :

NS $P \geq 0,05$ Aceita H_0 .

$\left\{ \begin{array}{l} H_0 = \text{os dados seguem distribuição Normal;} \\ H_A = \text{os dados NÃO seguem distribuição Normal.} \end{array} \right.$

Fonte: Autor (2023).

Figura 12 – Histograma de frequência dos Atributos da Bioanálise da Embrapa (BioAS) – A) CTC; B) V (%); C) m (%).



* $P \leq 0,05$ Rejeita H_0 :

^{NS} $P \geq 0,05$ Aceita H_0 .

$\left\{ \begin{array}{l} H_0 = \text{os dados seguem distribuição Normal;} \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} H_A = \text{os dados NÃO seguem distribuição Normal.} \end{array} \right.$

Fonte: Autor (2023).

Pela forma dos histogramas e pelos resultados obtidos do teste de normalidade, os dados sugerem uma significativa variabilidade espacial (MOLIN *et al.*, 2015; YAMAMOTO, 2020). Essa variabilidade pode ser atribuída, possivelmente, a algumas práticas de manejo do plantio, tais como a correção tardia do pH do solo, resultando na impossibilidade de incorporação adequada do calcário e do gesso agrícola ao solo, e a aplicação de adubo superficialmente sobre o solo.

Esses fatores em conjunto, aliados aos índices pluviométricos elevados da área, desempenham um papel significativo na dispersão dos elementos e na notável variabilidade espacial observada. Entretanto, é importante considerar que essa heterogeneidade pode estar intrinsecamente ligada às características naturais do próprio solo. Isso é sugerido pelos teores de argila presentes no solo, os quais também não apresentaram uma distribuição de dados que segue o padrão normal.

2.3.1.2 Estatística Descritiva

Ao analisar o coeficiente de variação (CV) (Tabela 01), os dados referentes aos atributos IQS, FertBio, IQS Biológico, IQS Químico, F1 – Ciclar Nutrientes, F2 – Armazenar Nutrientes, F3 – Suprir Nutrientes, pH (H₂O), Al (cmol_c/dm³) e m (%) demonstram uma alta precisão, sendo o CV < 10% (PIMENTEL GOMES, 2000), indicando uma dispersão reduzida em relação à tendência central.

Tabela 01 – Estatística descritiva dos atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo em profundidade de 0 – 0,1 m.

Variáveis	Mediana	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima	Curtose	Assimetria	CV (%)
Arilsulfatase	159,5	176,08	63,44	11	325	-0,03	0,46	39,77
β-glicosidase	31	37,01	29,73	16	302	60,25	7,13	95,90
IQS FertBio	0,84	0,84	0,04	0,75	0,92	-0,48	-0,18	4,76
IQS Biológico	0,72	0,74	0,07	0,62	0,97	0,13	0,77	9,72
IQS Químico	0,9	0,9	0,03	0,79	0,96	0,25	-0,72	3,33
F1 - Ciclar Nutrientes	0,72	0,74	0,07	0,62	0,97	0,13	0,77	9,72
F2 - Armazenar Nutrientes	1	0,99	0,02	0,87	1	24,19	-4,73	2,00
F3 - Suprir Nutrientes	0,81	0,8	0,06	0,59	0,92	0,59	-0,81	7,41
Argila (%)	17,2	18,27	4,75	11	49,2	17,24	3,36	27,62
MO (%)	3,08	3,39	1,33	1,59	9,74	4,38	1,67	43,18
pH (H ₂ O)	5,7	5,6	0,5	4	6,7	0,75	-0,77	8,77
P (mg/dm ³)	48,4	61,2	38,13	16,6	183,4	3,03	1,79	78,78
K (cmol _c /dm ³)	0,13	0,14	0,06	0,05	0,3	-0,25	0,7	44,46

Ca (cmol _C /dm ³)	2,92	3,15	1,04	1,34	7,53	4,1	1,72	35,62
Mg (cmol _C /dm ³)	0,69	0,79	0,37	0,26	2,35	2,95	1,57	53,62
Al (cmol _C /dm ³)	0	0,08	0,14	0	0,88	10,79	2,79	0,00
V (%)	51,95	51,2	12,22	18,2	82,3	0,05	-0,25	23,52
m (%)	0	2,33	4,01	0	17,8	4,54	2,15	0,00

Fonte: Autor (2023).

Por outro lado, ao examinar os componentes Arilsulfatase, β -glicosidase, MO (%), P (mg/dm³), K (cmol_C/dm³), Ca (cmol_C/dm³), Mg (cmol_C/dm³) e CTC (cmol_C/dm³), constatou-se a ocorrência de valores de CV que excedem o limiar de 30%. Esses resultados indicam a possibilidade de haver valores discrepantes que podem comprometer o ajuste adequado do semivariograma experimental (MOLIN *et al.*, 2015). Nesse sentido, torna-se pertinente considerar a exclusão desses pontos atípicos e/ou transformações de dados, em caso de inadequação do ajuste semivariográfico, para garantir uma modelagem geoespacial mais precisa e confiável, contribuindo assim para uma interpretação mais acurada dos padrões espaciais dos atributos em análise.

Na análise da coluna referente ao coeficiente de assimetria (Tabela 02), constata-se que as variáveis Arilsulfatase, IQS FertBio, IQS Biológico, IQS Químico, F1 – Ciclar Nutrientes, F3 – Suprir Nutrientes, pH (H₂O), K (cmol_C/dm³) e V (%) exibiram valores de assimetria no intervalo -1 a 1. Esses atributos demonstram uma maior proximidade com a distribuição normal, sugerindo uma distribuição mais simétrica e equilibrada dessas variáveis.

No caso das variáveis β -glicosidase, F2 – Armazenar Nutrientes, Argila (%), MO (%), P (mg/dm³), Ca (cmol_C/dm³), Mg (cmol_C/dm³), Al (cmol_C/dm³) e m (%), os valores de assimetria variaram de -4,73 a 7,13. Essa ampla variação indica uma distribuição de valores altamente concentrada e com caudas alongadas, sugerindo a presença de dados extremos e atípicos. Esses resultados destacam a necessidade de uma abordagem cuidadosa na modelagem do semivariograma experimental para essas variáveis, uma vez que sua distribuição atípica pode afetar a precisão dos resultados.

No que diz respeito aos coeficientes de curtose, observa-se que as variáveis Arilsulfatase, IQS FertBio, IQS Biológico, IQS Químico, F1 – Ciclar Nutrientes, F3 – Suprir Nutrientes, pH (H₂O), K (cmol_C/dm³) e V (%) apresentaram valores de curtose situados dentro do intervalo entre -1 e 1. Isso indica um certo grau de alongamento da distribuição para as variáveis com valores positivos, o que é conhecido como distribuição leptocúrtica, e um certo grau de achatamento para as variáveis com valores negativos, denominadas platicúrticas

(YAMAMOTO, 2020). No entanto, essas características não são motivos de preocupações para essas variáveis, uma vez que não compromete com certa intensidade as análises posteriores.

Por outro lado, é importante ressaltar que as variáveis β -glicosidase, F2 - Armazenar Nutrientes, Argila (%), MO (%), P (mg/dm^3), Ca ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$), Mg ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$), Al ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) e m (%) demonstraram valores elevados de curtose, variando de 2,95 a 60,25. É interessante observar que essas variáveis também exibiram valores elevados de assimetria, conforme mencionado anteriormente. Essa observação levanta a mesma preocupação em relação a essas variáveis, uma vez que seus coeficientes de curtose também podem refletir distribuições concentradas ou alongadas. Portanto, é necessário considerar esses aspectos ao modelar o semivariograma experimental, a fim de garantir uma adequada representação espacial dessas variáveis e obter resultados confiáveis e robustos.

2.3.2 Análise de Correlação

Tanto as enzimas quanto os índices de qualidade do solo (IQs), bem como as Funções do solo, possuem relações significativas (Tabela 02), já que foram criadas por meio de uma sequência de interações (MENDES *et al.*, 2021). Em relação a Arilsulfatase, apresenta-se uma correlação positiva com os elementos Ca e Mg. Isso se deve à aplicação de práticas como gesso agrícola e calagem, que resultam no aumento dos teores de sulfato, cálcio e magnésio no solo. Estudos têm demonstrado essa correlação positiva entre a aplicação de gesso agrícola e a atividade da enzima Arilsulfatase (NOGUEIRA e MELO, 2003).

A função F2 – Armazenar Nutrientes também exibe uma correlação positiva com variáveis como CTC e Matéria Orgânica. Essa relação deriva da própria composição intrínseca dessa função, que é construída a partir da combinação dessas duas variáveis distintas (MENDES *et al.*, 2021). Além disso, outras correlações bastante lógicas também se tornaram evidentes, como as correlações negativas entre pH e os teores de Al e Al + H, bem como a correlação positiva entre os elementos Ca e Mg.

Para a matéria orgânica (MO), exibe uma correlação positiva com a Capacidade de Troca Catiônica (CTC), isso se deve pela dissociação de prótons dos grupos RCOOH presentes na MO. Esse processo começa a partir de valores de pH da solução do solo iguais ou superiores a 3,0, resultando na geração de cargas negativas. Essas cargas negativas tendem a aumentar à medida que o pH da solução do solo aumenta, e o ponto de máxima de dissociação ocorre por volta de pH 9,0. Em pontos elevados de pH, como esse, a dissociação de grupos OH de compostos fenólicos também é mais acentuada (SILVA *et al.*, 2023).

Tabela 02 – Matriz de Correlação dos atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo em profundidade de 0 – 0,1 m.

	Argila (%)	Arisulfatase	Betaglicosidade	IQS FertBio	IQS Biológico	IQS Químico	F1	F2	F3	pH (H2O)	P	K	Ca	Mg	Al	Al + H	MO	CTC	V (%)	m (%)
Argila (%)		0.31**	0.41***	0.33***	0.25*	0.27**	0.25*	0.00	0.32**	0.18	0.31**	0.28**	0.37***	0.39***	-0.10	0.10	0.26**	0.32**	0.15	-0.13
Arisulfatase	0.31**		0.56***	0.74***	0.63***	0.53***	0.63**	0.14	0.50***	0.53***	0.38***	0.31**	0.63***	0.61***	-0.58***	-0.23*	0.17	0.15	0.57***	-0.59***
Betaglicosidad	0.41***	0.56***		0.74***	0.93***	0.28**	0.93**	0.41***	0.21*	0.17	0.20*	0.48***	0.59***	0.55***	-0.16	0.24*	0.55***	0.58***	0.19	-0.17
IQS FertBio	0.33***	0.74***	0.74***		0.79***	0.78***	0.79**	0.28**	0.73***	0.42***	0.40***	0.51***	0.73***	0.71***	-0.35***	-0.08	0.38***	0.36***	0.50***	-0.37***
IQS Biológico	0.25*	0.63***	0.93***	0.79***		0.31**	1.00**	0.39***	0.25*	0.24*	0.24*	0.49***	0.56***	0.56***	-0.24*	0.15	0.48***	0.50***	0.27**	-0.25*
IQS Químico	0.27**	0.53***	0.28**	0.78***	0.31**		0.31**	0.14	0.96***	0.42***	0.41***	0.35***	0.58***	0.55***	-0.26*	-0.29**	0.15	0.10	0.53***	-0.28**
F1	0.25*	0.63***	0.93***	0.79***	1.00***	0.31**		0.39***	0.25*	0.24*	0.24*	0.49***	0.56***	0.56***	-0.24*	0.15	0.48***	0.50***	0.27**	-0.25*
F2	0.00	0.14	0.41***	0.28**	0.39***	0.14	0.39***		-0.02	-0.23*	0.15	0.29**	0.41***	0.33***	0.13	0.53***	0.69***	0.70***	-0.18	0.11
F3	0.32**	0.50***	0.21*	0.73***	0.25*	0.96***	0.25*	-0.02		0.47***	0.40***	0.33***	0.53***	0.51***	-0.27**	-0.38***	0.05	-0.00	0.58***	-0.29**
pH (H2O)	0.18	0.53***	0.17	0.42***	0.24*	0.42***	0.24*	-0.23*	0.47***		0.32**	0.24*	0.47***	0.54***	-0.85***	-0.76***	-0.27**	-0.29**	0.93***	-0.85***
P	0.31**	0.38***	0.20*	0.40***	0.24*	0.41***	0.24*	0.15	0.40***	0.32**		0.38***	0.49***	0.49***	-0.31**	-0.08	0.22*	0.23*	0.35***	-0.33***
K	0.28**	0.31**	0.48***	0.51***	0.49***	0.35***	0.49**	0.29**	0.33***	0.24*	0.38***		0.44***	0.50***	-0.16	0.11	0.36***	0.40***	0.20*	-0.19
Ca	0.37***	0.63***	0.59***	0.73***	0.56***	0.58***	0.56**	0.41***	0.53***	0.47***	0.49***	0.44***		0.85***	-0.44***	-0.00	0.58***	0.57***	0.57***	-0.49***
Mg	0.39***	0.61***	0.55***	0.71***	0.56***	0.55***	0.56**	0.33***	0.51***	0.54***	0.49***	0.50***	0.85***		-0.51***	-0.06	0.49***	0.48***	0.58***	-0.54***
Al	-0.10	-0.58***	-0.16	-0.35***	-0.24*	-0.26*	-0.24*	0.13	-0.27**	-0.85***	-0.31**	-0.16	-0.44***	-0.51***		0.62***	0.27**	0.26**	-0.79***	0.99***
Al + H	0.10	-0.23*	0.24*	-0.08	0.15	-0.29**	0.15	0.53***	-0.38***	-0.76***	-0.08	0.11	-0.00	-0.06	0.62***		0.69***	0.76***	-0.77***	0.60***
MO	0.26**	0.17	0.55***	0.38***	0.48***	0.15	0.48**	0.69***	0.05	-0.27**	0.22*	0.36***	0.58***	0.49***	0.27**	0.69***		0.96***	-0.19	0.23*
CTC	0.32**	0.15	0.58***	0.36***	0.50***	0.10	0.50**	0.70***	-0.00	-0.29**	0.23*	0.40***	0.57***	0.48***	0.26**	0.76***	0.96***		-0.25*	0.22*
V (%)	0.15	0.57***	0.19	0.50***	0.27**	0.53***	0.27**	-0.18	0.58***	0.93***	0.35***	0.20*	0.57***	0.58***	-0.79***	-0.77***	-0.19	-0.25*		-0.79***
m (%)	-0.13	-0.59***	-0.17	-0.37***	-0.25*	-0.28**	-0.25*	0.11	-0.29**	-0.85***	-0.33***	-0.19	-0.49***	-0.54***	0.99***	0.60***	0.23*	0.22*	-0.79***	

Nível de significância da Correlação de Spearman: * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq 0,001$.

