

Incidência do Amarelecimento fatal da palma de óleo em resposta à resistência a penetração do solo

Incidence of Fatal yellowing of oil palm in response to soil penetration resistance

Nelson Ken Narusawa Nakakoji¹; Ítala Duam Souza Narusawa²; Cleison Freitas da Silva³; Pedro Guerreiro Martorano⁴; Felix Lelis da Silva⁵; Paulo Roberto Silva Farias⁶; Tiago de Melo Sales⁷; Jose Gilberto Sousa Medeiros⁸; Javier Dias Pita⁹

¹ Universidade Federal Rural da Amazônia, PGAgro/UFRA, Belém/PA, Brasil. Email: narusawanelsonken@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7044-7877>

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGSR/CEPSRM, Porto Alegre/RS. Email: itala.narusawa@ufrgs.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6866-0959>

³ Instituto Federal de Educação, Ciéncia e Tecnologia do Pará, Castanhal/PA, Brasil. Email: eng.cleison@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0966-3943>

⁴ Universidade Federal Rural da Amazônia, PGAgro/UFRA, Belém/PA, Brasil. Email: pmartorano60@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8607-4776>

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciéncia e Tecnologia do Pará, IFPA/Campus Castanhal/PA, Brasil. Email: felix.lelis@ifpa.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8405-103X>

⁶ Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA/ Campus Belém/PA, Brasil. Email: paulorsfarias4@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9212-8957>

⁷ Instituto Federal de Educação, Ciéncia e Tecnologia do Pará, IFPA/Campus Castanhal/PA, Brasil. Email: tiago.sales@ifpa.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4923-0881>

⁸ Instituto Federal de Educação, Ciéncia e Tecnologia do Pará, IFPA/Campus Castanhal/PA, Brasil. Email: gil.medeiros@ifpa.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3287-4189>

⁹ Instituto Federal de Educação, Ciéncia e Tecnologia do Pará, IFPA/Campus Castanhal/PA, Brasil. Email: javier.pita@ifpa.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8832-8005>

Resumo: Estudos sobre fatores abióticos têm ganhado destaque nas pesquisas sobre o Amarelecimento Fatal (AF) da palma-de-óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.). A aplicação de técnicas geoestatísticas, especialmente a krigagem ordinária, amplia a análise desses fatores, proporcionando uma visão mais holística do ambiente de estudo. O presente trabalho objetivou analisar a influência da Resistência à Penetração do Solo (RPS) sobre a incidência do AF da palma-de-óleo, utilizando técnicas geoestatísticas. O estudo foi realizado na Fazenda Nogami, em Igapó-Açu (Pará), em uma plantação de 6,3 hectares com 10,24% de plantas afetadas. Após aferir a RPS com um penetrômetro de solos, os dados foram submetidos a testes descritivos e de normalidade, seguidos pela construção do semivariograma e pela krigagem ordinária, gerando o mapa temático da distribuição espacial da RPS. A partir do inventário fitossanitário georreferenciado e do mapa, determinou-se a RPS para cada planta, constituindo dois grupos: Plantas Com AF e Plantas Sem AF. Dada a não normalidade dos dados (teste de Shapiro-Wilk), utilizou-se o teste de Mann-Whitney, revelando maior prevalência de AF em áreas com maior RPS.

Palavras-chave: Geoestatística; *Elaeis guineensis* Jacq.; Fitossanidade.

Abstract: Studies on abiotic factors have gained increasing attention in research on Fatal Yellowing (FY) of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). The application of geostatistical techniques, especially ordinary kriging, enhances the analysis of these factors, providing a more holistic view of the study environment. This study aimed to analyze the influence of Soil Penetration Resistance (SPR) on the incidence of FY in oil palm, using geostatistical techniques. The study was conducted at Nogami Farm, in Igapó-Açu (Pará State), in a 6.3-hectare oil palm plantation with 10.24% of affected plants. After measuring the SPR using a soil penetrometer, the data were subjected to descriptive and normality tests, followed by the construction of the semivariogram and the application of ordinary kriging, generating the thematic map of the spatial distribution of SPR. Based on the georeferenced phytosanitary inventory and the map, the SPR for each plant was determined, forming two groups: Plants with FY and Plants without FY. Given the non-normality of the data (Shapiro-Wilk test), the Mann-Whitney test was used, revealing a higher prevalence of FY in areas with higher SPR.