Fonte: Autor (2023).

2.3.3 Geoestatística

Para a adequação do semivariograma experimental e ajuste do semivariograma teórico, houve a exclusão de outliers das seguintes variáveis: β -glicosidase, IQS Químico, Potássio (K), Alumínio (Al) e Saturação por Alumínio (m%). Posteriormente, todos os dados foram devidamente ajustados aos modelos de semivariograma mais comumente empregados na análise geoestatística, sendo o modelo esférico, exponencial e gaussiano. Esses ajustes confirmam a presença de uma dependência espacial entre as variáveis, conforme demonstram os dados na Tabela 03. Essa dependência espacial indica que os padrões observados nas variáveis não são aleatórios, revelando uma estruturação espacial subjacente (YAMAMOTO e LANDIN, 2013; YAMAMOTO 2020).

Tabela 03 – Parâmetros geoestatísticos dos atributos biológicos, químicos e granulométricos do solo e de Incidência de AF em uma área de plantação de Palma de Óleo de 9 anos no município de Igarapé-açu, no Nordeste Paraense

Variável	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A (m)	R ²	IDE	GDE	Exclusão de Outlier
AF	Esférico	0,159	0,165	60,11	0,952	0,964	Fraco	Não
Arilsulfatase	Esférico	2004,82	3948,98	98,29	0,921	0,508	Moderada	Não
β -glicosidase	Exponencial	73,55	184,04	250,23	0,953	0,4	Moderada	Sim
IQS FertBio	Exponencial	0	0,001	72,1	0,725	0	Forte	Não
IQS Biológico	Exponencial	0,003	0,006	366,76	0,945	0,5	Moderada	Não
IQS Químico	Exponencial	0	0,001	128,001	0,819	0	Forte	Sim
F1 - Ciclar								
Nutrientes	Exponencial	0,003	0,006	366,76	0,942	0,5	Moderada	Não
F2 - Armazenar								
Nutrientes	Esférico	0	0,001	128,34	0,976	0	Forte	Não
F3 - Suprir								
Nutrientes	Exponencial	0	0,004	105,95	0,808	0	Forte	Não
Argila (%)	Exponencial	6,505	29,483	278,073	0,871	0,22	Forte	Não
MO (%)	Exponencial	0	202,44	126,994	0,02	0	Forte	Não
pH (H ₂ O)	Exponencial	0,031	0,256	105,73	0,985	0,12	Forte	Não
P (mg/dm ³)	Gaussiano	1057,972	1659,163	335,17	0,94	0,64	Moderada	Não
K (cmol _c /dm ³)	Exponencial	302,404	454,203	218,626	0,902	0,67	Moderada	Sim
Ca (cmol _c /dm ³)	Gaussiano	0,115	1,001	77,424	0,946	0,11	Forte	Não
Mg (cmol _c /dm ³)	Exponencial	0	0,13	117,279	0,891	0	Forte	Não
Al (cmol _c dm ⁻³)	Gaussiano	0	0,008	61,284	0,953	0	Forte	Sim
CTC (cmol _c /dm ³)	Exponencial	1,933	8,517	222,821	0,906	0,23	Forte	Não
m (%)	Esférico	0	6,719	67,294	0,9	0	Forte	Sim
V (%)	Esférico	0	151,123	97,67	0,919	0	Forte	Não

C₀: Efeito pepita; C₀+ C: Patamar; A (m): Alcance; R²: Coeficiente de Determinação; IDE: Índice de Dependência Espacial; GDE: Grau de Dependência Espacial.

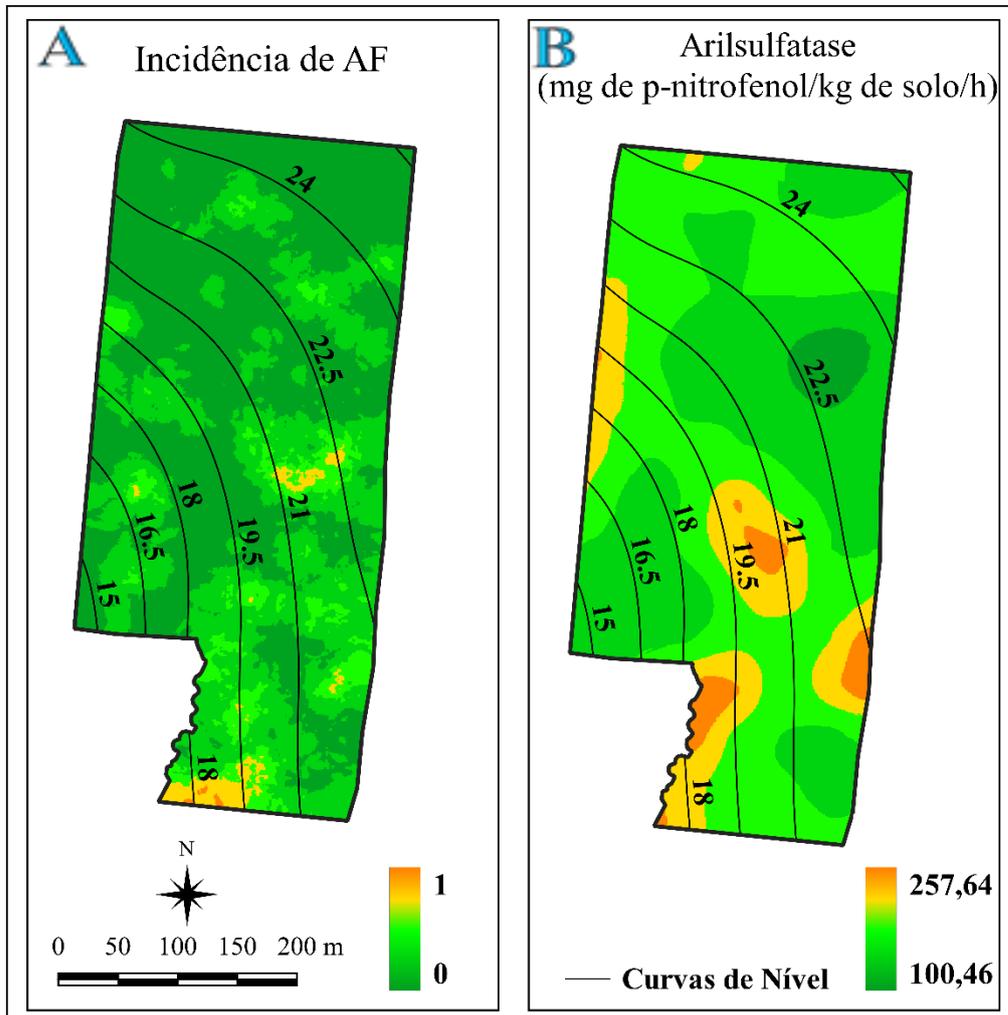
Fonte: Autor (2023).

Além disso, os resultados reforçam a adequação da malha amostral utilizada no estudo, indicando que a distribuição dos pontos de amostragem foi cuidadosamente adensada para capturar a variabilidade presente na área de estudo. Dessa forma, a identificação da dependência espacial entre as variáveis e a confirmação da adequação da malha amostral fornecem uma base sólida para a interpretação e mapeamento dos padrões geográficos. Essas informações são de grande relevância para as análises posteriores, contribuindo para uma abordagem mais precisa e eficaz no contexto do estudo do AF.

2.3.4 Análise Viso-Espacial entre os Mapas de Predição da BioAs, MDT e a Incidência do AF

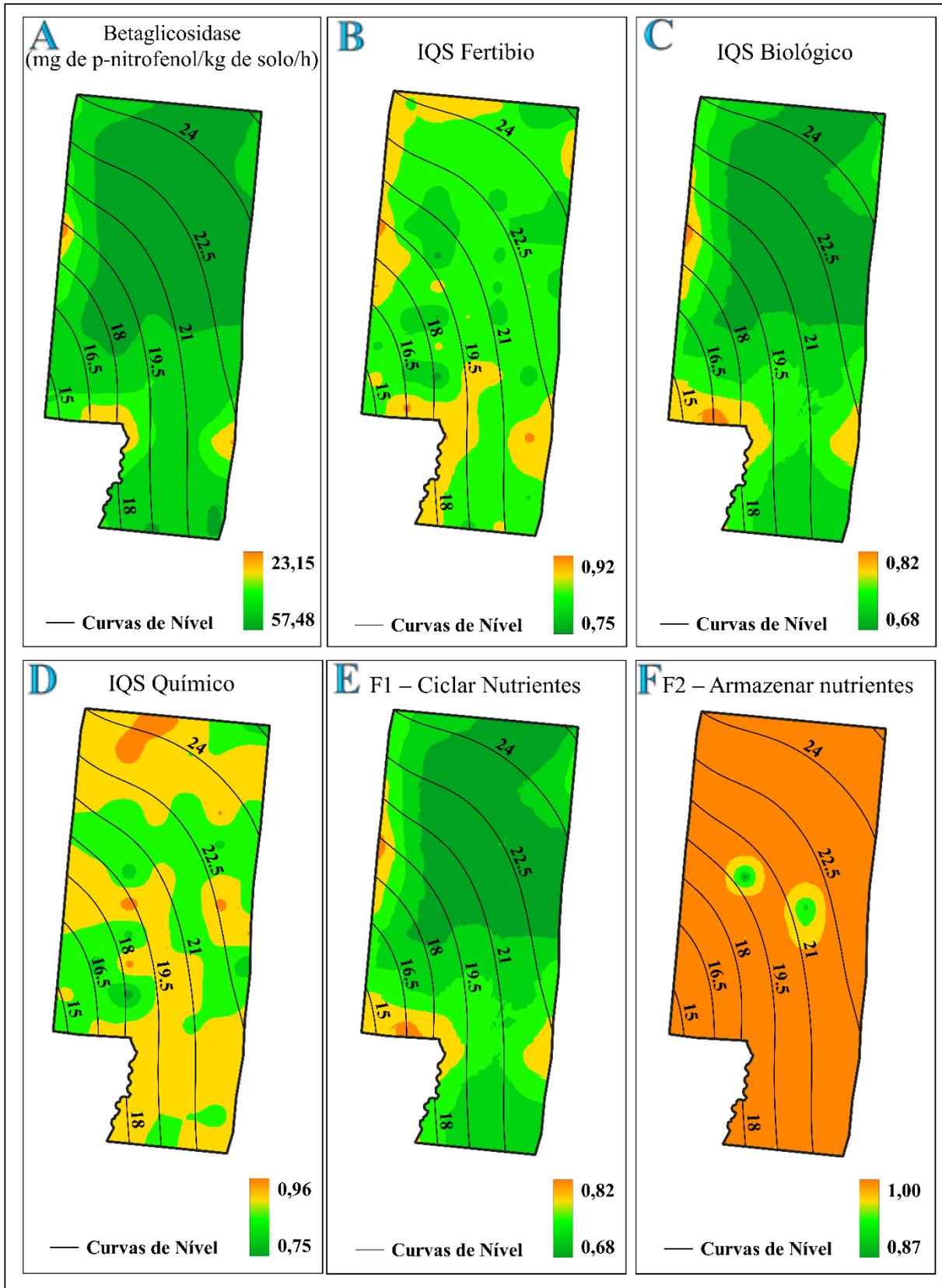
Ao analisar as Figuras 13, 14, 15 e 16, é possível observar o mapa de predição da incidência do Amarelecimento Fatal (AF), bem como o as curvas de níveis, representando as cotas altimétricas, e os mapas de predição dos atributos da BioAs. Nota-se que não se identificou um padrão claro e evidente de associação espacial entre os atributos avaliados e a incidência de AF. Essa falta de padrão pode ser atribuída à existência de variabilidade genética na palma de óleo, como destacado por estudos anteriores (RAFII *et al.*, 2002; OKOYE, 2007; GOMES JUNIOR *et al.*, 2014), que observaram uma ampla gama de manifestações fenotípicas devido à grande variabilidade genética presente nesta variedade.

Figura 13 – Mapas de Predição da Incidência do AF e atributos da BioAs – A) Mapa de predição da incidência do Amarelecimento Fatal (AF); B) Arilsulfatase.



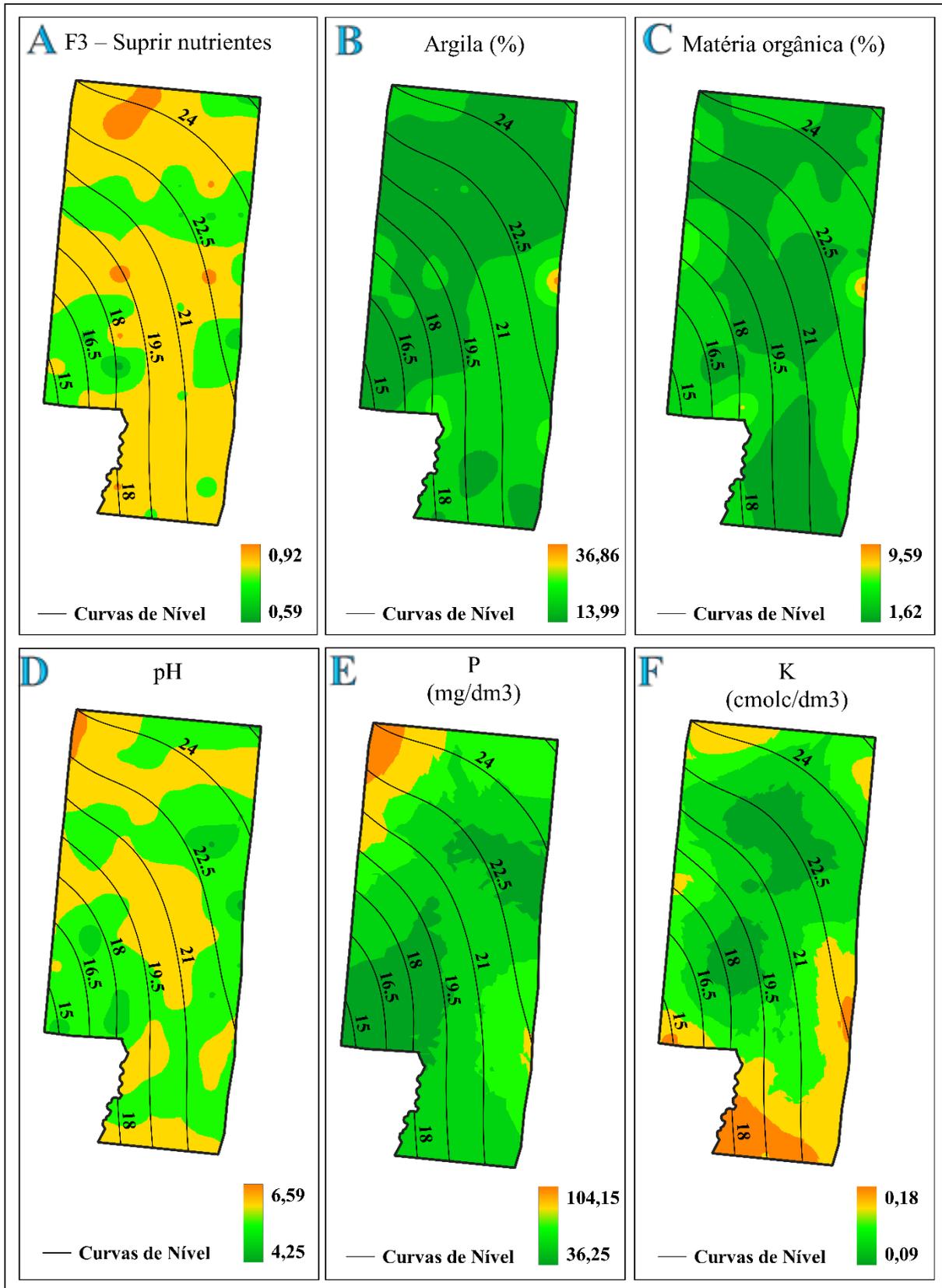
Fonte: Autor (2023).

Figura 14 – Mapas de predição dos atributos da BioAs – A) β -glicosidase; B) IQs Fertibio; C) IQs Biológico; D) IQs Químico; E) F1 – Ciclar Nutrientes; F) F2 – Armazenar Nutrientes.



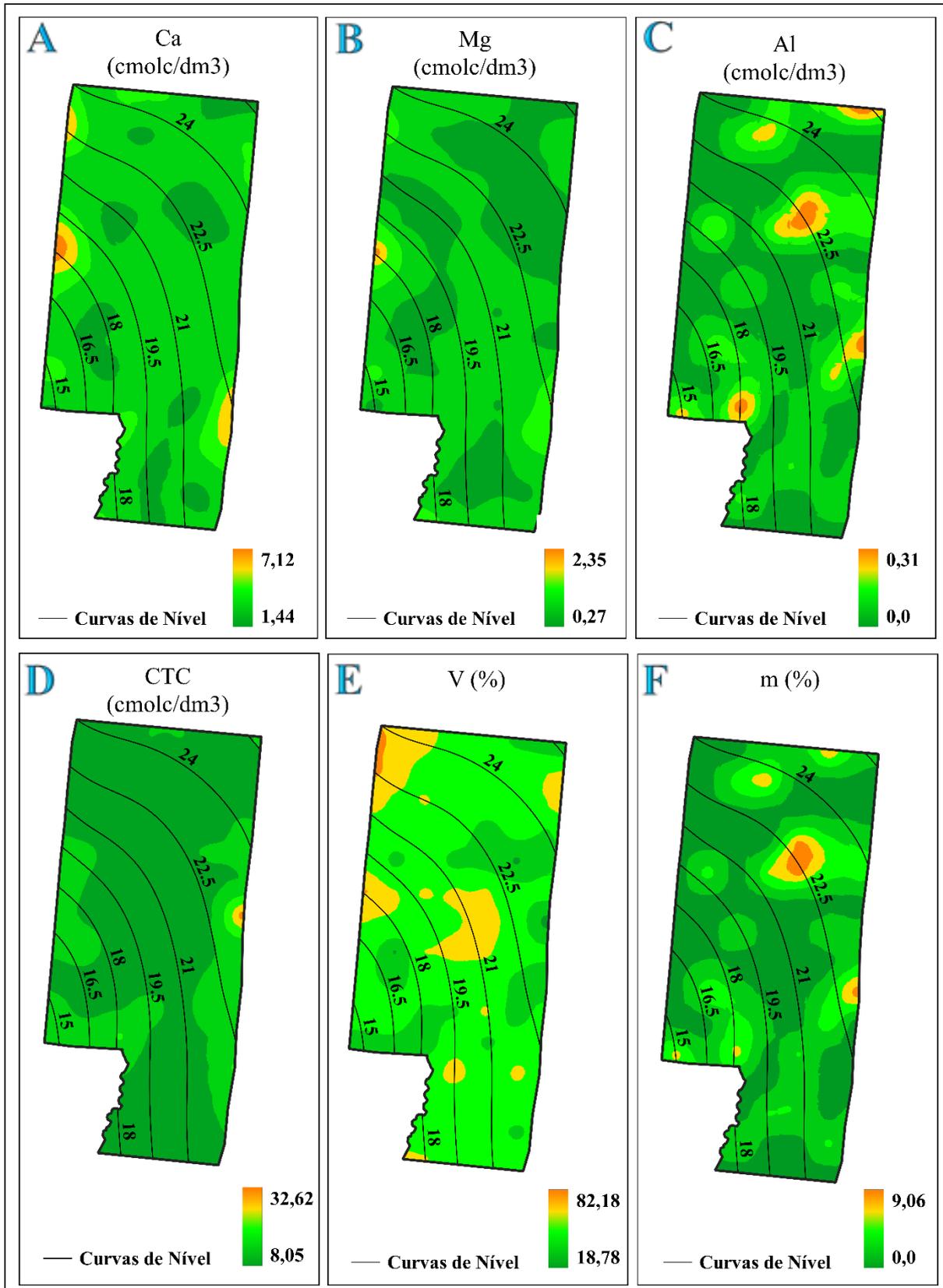
Fonte: Autor (2023).

Figura 15 – Mapas de predição dos atributos da BioAs – A) F3 – Suprir Nutrientes; B) Argila (%); C) Matéria Orgânica; D) pH (H₂O); E) Fósforo (P); F) Potássio (K).



Fonte: Autor (2023).

Figura 16 – Mapas de predição dos atributos da BioAs – A) Cálcio (Ca); B) Magnésio (Mg); C) Alumínio (Al); D) CTC; E) V (%); F) m (%).



Fonte: Autor (2023).

A variedade Tenera da palma de óleo é resultado do cruzamento de populações, principalmente de matrizes das espécies Dura e Pisifera, o que lhe confere uma expressiva diversidade fenotípica (ALVES *et al.*, 2013). Essa diversidade é evidente ao observar diferenças notáveis nos plantios. As plantas apresentam alturas distintas, medidas de troncos variadas e teores discrepantes de gordura saturada nos frutos, variando de uma planta para outra.

Dessa forma, a variabilidade genética da palma de óleo pode resultar na ausência de manifestação do AF em alguns indivíduos, mesmo quando eles estão sujeitos às mesmas condições de solo. Isso sugere que fatores genéticos desempenham um papel significativo na suscetibilidade à doença, e a relação com os atributos do solo não é tão direta ou previsível.

Essa constatação ressalta a importância de considerar tanto os fatores genéticos quanto as características do solo no manejo e na prevenção do Amarelecimento Fatal. Além disso, ressalta-se a necessidade de estudos adicionais para compreender melhor os mecanismos genéticos envolvidos na resistência ou suscetibilidade à doença, a fim de desenvolver estratégias mais eficazes para mitigar seus impactos do AF na cultura da palma de óleo.

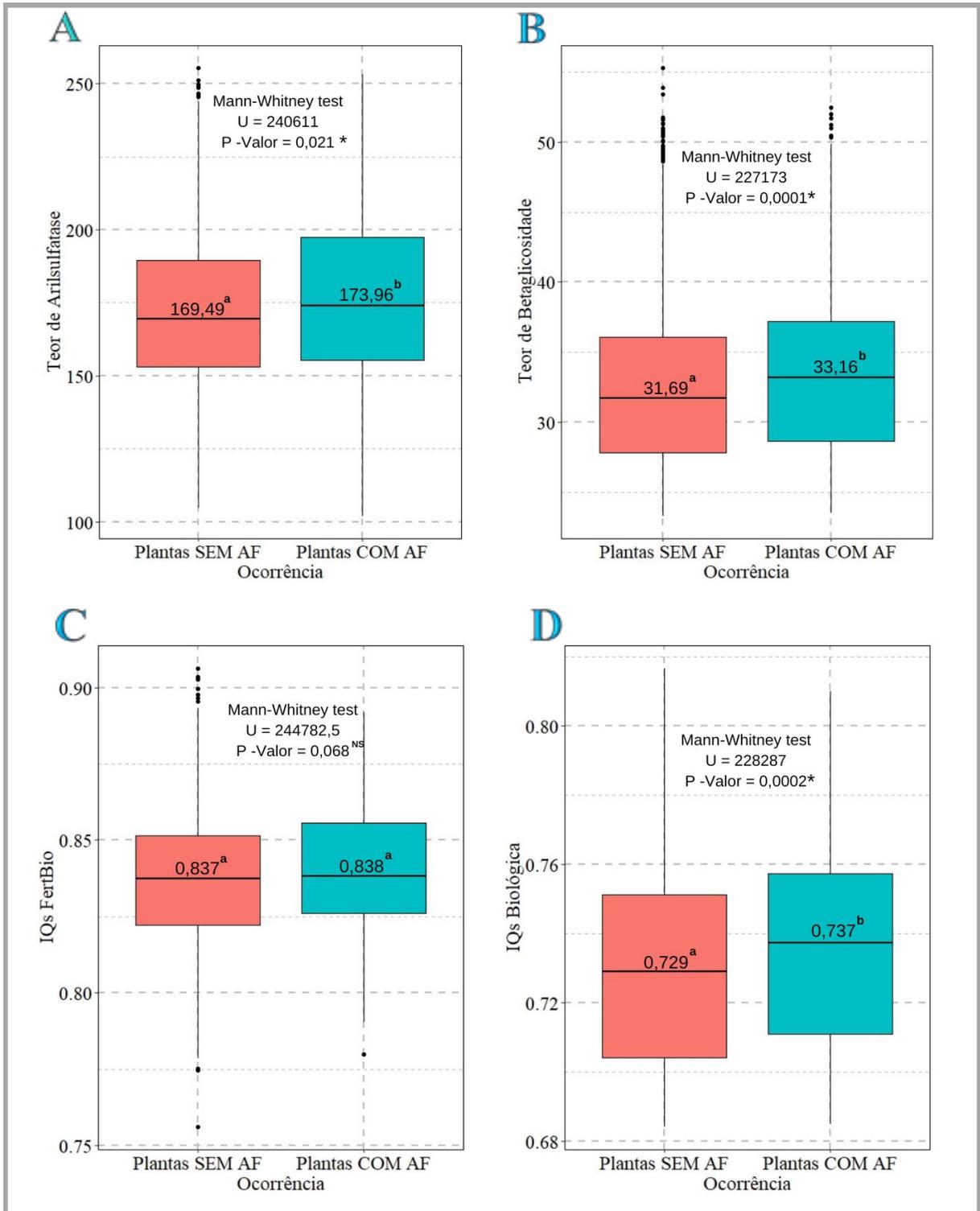
Dessa forma, visando uma análise mais detalhada, foi adotada uma abordagem pontual dos dados para avaliar a incidência do Amarelecimento Fatal (AF) da palma de óleo. Para isso, os dados especializados dos atributos da BioAS e do Modelo Digital de Terreno (MDT) foram extraídos para cada planta na área de estudo, permitindo a realização de comparações entre as plantas saudáveis e as afetadas pela doença.