Keywords: Geostatistics; *Elaeis guineensis* Jacq.; Phytosanitary.

1. Introdução

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma das palmeiras mais produtivas na produção de óleo vegetal, sendo amplamente cultivada em regiões tropicais. A expansão dessa cultura nas últimas décadas se destacou no sudeste asiático, especialmente em Indonésia e Malásia, líderes mundiais na exportação de óleo de palma (SHAHBANDEH, 2024; TAN et al., 2022; LUKE et al., 2020; SAID et al., 2021). A Colômbia é o quarto maior produtor global, enquanto o Brasil ocupa a nona posição, com a maior produção concentrada no Estado do Pará (FERNANDES et al., 2022; BENEZOLI et al., 2021; ABRAPALMA, 2024).

No entanto, a palmicultura paraense enfrenta desafios com o Amarelecimento Fatal (AF), uma doença que afeta a palma de óleo e cuja causa ainda é desconhecida. Os primeiros casos foram relatados em 1974 e, desde então, a doença causou perdas significativas em áreas cultivadas no Pará, além de ser registrada em outros países da América Latina (GOMES JUNIOR et al., 2010; TORRES et al., 2016). O principal sintoma é a podridão das raízes, que precede o amarelecimento das folhas e, eventualmente, a morte da planta (BOARI, 2008; GLORIA et al., 2021).

Estudos indicam que fatores abióticos, como hipoxia do solo, podem estar relacionados à incidência da doença, sugerindo que deficiências nutricionais ou inadequações no manejo são fatores potenciais (NASCIMENTO et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2017; RODRIGUES-NETO et al., 2018). A resistência à penetração do solo (RPS) tem sido considerada uma propriedade importante para avaliar o grau de compactação do solo e sua relação com a incidência do AF (COLOMBI et al., 2018; MORAES et al., 2020).

Nesse cenário, a utilização de métodos geoestatísticos, como a krigagem ordinária, poderá desempenhar um papel fundamental na pesquisa da RPS em relação à incidência do AF. Esse método proporciona 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 (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015; YAMAMOTO, 2020; YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Essa abordagem amplia as análises da variável, proporcionando uma compreensão mais abrangente das respostas da doença em relação a essa característica do solo.

Dessa forma, diante da importância econômica da cultura da palma de óleo para o Estado do Pará, do acometimento do AF sobre a palmicultura paraense, dos fatores relacionados ao solo sendo a provável causa da incidência da doença, juntamente ao aporte de métodos geoestatísticos para ampliar as análises da RPS, objetivou-se com este estudo avaliar a incidência do Amarelecimento Fatal da palma de óleo (AF) em resposta à resistência à penetração do solo (RPS).

2. Metodologia

2.1 Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Nogami, situado no município de Igarapé-Açu, pertencente à mesorregião nordeste paraense, microrregião Bragantina, no estado do Pará, Brasil (IBGE, 2022), nas coordenadas UTM (Universal Transversa de Marcator), zona 23 M: 9866989,65 e 9866783,58 sul, 204042,58 e 204598,65 oeste (Figura 1).

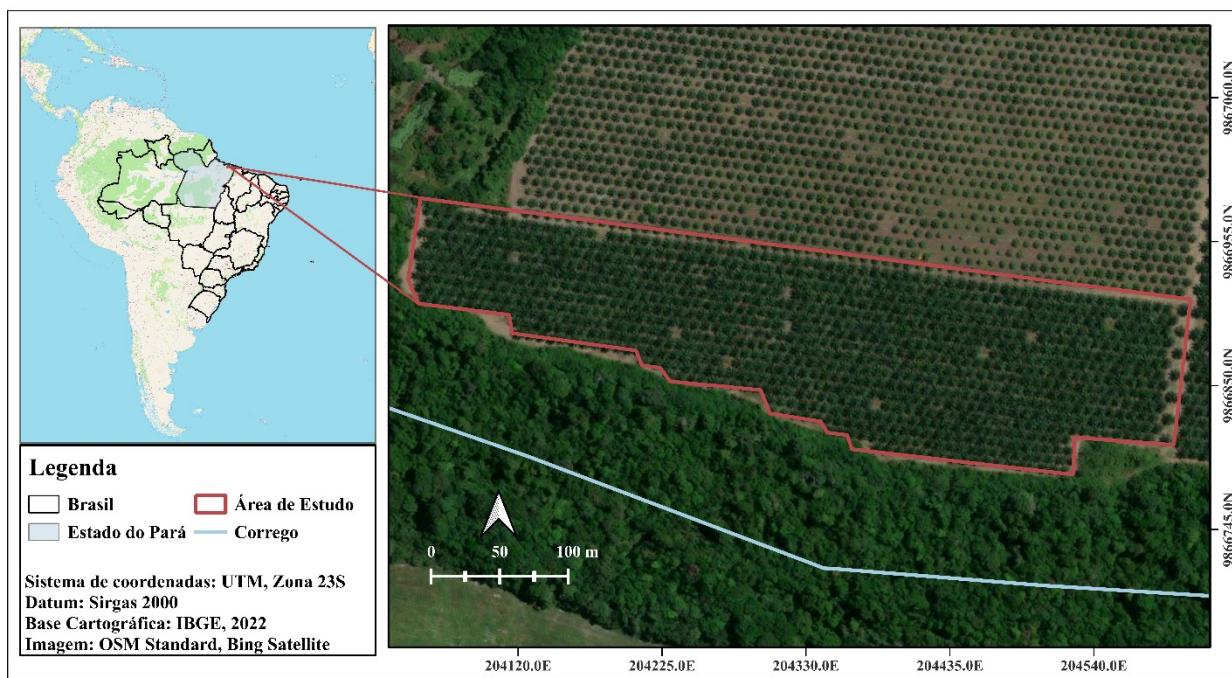


Figura 1 – Mapa de Localização da área de estudo.

Fonte: Autores (2024).

O clima da região é classificado como super úmido (Ami) de Köppen, com temperaturas variando entre 21,7 °C e 32,2 °C, e precipitação anual entre 2302,5 mm e 2857,4 mm, concentrada entre março e abril (PACHÊCO; BASTOS, 2007). O solo predominante é Latossolo Vermelho-Amarelo, favorável para agricultura (EMBRAPA, 2016). A área de 6,3 ha foi plantada com *Elaeis guineensis* var. Tenera em 2010, usando espaçamento de um triângulo equilátero de 8,5 m. Antes, a área era pastagem para gado. A forma anual de adubação é realizada mediante a contabilização do retorno financeiro da cultura, variando entre 1 a 5 kg planta⁻¹ de fertilizante sintético (NPK). A roçagem é realizada com periodicidade de 3 a 4 meses. Tanto a roçagem como o transporte dos cachos são realizados via implementos agrícolas pesadas.

2.2 Levantamento da Resistência à Penetração do Solo (RPS)

A coleta dos dados da resistência à penetração do solo RPS foi realizada no mês de abril de 2021, as amostragens foram realizadas em grade regular de 20 m x 20 m de dimensões, construindo 179 pontos de coletas. Para orientar a descoberta dos pontos de coletas, utilizou-se o aparelho GNSS (Global Navigation Satellite System) de navegação Garmin 64s. Como procedimento, em cada ponto da grade amostral, foi calculado a média aritmética da aferição de 5 subamostras em um raio de 5 m de distância do ponto da grade amostral (Figura 2). Esse método de amostragem, possibilita diluir o erro de posicionamento e o erro da amostragem da variável estudada (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