Essa abordagem pontual permitiu um exame minucioso das características dos atributos da BioAS e da altitude do terreno em relação à presença ou ausência do Amarelecimento Fatal em cada planta individualmente. Dessa forma, essa análise comparativa possibilitou identificar possíveis padrões ou diferenças significativas entre as plantas saudáveis e as afetadas pela doença, que serão expostos a seguir.

2.3.5 Atributos da BioAs e MDT vs Incidência do Amarelecimento Fatal (AF) da Palma de Óleo

Em áreas sujeitas à incidência de AF, observa-se uma maior expressividade nos seguintes atributos: IQS Biológico, F1 – Ciclagem de nutrientes, β -glicosidase, arilsulfatase, teor de potássio (K), teor de magnésio (Mg) e teor de argila. No entanto, as cotas altimétricas e os teores de fósforo exibem reduções nesses mesmos locais, como ilustrado nas Figuras 17, 18, 19, 20 e 21.

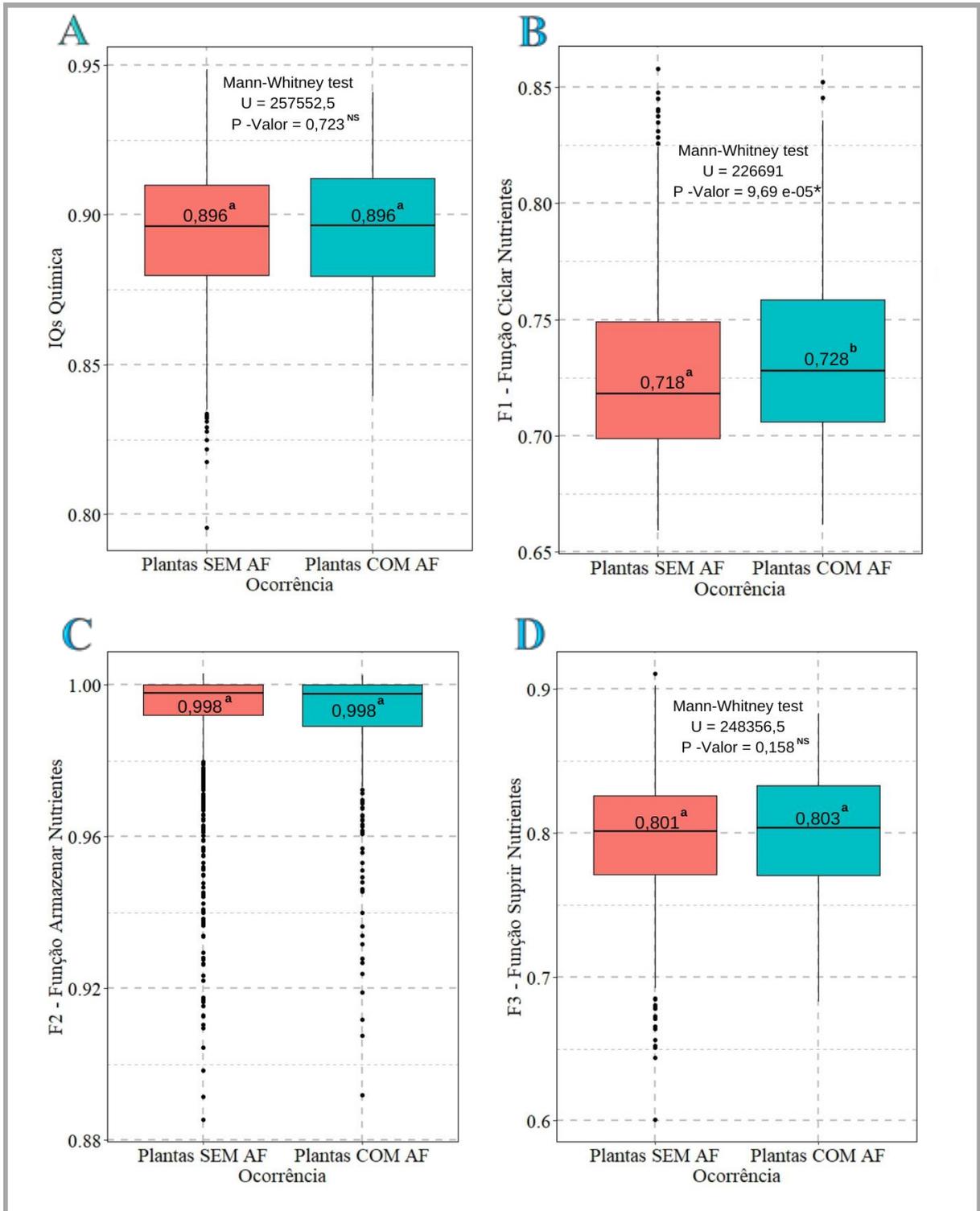
Figura 17 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) Teor de Arilsulfatase; B) Teor de β -glicosidase; C) IQs Fertbio; D) IQs Biológica.



● Outlier; Medianas seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Mann-Whitney a 5% de probabilidade; *Significativo, $P \leq 5\%$ de probabilidade pelo teste Mann-Whitney; ^{NS} $P > 5\%$ de probabilidade, NÃO significativo pelo teste de Mann-Whitney.

Fonte: Autor (2023).

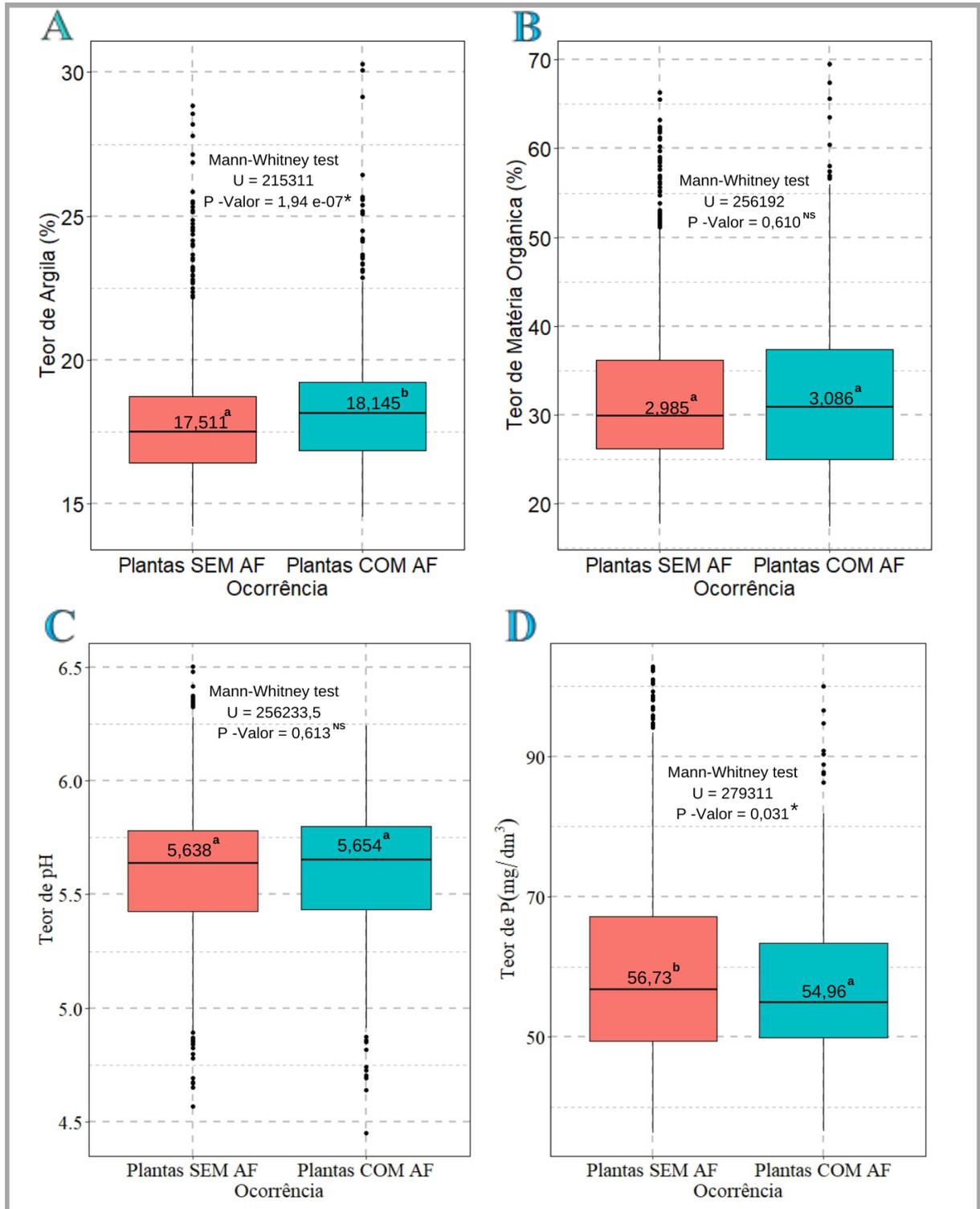
Figura 18 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) IQs Químico; B) F1 – Função Ciclar Nutrientes; C) F2 – Função Armazenar Nutrientes; D) F3 – Função Suprir Nutrientes.



● Outlier; Medianas seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Mann-Whitney a 5% de probabilidade; *Significativo, $P \leq 5\%$ de probabilidade pelo teste Mann-Whitney; ^{NS} $P > 5\%$ de probabilidade, NÃO significativo pelo teste de Mann-Whitney.

Fonte: Autor (2023).

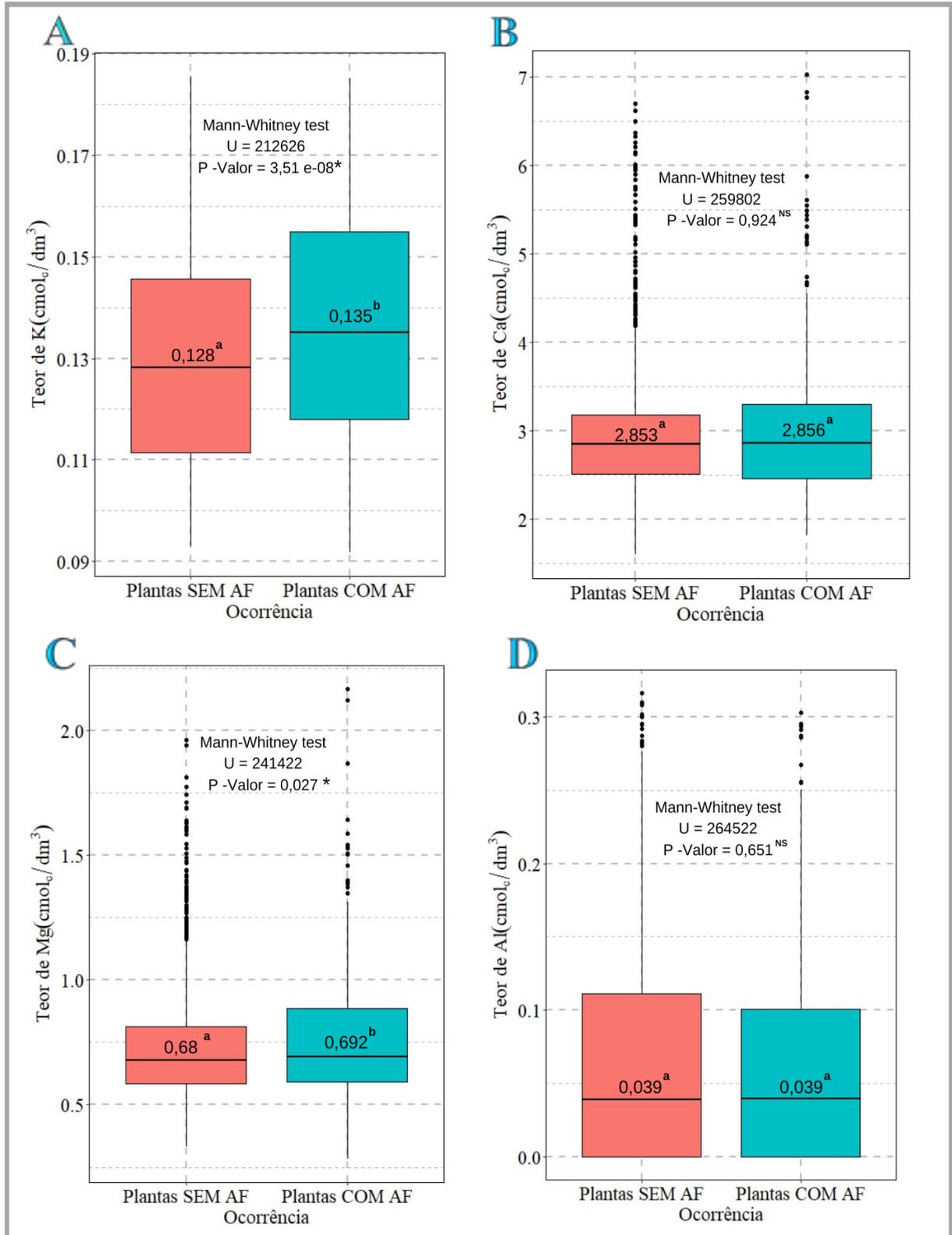
Figura 19 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) Teor de Argila (%); B) Teor de Matéria Orgânica (%); C) Teor de pH ; D) Teor de P (mg/dm³).



● Outlier; Medianas seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Mann-Whitney a 5% de probabilidade; *Significativo, $P \leq 5\%$ de probabilidade pelo teste Mann-Whitney; ^{NS} $P > 5\%$ de probabilidade, NÃO significativo pelo teste de Mann-Whitney.