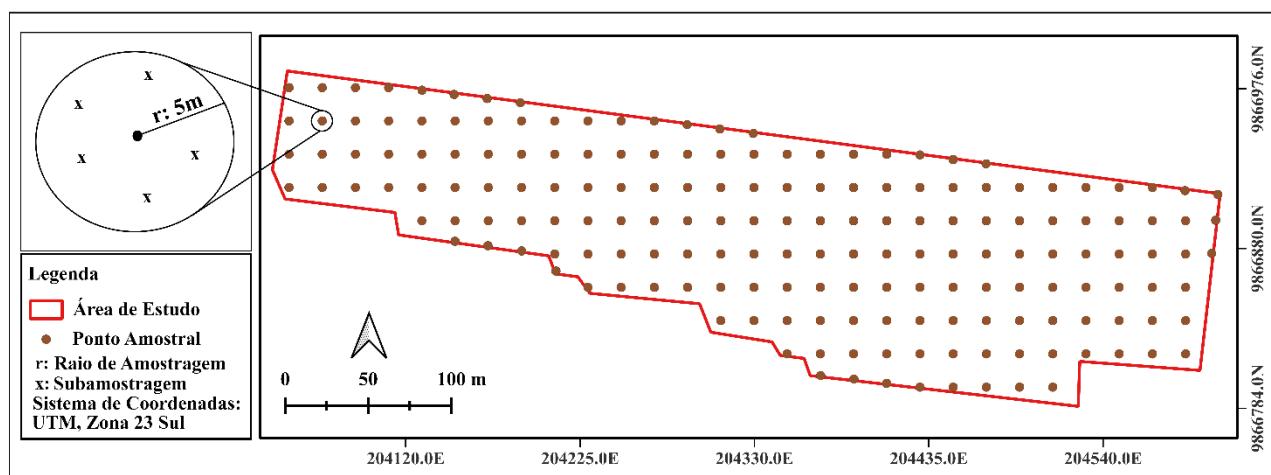


Figura 2 – Grade Amostral de Coleta da RPS.

Fonte: Autores (2024).

A análise de profundidade foi limitada a 0-10 cm devido ao entrelaçamento das raízes da palma de óleo. As medições foram feitas em condições sem chuva e após seis horas de qualquer precipitação para evitar a saturação do solo. Um único operador utilizou o penetrômetro da marca SOLO TEST (REF. 1.210.001) para garantir a consistência. Após a tabulação das informações coletadas, os dados foram divididos por 6,33 para se obter a métrica em kgf/cm². Em seguida, os dados foram transformados para Megapascal (MPa). Utilizou-se a seguinte equação de conversão:

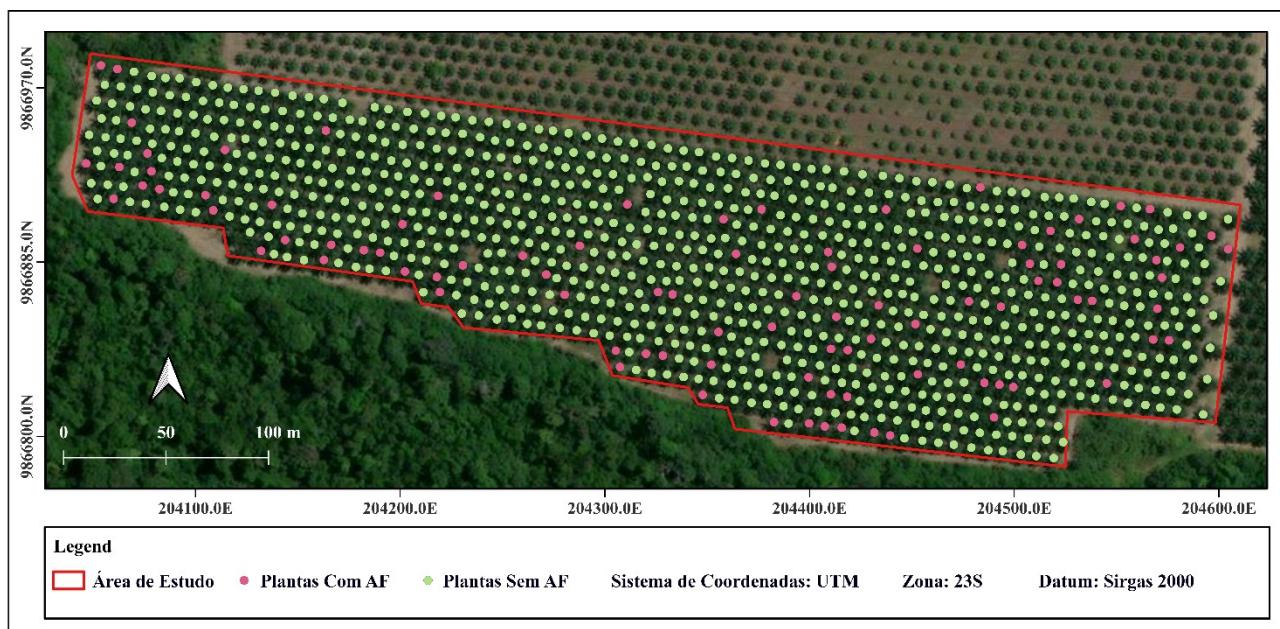
$$\text{RPS (MPa)} = 0,0980665^* \times \text{kgf/cm}^2 \quad (1)$$