Fonte: Autor (2023).

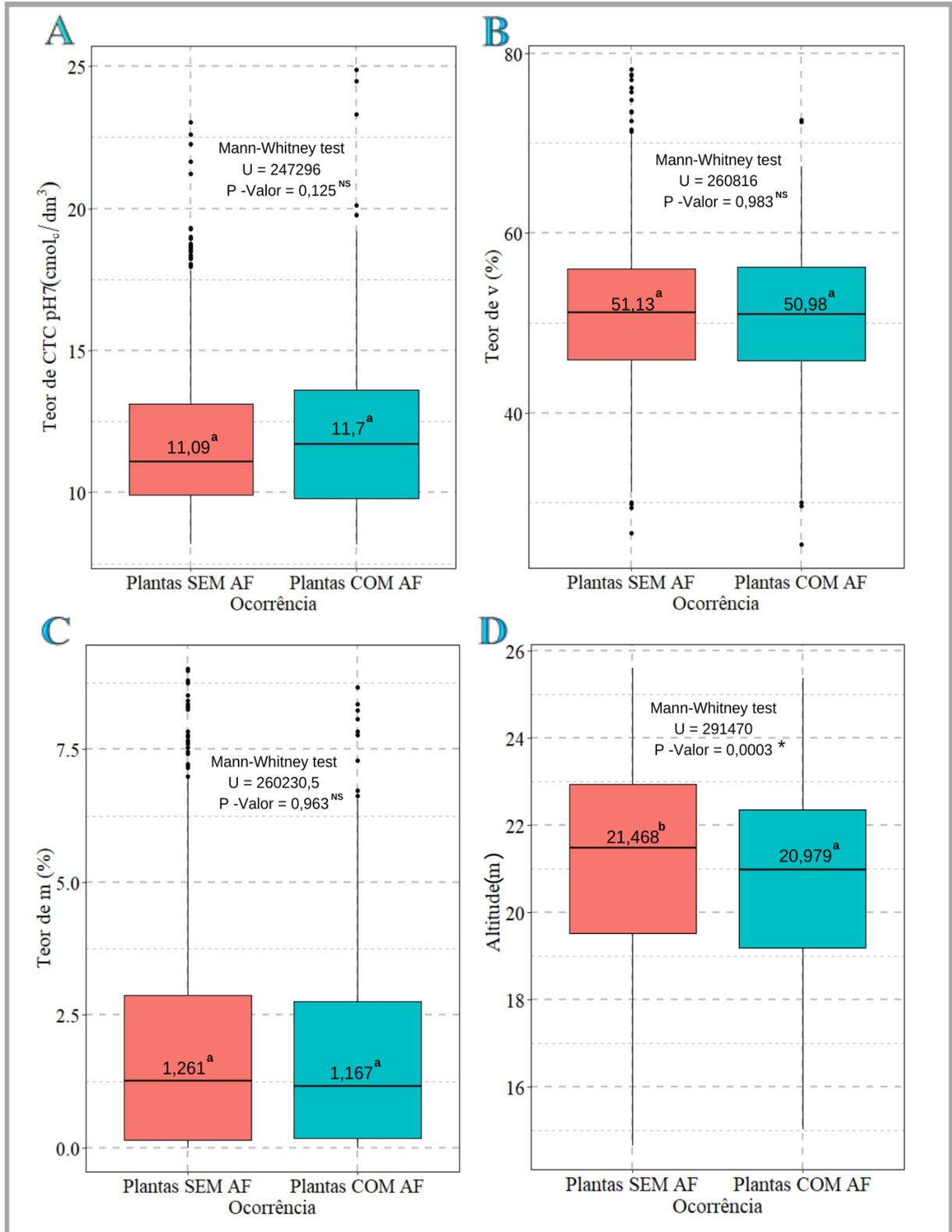
Figura 20 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) Teor de K (cmol_c/dm³); B) Teor de Ca (cmol_c/dm³); C) Teor de Mg (cmol_c/dm³); D) Teor de Al (cmol_c/dm³).



● Outlier; Medianas seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Mann-Whitney a 5% de probabilidade; *Significativo, $P \leq 5\%$ de probabilidade pelo teste Mann-Whitney; ^{NS} $P > 5\%$ de probabilidade, NÃO significativo pelo teste de Mann-Whitney.

Fonte: Autor (2023).

Figura 21 – Boxplot dos atributos da BioAs para plantas SEM AF e plantas COM AF – A) Teor de CTC Ph7 (cmol_c/ dm³); B) Teor de v (%); C) Teor de m (%); D) Altitude (m).



●Outlier; Medianas seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Mann-Whitney a 5% de probabilidade; *Significativo, $P \leq 5\%$ de probabilidade pelo teste Mann-Whitney; ^{NS} $P > 5\%$ de probabilidade, NÃO significativo pelo teste de Mann-Whitney.

Fonte: Autor (2023).

O IQS Biológico e a F1 – Ciclar nutrientes, com amplitudes semelhantes (0,68 a 0,82) (Figura 14 - C e E), foram classificados como altos ou muito altos conforme as categorias estabelecidas por Mendes *et al.* (2021). Dessa forma, os parâmetros IQS Biológico e F1 – Ciclagem de nutrientes, juntamente com as enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase, indicam que áreas com incidência de AF apresentam uma boa funcionalidade biológica, com uma estrutura saudável que favorece a biologia do solo, além de processos essenciais como ciclagem e mineralização de nutrientes, plenamente funcionais (MENDES *et al.*, 2021) demonstrando uma baixa probabilidade de hipóxia do solo.

Esse aumento da atividade biológica do solo possa estar relacionado à incorporação de biomassa proveniente da degradação das raízes terciárias e quaternárias da palma de óleo afetadas pelo AF. Quando a doença se instala, o sistema radicular tende a morrer, resultando no encurtamento da região colonizada pelas raízes (BOARI, 2008). A podridão da raiz é o principal sintoma do Amarelecimento Fatal (AF), manifestando-se antes dos sintomas foliares se tornarem visíveis (VAN SLOBBE, 1991; GLORIA *et al.*, 2021).

Esse acometimento resulta na degradação das raízes terciárias e quaternárias, sendo as raízes mais tenras e flexíveis, levando a uma considerável diminuição da colonização do sistema radicular quando comparado com plantas não afetadas pelo AF (AYALA, 2001; ALBERTAZZI, BULGARELLI, CHINCHILLA, 2005; BOARI, 2008; GLORIA *et al.*, 2021). A perda desses tipos de raízes é extremamente prejudicial para a sobrevivência e o desenvolvimento da palma de óleo, por serem as raízes terciárias e quaternárias que desempenham o papel de absorver ativamente água e nutrientes do solo (INTARA *et al.*, 2018).

No entanto, também é importante considerar a possibilidade de que áreas com atividade biológica mais elevada propiciem a degradação das raízes de palmeiras debilitadas. Um estudo investigando metabólitos extraídos de folhas de plantas afetadas pelo Amarelecimento Fatal (AF) em comparação com plantas saudáveis, identificou a carência de Tiramina nas palmeiras acometidas (RODRIGUES – NETO *et al.*, 2018).

A Tiramina tem sido descrita como um metabólito utilizado pelas plantas em resposta ao ataque de insetos e herbívoros, além de ter propriedades protetoras contra a salinidade em plantas de arroz. Em solanáceas, estudos mostram que metabólitos derivados da Tiramina, como o ácido hidroxicinâmico amida de tiramina (PCAAT), são produzidos em resposta a lesões causadas por patógenos (LEFÈVRE *et al.*, 2001; GUILLET e DE LUCA, 2005; SERVILLO *et al.*, 2017).

Como hipótese levantada, é provável que palmeiras que apresentam baixa produção de tiramina, seja devido à sua expressão genética, deficiências nutricionais ou outros fatores que

ainda precisam ser estudados, apresentem maior suscetibilidade e/ou desproteção em relação aos ataques de microrganismos oportunistas do solo em relação às raízes terciárias e quaternárias. Essa vulnerabilidade pode ser mais pronunciada em solos com alta atividade biológica, resultando na degradação das raízes mais tenras e flexíveis dessas palmeiras debilitadas, mostrando-se as primeiras áreas de incidência da doença.

Essa suposição também pode oferecer uma explicação para a incompletude do postulado de Koch quando aplicado a microrganismos associados a plantas com AF, já que muitas vezes esses microrganismos são meramente oportunistas do solo. Todavia, essa interação complexa entre a atividade biológica do solo e o Amarelecimento Fatal da palma de óleo é um assunto que necessita de investigação adicional para esclarecer a direção e a natureza dessa relação.

Em relação ao elemento potássio (K), na área de estudo, o mapa de variabilidade espacial do potássio revela uma ampla gama de teores, variando de 0,09 a 0,18 cmol_c/dm³ (Figura 15 – F), sendo classificado como baixo a alto conforme os critérios estabelecidos por Brasil e Cravo (2020). Esse macronutriente é essencial para as plantas, sendo o terceiro nutriente mais utilizado na agricultura, após o nitrogênio e o fósforo (ZHAO; OOSTERHUIS; BEDNARZ, 2001; MASOOD e BANO, 2016).

Esse elemento só é encontrado em sua forma iônica (K⁺) ou em complexos fracos dos quais pode ser facilmente trocado (MARSCHNER, 2011), é considerada crucial para garantir altos rendimentos nos plantios de palma de óleo (LAMADE e TCHERKEZ, 2023). Dessa forma, quantidades necessárias de cloreto de potássio (KCl) são utilizadas durante os ciclos de adubação.

Através da absorção radicular, por meio da difusão, o potássio tem a capacidade de entrar diretamente nas células, desempenhando um papel fundamental na regulação osmótica celular. Além de afetar a pressão de turgor celular, desempenhando um papel crucial no aumento da resistência ao estresse nas culturas (KARIMI, 2017; AKSU e ALTAY, 2020). Contudo, o fluxo de massa pode ter contribuição significativa no processo quando a concentração de K na solução do solo é elevada (RUIZ *et al.*, 1999).

Dessa forma, uma das relações plausíveis entre o potássio (K) e a incidência de Amarelecimento Fatal (AF) está associada à sua assimilação limitada pela palma de óleo. Isso ocorre porque as plantas afetadas pela doença apresentam dificuldade na absorção de nutrientes, devido à degradação das raízes terciárias e quaternárias. Essas raízes são responsáveis pela absorção de água e nutrientes (INTARA *et al.*, 2018), e sua deterioração contribui para a restrição na absorção eficiente de potássio e outros nutrientes essenciais, o que pode explicar

os teores K terem sido mais elevados em locais de incidência de AF.

De maneira similar, o Magnésio, um nutriente essencial para as plantas, desempenha funções de grande importância, incluindo seu papel como componente da clorofila e ativador de enzimas (MAGUIRE e COWAN, 2002). A área de estudo exibe uma expressiva variabilidade espacial nos teores de magnésio, variando de 0,27 a 2,35 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (Figura 16 – B), abrangendo faixas de baixa a alta concentração (BRASIL e CRAVO, 2020).

As principais vias de absorção do magnésio pelas plantas ocorrem por fluxo de massa e por interceptação radicular (MALAVOLTA, 2006). No entanto, devido às condições influenciadas pelo AF, é possível que sua assimilação seja comprometida nas plantas afetadas. Isso pode ter implicações significativas na saúde e na produtividade da palma de óleo, o que sugere cachos pouco desenvolvidos, aborto de cachos ou suspensão total de produção de cachos, após a deterioração da folha flecha (BOARI, 2008), sendo sintomas bem predominantes no Amarelecimento Fatal.

Sobre os teores de Argila, não há uma correlação significativa e direta (ρ (h \hat{o}) $\geq \pm 0,6$) entre os elementos químicos e biológicos do solo e os teores de argila (Tabela 02). No entanto, a literatura mostra que a elevação dos teores de argila favorece a atividade microbiana do solo. Estudos descrevem que o aumento do teor de argila estimula a atividade microbiana devido à maior capacidade de adsorção de substratos proporcionada por esses minerais, resultando em um ambiente mais propício e fonte de alimento para os microrganismos do solo (JEEWANI *et al.*, 2021).

Outro estudo sugere que as substâncias produzidas pelos microrganismos do solo após consumirem glicose, também são conservadas em solos com maiores teores de argila, evitando a decomposição adicional desses produtos microbianos (GEYER *et al.*, 2020). Além disso, a eficiência microbiana no uso do carbono, sendo uma medida da atividade biológica do solo, também está positivamente relacionada ao teor de argila no solo (ISLAM; SINGH; DIJKSTRA, 2023).

Dessa forma, teoriza-se que os níveis argila, proeminentes em solos com maior incidência de AF, seja um fator subjacente que impulsiona uma atividade biológica mais intensa no solo, dessa forma, desencadeando todas as hipóteses supramencionados sobre a atividade biológica e o AF. No entanto, é necessário realizar pesquisas adicionais para elucidar de maneira mais concreta as relações entre os teores de argila e a incidência do AF.

Em relação à altimetria, os dados demonstraram que locais com menores cotas altimétricas apresentam uma maior prevalência de AF (Figura 21 – D). Estudos indicam que a umidade do solo e/ou a estagnação da água possam desencadear estados de hipóxia do solo e

desempenham um papel crucial no surgimento dessa doença (BERGAMIN FILHO *et al.*, 1998, ARAÚJO, 2016; AMARAL, 2016; SANTOS, 2018).

Trabalhos conduzidos no município de Moju, Pará, revelaram um aumento expressivo na incidência de AF após o ano de 2011, caracterizado por um período atípico de alta pluviosidade na região (ARAÚJO, 2016; AMARAL, 2016). Outro estudo empregando modelos digitais de terreno para avaliar a disseminação do AF, constatou que áreas de baixa altitude e próximas das Áreas de Preservação Permanente são mais propensas a apresentar altos índices de ocorrência da doença (SANTOS, 2018).

Teixeira *et al.* (2017), em estudos sobre o AF, elaboraram a hipótese de que o aumentando da concentração de íons reduzidos na solução do solo (NO^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}), por consequência da hipóxia do solo, “causam inicialmente danos ao sistema radicular e predis põe o dendezeiro a distúrbios fisiológicos cuja sintomatologia é conhecida como AF”.

No entanto, os dados relativos à atividade biológica do solo não corroboram com essa hipótese. A fermentação anaeróbica da matéria orgânica, que está associada ao processo de solubilização dos metais, provenientes dos óxidos metálicos (KÄMPF & CURI, 2015), é muito mais lenta do que a fermentação aeróbica (PRIMAVESI, 2016). A atividade biológica de baixa oxigenação, provavelmente não resultaria nos índices elevados de IQS Biológico ou nas medições de enzimas observados na área de estudo.

Essas observações sugerem que a hipóxia do solo não é uma causa provável ou única para a ocorrência do AF. Portanto, é plausível que a influência da altitude esteja relacionada à possível deposição de nutrientes solúveis carregados pela água e/ou ao incremento da umidade solo, exercendo um papel significativo nessas áreas. Esse fenômeno poderia promover a atividade biológica, resultando no desencadeamento das hipóteses previamente abordadas em relação tanto à atividade biológica quanto ao AF. Todavia, mais estudos adicionais são necessários para o entendimento da altimetria e as incidências de AF, principalmente análises em maiores profundidades e de micronutrientes, para uma melhor compreensão das relações dos metais reduzidos do solo com a incidência de AF.

A respeito do P, na área de estudo, o mapa de variabilidade espacial do fósforo revela uma ampla gama de teores, variando de 36,25 a 104,15 mg/dm³ (Figura 15 – E), sendo classificado como altos, conforme os critérios estabelecidos por Brasil e Cravo (2020). Essa alta variabilidade espacial possa estar relacionada à distribuição heterogênea do fertilizante, contribuindo para uma maior variação do P na camada de 0 a 10 cm.

Essa variação também pode ser atribuída, em parte, à variabilidade espacial natural do solo. Apesar da correlação entre o fósforo e o Alumínio livre (Al^{3+}) ter sido de ρ (h \hat{o}) = -0,32,

estudos indicam que os solos amazônicos, incluindo a área de estudo, são caracterizados por serem solos intemperizados e ricos em óxidos metálicos (LIMA *et al.*, 2006). Esses óxidos interagem com o fosfato, formando ligações covalentes estáveis que são dificilmente separáveis (RHEINHEIMER *et al.*, 2020), tornando o fósforo indisponível tanto para as plantas quanto para o método de análise empregado (Mehlich 1).

No que diz respeito ao AF, verificou-se uma redução nos níveis de fósforo nas áreas afetadas (Figura 19 – D). Essa redução de P disponível, possa estar relacionada a assimilação desse elemento pela atividade biológica do solo e estabilização de P pela humificação da matéria orgânica. Pesquisas demonstram, em ensaios de compostagem e adição de P inorgânico, que a proporção do P orgânico total foi maior do que a do P inorgânico total, o que foi atribuído principalmente à assimilação microbiana do P inorgânico, resultando na formação de P ligado à biomassa microbiana orgânica (ZHANG *et al.*, 2023). Outro estudo demonstrou que a humificação da matéria orgânica promove a imobilização de componentes solúveis do P pelos húmus e outras substâncias orgânicas macromoleculares por meio de quelatação ou coordenação, o que resulta na estabilização do P (JING *et al.*, 2020).

Desta maneira, é complexo afirmar causas diretas dos teores reduzidos de P em relação a incidência de AF, além do fato de que mesmo o valor mais baixo de fósforo observado na área de estudo reflete níveis considerados elevados desse elemento no solo (BRASIL e CRAVO, 2020). Diante desse contexto, torna-se necessário realizar investigações mais aprofundadas acerca desse elemento sobre essa enfermidade.

2.4 CONCLUSÃO

Este estudo trouxe uma abordagem inovadora ao investigar as variabilidades espaciais da atividade biológica do solo, elementos químicos de fertilidade e teor de argila, relacionadas à incidência do Amarelecimento Fatal (AF) na palma de óleo.

Os resultados indicaram que áreas com incidência de AF apresentaram características distintas, como maiores teores de argila, magnésio (Mg) e potássio (K), bem como maior atividade biológica do solo, representada pelos índices IQSBiológico, F1 – Ciclar nutrientes, β – glicosidase e Arilsulfatase. Além disso, essas áreas também apresentaram menores cotas altimétricas e menor teor de fósforo (P) disponível.

Embora essas observações sejam importantes para compreender possíveis fatores associados à incidência do AF, é necessário ressaltar que ainda não é possível estabelecer causas definitivas para essa enfermidade. Mais estudos são necessários para aprofundar a compreensão das condições específicas do solo, aspectos nutricionais e fisiológicos da palma de óleo que possam estar relacionados ao AF.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, H.; BULGARELLI, J.; CHINCHILLA, C. Eventos previos y contemporáneos a la aparición de los síntomas de la pudrición del cogollo en palma aceitera. **ASD Oil Palm Papers**, v. 28, p. 21-41, 2005.
- AKSU, G.; ALTAY, H. The effects of potassium applications on drought stress in sugar beet. **Sugar Tech**, v. 22, n. 6, p. 1092-1102, 2020.
- ALVES, S. A. *et al.* Caracterização dos recursos genéticos dos plantios de dendê no Estado do Pará. **Bioenergia em Revista: Diálogos (ISSN: 2236-9171)**, v. 3, n. 1, p. 20-31, 2013.
- AMARAL, A. P. M. **Distribuição espacial e temporal do amarelecimento fatal em plantio orgânico de palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) na amazônia oriental**. 2016. 81 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural da Amazônia Belém 2016.
- ARAÚJO, F. C. B. **Influência dos fatores climáticos na incidência do Amarelecimento Fatal em palma de óleo no município de Tailândia**. 2016. 50 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) -Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2016.
- AYALA, L. S. **Pesquisa sobre amarelecimento fatal do dendezeiro**. Belém: DENPASA, 2021.
- BARCELOS, E. **A cultura do dendê**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Manaus: Embrapa-CPAA, 1995.
- BENEZOLI, V. H. *et al.* Modeling Oil Palm crop for Brazilian climate conditions. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103-130, 2021.
- BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L.; LARANJEIRA, F. F.; BERGER, R. D.; HAU, B. Análise temporal do amarelecimento fatal do dendezeiro como ferramenta para elucidar sua etiologia. **Fitopatologia Brasileira**, v. 23, n. 3, p. 391-396. 1998.
- BERNARDES, M. S. R. **Relatório de visita a plantações de Paricatuba, na DENPASA, visando a identificação das causas do AF**. DENPASA, 2001.
- BEUTHER, E.; WIESE, U.; LUKAS, N.; VAN SLOBBE, W. G.; RIESNER, D. Fatal yellowing of oil palms: search for viroids and doubled-stranded RNA. **Journal of Phytopathology**, v. 136, n. 4, p. 296-311. 1992.
- BHUNIA, G. S.; SHIT, P. K.; CHATTOPADHYAY, R. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, Índia). **Annals of Agrarian Science**, Geórgia, v. 16, p.436 - 443. 2018.
- BOARI, A. J. **Estudos realizados sobre o amarelecimento fatal dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) no Brasil**. Documentos 348, ISSN 1517-2201, Nov. de 2008).
- BRASIL, E. C; CRAVO, M da S. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado do Pará**. p 63, 2020.

- CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Fieldscale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CELESTINO FILHO, P.; LOUISE, C.; LUCCHINI, F. Estudos de transmissão do amarelecimento fatal do dendezeiro (*Elaeis guineenses* Jacq) com insetos suspeitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO FATAL DO DENDEZEIRO, 14., 1993, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba, SP: [s.n.], p. 194. 1993.
- CHIA, G. S. *et al.* Repetibilidade da produção de cachos de híbridos interespecíficos entre o caiaué e o dendezeiro. **Acta Amazonica**, v. 39, p. 249-253, 2009.
- CORLEY, R. H. V; TINKER, P. B. H. **The Oil Palm**. Fifth ed. 2015.
- DARNELL, A. R.; TATE, N. J.; BRUNSDON, C. Improving user assessment of error implications in digital elevation models. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 32, n. 4, p. 268-277, 2008.
- EMBRAPA. **Mapas de Solos e de Aptidão Agrícola das Áreas Alteradas do Pará. Belém, PA:** Embrapa Amazônia Oriental, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1354300/0/Mapas+de+solos+e+aptid%C3%A3o+agr%C3%ADcola+das+%C3%A1reas+alteradas+do+Par%C3%A1/80b10a04-8d10-419a-918d-8b22773ee44a> Acesso em: 15 dez. 2022.
- FAO. Socio-economic context and role of agriculture. **Rome Food Agric Organ United Nation**, v. 717, 2015.
- FARIAS, P. R. S. *et al.* Using geostatistical analysis to evaluate the presence of *Rotylenchulus reniformis* in cotton crops in Brazil: Economic implications, **Journal of Nematology**. v. 34, n.3, p.232-238, 2002.
- FERRAZ, L. C. C. B. Relatório final: apoio técnico na especialidade de nematologia de plantas. In: DENPASA. **Pesquisa sobre amarelecimento fatal. Belém, PA:** DENPASA, 2001.
- GEE, G. W.; BAUDER J. W. **Particle-size Analysis**. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis Part 1*. Soil Science Society of America Book Series 5, p 383-411. Madison, Wisconsin, USA, 1986.
- GEYER, K. *et al.* Assessing microbial residues in soil as a potential carbon sink and moderator of carbon use efficiency. **Biogeochemistry**, v. 151, n. 2-3, p. 237-249, 2020.
- GLORIA, G. C. P. *et al.* Root morphological traits of oil palm genotypes with differential resistance to fatal yellowing. **Semina Ci. agr.**, p. 3073-3087, 2021.
- GOMES JUNIOR, R. A. *et al.* **Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar.** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2010.
- GOMES JUNIOR, R. A. *et al.* Evaluation of interspecific hybrids of palm oil reveals great genetic variability and potential selection gain. **Industrial Crops and Products**, v. 52, p. 512-518, 2014.

- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. Conceitos Básicas da Geoestatística. In: OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C.R.; BRANDÃO, Z.N. **Geoestatística aplicada na Agricultura de Precisão utilizando o Vesper**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, p.41 – 62, 2015.
- GUERRA, P. A. G. **Geoestatística Operacional**. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, p.145, 1988.
- GUILLET, G.; DE LUCA, V. Wound-inducible biosynthesis of phytoalexin hydroxycinnamic acid amides of tyramine in tryptophan and tyrosine decarboxylase transgenic tobacco lines. **Plant physiology**, v. 137, n. 2, p. 692-699, 2005.
- GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global change biology**, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002.
- HABIB, A. *et al.* Impact of spatial resolution, interpolation and filtering algorithms on DEM accuracy for geomorphometric research: a case study from Sahel-Doukkala, Morocco. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 4, p. 1537-1554, 2018.
- HABIB, M. Evaluation of DEM interpolation techniques for characterizing terrain roughness. **Catena**, v. 198, p. 105072, 2021.
- IBGE. **Igarapé-Açú**. IBGE/ Cidades/ Panorama, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/igarape-acu/panorama> . Acesso em: 15 dez. 2022.
- INTARA, Y. I. *et al.* Oil palm roots architecture in response to soil humidity. **International journal of oil palm**, v. 1, n. 2, p. 79-89, 2018.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.
- ISLAM, M. R.; SINGH, B.; DIJKSTRA, F. A. Microbial carbon use efficiency of glucose varies with soil clay content: A meta-analysis. **Applied Soil Ecology**, v. 181, p. 104636, 2023.
- JEEWANI, P. H. *et al.* The stoichiometric C-Fe ratio regulates glucose mineralization and stabilization via microbial processes. **Geoderma**, v. 383, p. 114769, 2021.
- JING, J. *et al.* Combining humic acid with phosphate fertilizer affects humic acid structure and its stimulating efficacy on the growth and nutrient uptake of maize seedlings. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 17502, 2020.
- KÄMPF, N. & CURI, N. Formação e Evolução do Solo (Pedogênese), **Pedologia Fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Viçosa - Minas Gerais, P. 208-291, 2015.
- KARIMI, R. Potassium-induced freezing tolerance is associated with endogenous abscisic acid, polyamines and soluble sugars changes in grapevine. **Scientia Horticulturae**, v. 215, p. 184-194, 2017.
- KIENZLE, S. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound

- terrain derivatives. **Transactions in GIS**, v. 8, n. 1, p. 83-111, 2004.
- KITAJIMA, E. W. **Report to UEPAE de Belém about E. M. observations on tissues of healthy and by AF affected palms from Denpasa**. Brasília, DF: UNB, 2 p. Não publicado. 1991.
- LAMADE, E.; TCHERKEZ, G. Revisiting foliar diagnosis for oil palm potassium nutrition. **European Journal of Agronomy**, v. 143, p. 126694, 2023.
- LARANJEIRA, F. F.; BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM L.; BERGER, R. D.; HAU, B. Análise espacial do amarelecimento fatal do dendezeiro como ferramenta para elucidar sua etiologia. **Fitopatologia Brasileira**, v. 23, n. 3, p. 397- 403, 1998.
- LAL, R. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO₂. **Soil and Tillage Research**, v. 188, p. 35-40, 2019.
- LEFÈVRE, A.; GRATIA, I.; LUTTS, S. Discriminação entre os componentes iônico e osmótico do estresse salino em relação ao nível de poliamina livre em arroz (*Oryza sativa*). **Fitotecnia**, v. 161, n. 5, p. 943-952, 2001.
- LI, C.; PAN, C. Overland runoff erosion dynamics on steep slopes with forages under field simulated rainfall and inflow. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 8, p. 1794-1809, 2020.
- LIMA, S. M. V. *et al.* **Desempenho da cadeia produtiva do dendê na Amazônia Legal**. Belém: PRODEAM, 2002. 162 p.
- LIMA, H. N., MELLO, J. W. V. D., SCHAEFER, C. E. G., KER, J. C., & LIMA, A. M. N. Mineralogy and chemistry of three soils along a topossequence from the Upper Solimões Basin, western Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30, p. 59-68, 2006.
- LIMA, J. S. S. *et al.* Spatial variability in the diagnosis of nutritional status in the papaya. *Revista Ciência Agronômica*. Fortaleza, v. 47, n. 2, p.264 - 274, abr -jun, 2016.
- MAGRUDER, L.; NEUENSCHWANDER, A.; KLOTZ, B. Digital terrain model elevation corrections using space-based imagery and ICESat-2 laser altimetry. **Remote Sensing of Environment**, v. 264, p. 112621, 2021.
- MANN, H. B; WHITNEY, D. R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. **The Annals of Mathematical Statistics**, Vol. 18, No. 1, p.50-60, Mar. de 1947.
- MAGUIRE, M. E.; COWAN, J. M. A. Química e bioquímica do magnésio. **Biometais**, v. 15, n. 3, p. 203, 2002.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Sao Paulo: Agronômica Ceres, 2006.
- MARSCHNER, Horst (Ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Academic press, 2011.

- MASOOD, S.; BANO, A. Mechanism of potassium solubilization in the agricultural soils by the help of soil microorganisms. **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**, p. 137-147, 2016.
- MENDES, I. de C. *et al.* Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. 20-25, 2018.
- MENDES, I. de C. *et al.* BIOANÁLISE DE SOLO: A MAIS NOVA ALIADA PARA A SUSTENTABILIDADE AGRÍCOLA. Brasília-DF. **Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia**, v. 8, 2020.
- MENDES, I. de C. *et al.* Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. **Embrapa Cerrados-Documents (INFOTECA-E)**, 2021.
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos; p.238, 2015.
- MURPHY, D. J. **Working to improve the oil palm crop**. Inform 14 (11), 670- 671, 2003.
- MURPHY, D. J.; GOGGIN, K.; PATERSON, R. R. M. Óleo de palma na década de 2020 e além: desafios e soluções. **CABI agricultura e biociências**, v. 2, n. 1, p. 1-22, 2021.
- NASCIMENTO, S. V. *et al.* **Differential accumulation of proteins in oil palms affected by fatal yellowing disease**. PLOS One. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195538>,13(4), 2018.
- NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 655-663, 2003.
- OKOYE, M. N. Population improvement and stability of bunch yield components of NIFOR second cycle oil palm hybrids. **University of Nigeria, Nsukka**, p. 33, 2007.
- PACHÊCO, N. A.; BASTOS, T. X. Boletim agrometeorológico de 2008 para Igarapé-Açu, PA. **Embrapa Amazônia Oriental. Documentos**, 2011.
- PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**, 14^a ed. Piracicaba: Degaspari, p.477, 2000.
- PRIMAVESI, A. Manual do solo vivo: solo sadio, planta sadia, ser humano sadio. **São Paulo: Expressão Popular**, 2016.
- QUEIROZ, J. C. B. **Use of geostatistics to quantify the risk of contamination by heavy metals in the port Santana-Amapá**. 2003. 200 p. Tese (Doutorado em...) - Universidade Estadual Paulista. Instituto de Ciências Exatas, Rio Claro, São Paulo, 2003.

- R CORE TEAM (2022). **R: A language and environment for statistical computing**. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 06 jul. 2023.
- RAFII, M. Y. *et al.* Performance and heritability estimations on oil palm progenies tested in different environments. **Journal of Oil Palm Research**, v. 14, n. 1, p. 15-24, 2002.
- RHEINHEIMER, D. S. *et al.* **Ciclo biogeoquímico do fósforo, diagnóstico de disponibilidade e adubação fosfatada**, 2020.
- RIBEIRO, S. G. **Relatório das análises de eletroforese em gel, realizados no CENARGEN**. Brasília, DF: [s.n.], 17 p., 1990.
- RIESNER, D.; BEUTHER, E. **Investigations of diseased and symptomless oil palms from Denpasa oil palm estate: search for viroids and for doublestranded RNA**. Report to Denpasa. Dusseldorf, Germany: Herinch Heine Univversität Dusseldorf, 22 p. 1989.
- RITCHIE, J. C. *et al.* Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. **Geomorphology**, v. 89, n. 1-2, p. 163-171, 2007.
- RODRIGUES – NETO *et al.* Metabolic fingerprinting analysis of oil palm reveals a set of differentially expressed metabolites in fatal yellowing symptomatic and non-symptomatic plants. **Metabolomics**, v. 14, p. 1-16, 2018.
- RUIZ, H. A.; MIRANDA, J.; CONCEIÇÃO, J. C. S. Contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de K, Ca, Mg às plantas de arroz. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:1015-1018, 1999.
- SANTOS, A. V. F. **Estudo geoestatístico e altimétrico do amarelecimento fatal em plantio orgânico de palma de óleo na Amazônia Oriental**. Tese de Mestrado. UFRA/Campus Belém, 2018.
- SALEKIN, S. *et al.* A comparative study of three non-geostatistical methods for optimising digital elevation model interpolation. **ISPRS international journal of geo-information**, v. 7, n. 8, p. 300, 2018.
- SALEKIN, S. *et al.* Uncertainty in primary and secondary topographic attributes caused by digital elevation model spatial resolution. **CATENA**, v. 231, p. 107320, 2023.
- SEDAP - Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca. **Panorama agrícola do do Pará 2015 / 2019**. Elaboração SEDAP-NUPLAN-ESTATÍSTICA; Governo do Pará/ Belém – PA, 2020.
- SEIBERT, J.; STENDAHL, J.; SØRENSEN, R. Topographical influences on soil properties in boreal forests. **Geoderma**, v. 141, n. 1-2, p. 139-148, 2007.
- SERVILLO, L. *et al.* Vias da tiramina na defesa de plantas cítricas: glicoconjugados de tiramina e seus derivados N-metilados. **Revista de química agrícola e alimentar**, v. 65, n. 4, p. 892-899, 2017.

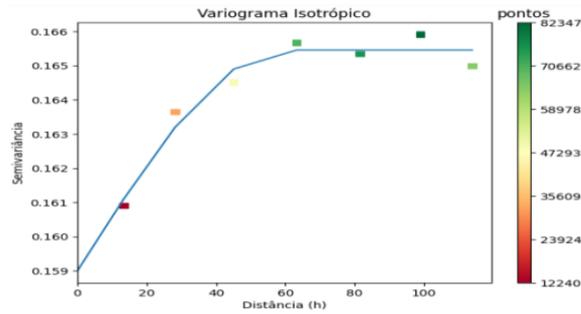
- SCHUMANN, G. J. P.; BATES, P. D. The need for a high-accuracy, open-access global DEM. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 225, 2018.
- SCHWANGHART, W.; JARMER, T. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography—A case study from south-eastern Spain. **Geomorphology**, v. 126, n. 1-2, p. 252-263, 2011.
- SILVA, H. M. **Relatório de avaliação dos trabalhos com amarelecimento fatal**. Belém, PA: [s. n.], 5 p. 1989.
- SILVA, S. A. *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p.15 - 22, jan. 2010.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geoestatística. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p. 271 - 277, mar/abr. 2012.
- SILVA, M. R. R. DA. **Biodiesel no Brasil: Análise de Custo-Benefício: Análise de Custo-Benefício**. Curitiba: Appris, 2015.
- SILVA, Carlos Alberto *et al.* Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical Wagner Bettiol**, p. 17, 2023.
- SINGH, R. P.; AVILA, A. C.; DUSI, A. N.; BOUCHER, A.; TRINDADE, D. R.; VAN SLOBBE, W. G.; RIBEIRO, S. G.; FONSECA, M. E. R. Association of viroid like nucleic acids with the fatal yellowing disease of oil palm. **Fitopatologia Brasileira**, v. 13, n. 4, p. 392-394, 1988.
- SUFRAMA - Superintendência da Zona Franca de Manaus. **PROJETO POTENCIALIDADES REGIONAIS ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DENDÊ**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior Superintendência da Zona Franca de Manaus, Instituto Superior de Administração e Economia ISAE/Fundação Getúlio Vargas (FGV). Manaus Amazonas, 2003.
- TABATABAI, M. A. Soil enzymes. **Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties**, v. 5, p. 775-833, 1994.
- TEIXEIRA, W. G. *et al.* A hipótese abiótica como agente causal do amarelecimento fatal (AF) da palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) no Brasil. In: **Embrapa Solos-Resumo em anais e congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 36., 2017, Belém, PA. Amazônia e seus solos: peculiaridades e potencialidades. Belém, PA: SBCS, 2017.
- TOBLER, W.R. **Cellular Geography**. In: Gale, S.; Olsson, G. ed. *Philosophy in Geography*. Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel, 1979. p.279-386.

- TRANGMAR, B. B. *et al.* Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985.
- TRINDADE, D. R.; POLTRONIERI, L. S.; FURLAN JÚNIOR, J. Abordagem sobre o estado atual das pesquisas para a identificação do agente causal do amarelecimento fatal do dendezeiro. In: POLTRONIERI, L. S.; TRINDADE, D. R.; SANTOS, I. P. (ed.). **Pragas e doenças de cultivos amazônicos**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, p. 439-450. 2005.
- USDA, FAS. Downloadable data sets. **Retrieved from United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service**, 2021. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- VAN SLOBBE, W. G. Amarelecimento fatal na plantação de dendê na DENPASA - Brasil. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE A SÍNDROME DA GUIA PODRE NO DENDEZEIRO, 1988, Paramaribo. **Anais...** Paramaribo, [s. n., 1988].
- VAN SLOBBE, W. G. **Amarelecimento fatal**: final report. Belém, PA: DENPASA, 100 p. 1991.
- VASU, D. *et al.* Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. **Soil & Tillage Research**, v. 169, p. 25 - 34, Jun. 2017.
- YAMAMOTO, J. K. **Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais**. 1.ed., São Paulo: Gráfica Paulos, p.308, 2020.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, p.216, 2013.
- ZHAO, D.; OOSTERHUIS, D. M.; BEDNARZ, C. W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. **Photosynthetica**, v. 39, p. 103-109, 2001.
- ZHANG, Tao *et al.* Organic matter stabilization and phosphorus activation during vegetable waste composting: Multivariate and multiscale investigation. **Science of The Total Environment**, v. 891, p. 164608, 2023.

APÊNDICE

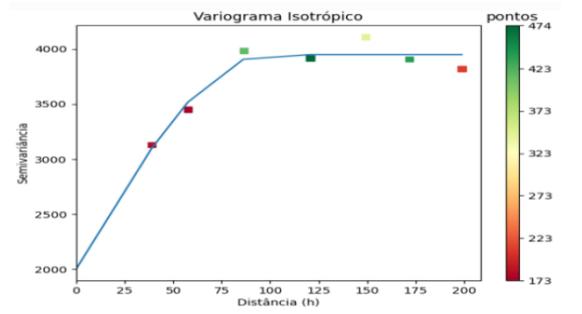
Semivariogramas Ajustados

AF



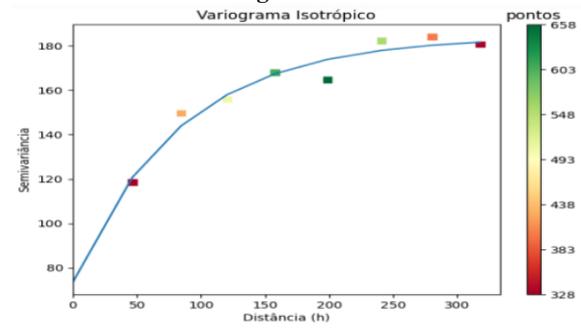
Modelo Esférico; $C_0 = 0,159$;
 $C_0 + C = 0,165$; $A (m) = 60,11$; $R^2 = 0,952$

Ariulfatase



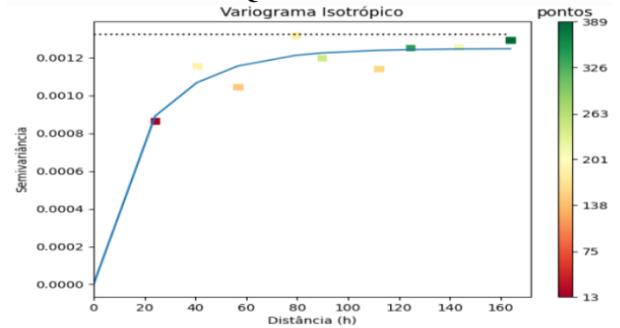
Modelo Esférico; $C_0 = 2004,82$;
 $C_0 + C = 3948,98$; $A (m) = 98,29$; $R^2 = 0,921$

Betaglicosidade



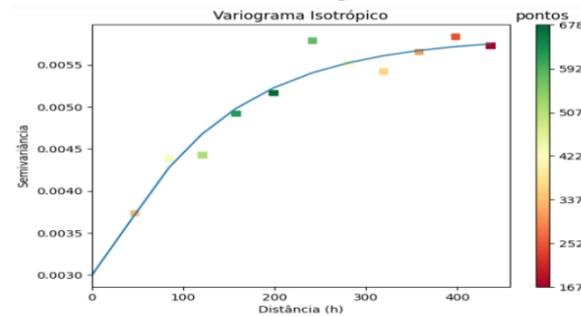
Modelo Exponencial; $C_0 = 73,55$;
 $C_0 + C = 184,04$; $A (m) = 250,23$; $R^2 = 0,953$

IQS FertBio



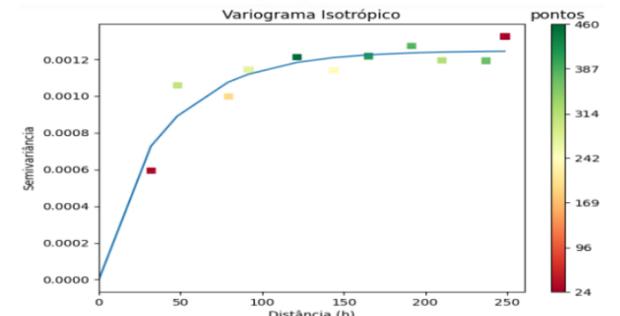
Modelo Exponencial; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 0,001$; $A (m) = 72,10$; $R^2 = 0,725$

IQS Biológico



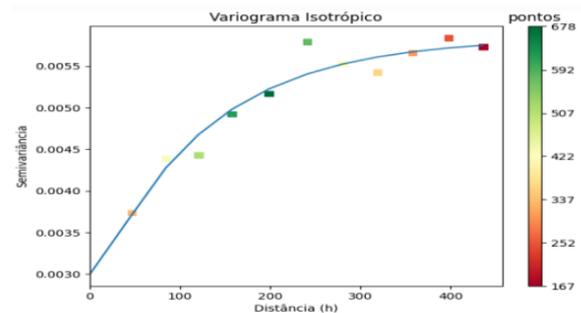
Modelo Exponencial; $C_0 = 0,003$;
 $C_0 + C = 0,006$; $A (m) = 366,76$; $R^2 = 0,945$

IQS Químico



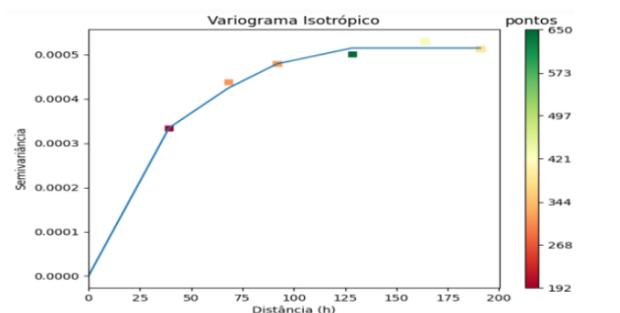
Modelo Exponencial; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 0,001$; $A (m) = 128,00$; $R^2 = 0,819$

F1 - Ciclar Nutrientes



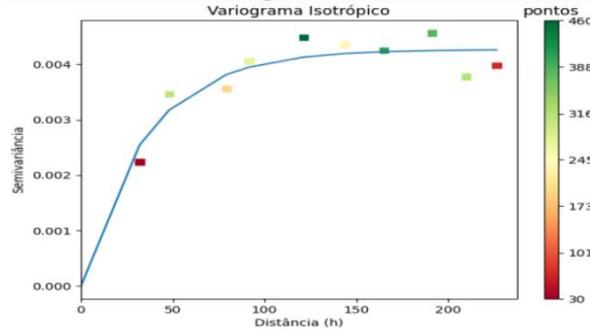
Modelo Exponencial; $C_0 = 0,003$;
 $C_0 + C = 0,006$; $A (m) = 366,76$; $R^2 = 0,942$

F2 - Armazenar Nutrientes



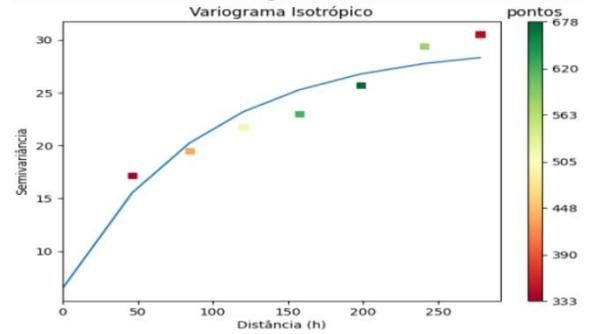
Modelo Esférico; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 0,001$; $A (m) = 128,34$; $R^2 = 0,976$

F3 - Suprir Nutrientes



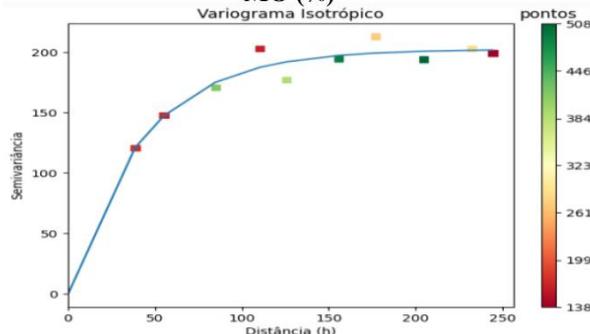
Modelo Exponencial; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 0,004$; $A (m) = 105,95$; $R^2 = 0,808$

Argila (%)



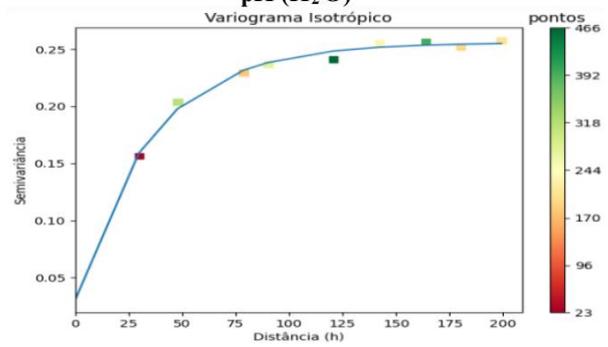
Modelo Exponencial; $C_0 = 6,505$;
 $C_0 + C = 29,483$; $A (m) = 278,07$; $R^2 = 0,871$

MO (%)



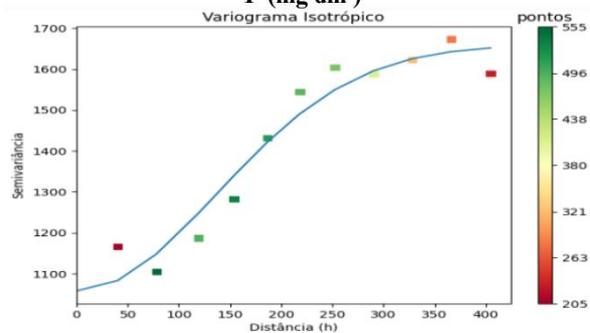
Modelo Exponencial; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 202,44$; $A (m) = 126,99$; $R^2 = 0,02$

pH (H₂O)



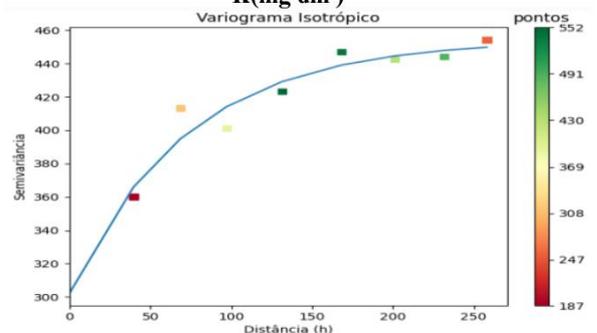
Modelo Exponencial; $C_0 = 0,031$;
 $C_0 + C = 0,256$; $A (m) = 105,73$; $R = 0,985$

P (mg dm⁻³)



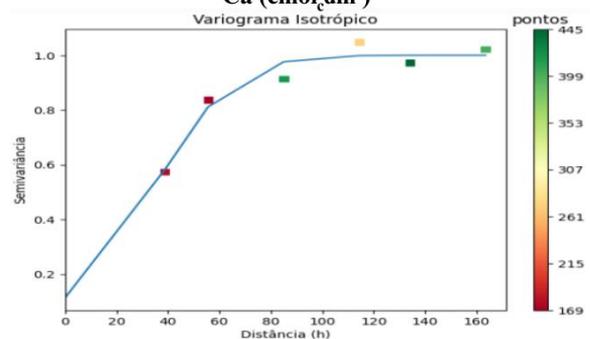
Modelo Gaussiano; $C_0 = 1057,972$;
 $C_0 + C = 1659,163$; $A (m) = 335,17$; $R^2 = 0,94$

K (mg dm⁻³)



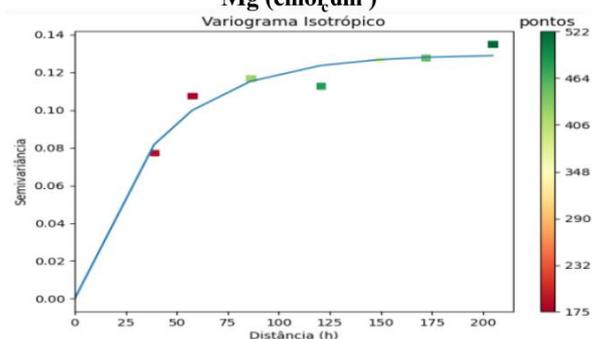
Modelo Exponencial; $C_0 = 302,404$;
 $C_0 + C = 454,203$; $A (m) = 218,62$; $R^2 = 0,902$

Ca (cmol_c dm⁻³)

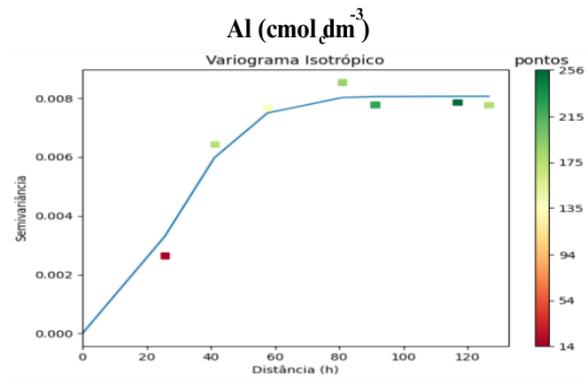


Modelo Gaussiano; $C_0 = 0,115$;
 $C_0 + C = 1,001$; $A (m) = 77,42$; $R^2 = 0,946$

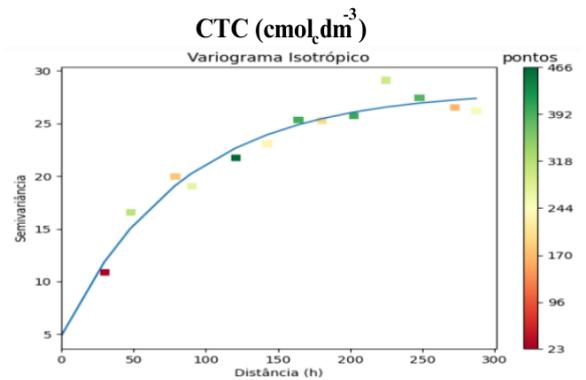
Mg (cmol_c dm⁻³)



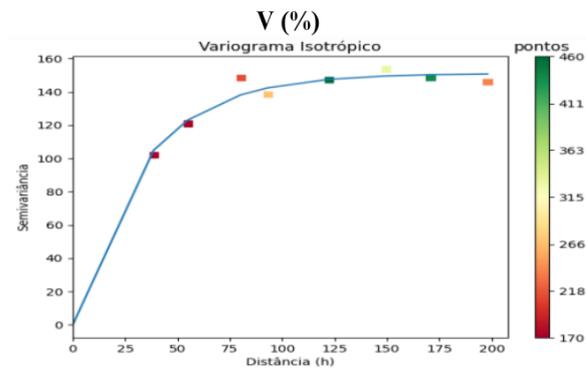
Modelo Exponencial; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 0,13$; $A (m) = 117,27$; $R^2 = 0,891$



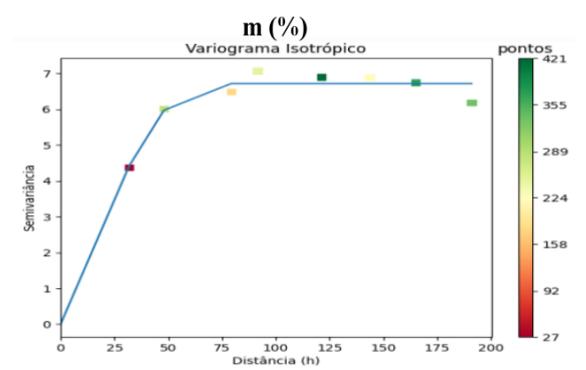
Modelo Gaussiano; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 0,008$; A (m) = 61,28; $R^2 = 0,953$



Modelo Exponencial; $C_0 = 1,933$;
 $C_0 + C = 8,517$; A (m) = 222,82; $R^2 = 0,906$



Modelo Exponencial; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 151,123$; A (m) = 97,67; $R^2 = 0,919$



Modelo Esférico; $C_0 = 0,0$;
 $C_0 + C = 6,719$; A (m) = 67,29; $R^2 = 0,9$