Onde:

* Fator multiplicativo de conversão.

2.3 Levantamento do Amarelecimento Fatal da Palma de Óleo (AF)

A equipe de fitossanidade da fazenda Nogami identificou as plantas com Amarelecimento Fatal (AF) seguindo a sintomatologia descrita por Boari (2008). Um inventário fitossanitário foi criado no segundo semestre de 2020. Os dados inicialmente estavam em coordenadas de linha e planta, sendo convertidos para coordenadas UTM usando o QGIS 3.34. As plantas foram georreferenciadas e classificadas em um arquivo shapefile como "Plantas COM AF" e "Plantas SEM AF", totalizando 928 plantas, das quais 95 estavam doentes e 833 saudáveis (Figura 3).



*Figura 3 – Mapa de incidência do AF.
Fonte: Autores (2024).*

2.4 Análise Exploratória dos Dados

Após as medições de campo e a conversão dos dados da RPS para MPa, procedeu-se à construção dos gráficos de histograma e boxplot e à realização do teste de normalidade Shapiro-Wilk a 5% de significância. Em seguida, foi conduzida uma análise estatística descritiva dos dados, na qual foram calculadas a média, mediana, mínimo, máximo, assimetria, curtose e coeficiente de variação. Essas etapas são essenciais para compreender a natureza dos dados, uma vez que fornecem informações cruciais que auxiliam na tomada de decisões durante o processo de modelagem do Semivariograma Experimental (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015; YAMAMOTO, 2020).

2.5 Confecção do Mapa de Predição da RPS

Para a confecção do mapa de predição da RPS, foi utilizado o método geoestatístico 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:

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

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, foi ajustado o modelo semivariográfico mais adequado para estimar a semivariância da RPS. Para isso, foram testados os modelos esférico (3), exponencial (4) e gaussiano (5), sendo estes os mais adequados para a ciência dos solos (DE OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2015). Segundo Isaaks e Srivastava (1989), os três modelos são descritos da seguinte forma:

$$Esf(h) = C_0 + C_1[1,5(\frac{h}{a}) - 0,5(\frac{h}{a})^3] \quad \text{Para } h < a \quad (3)$$

$$Esf(h) = C_0 + C_1 \quad \text{Para } h \geq a$$

$$Exp(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-\frac{h}{a})] \quad (4)$$

$$Gau(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-\frac{h^2}{a^2})] \quad (5)$$

Onde (para os três modelos):

C_0 = efeito pepita

C_1 = contribuição

a = alcance

h = distância entre o ponto conhecido e a ser estimado

Para avaliar a qualidade dos modelos semivariográficos em relação ao semivariograma experimental da RPS, recorre-se à análise de dois indicadores: o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE). Quanto mais próximo de 1 for o R^2 e mais próximo de 0 for o RMSE, melhor será o ajuste do modelo semivariográfico ao semivariograma experimental (BHUNIA; SHIT; CHATTOPADHYAY, 2018; DE OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2015). Suas expressões matemáticas são as seguintes:

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad \left\{ \begin{array}{l} SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \\ SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \end{array} \right. \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

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 de avaliação foi o Índice de Dependência Espacial (IDE), sugerido por Trangmar et al. (1986) 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:

$$\text{IDE} = (\frac{C_0}{C_0+C_1})100 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{IDE} \leq 25, \text{Forte} \\ 25 < \text{IDE} < 75, \text{Moderado} \\ \text{IDE} \geq 75, \text{Fraco} \end{array} \right. \quad (8)$$

Onde:

C_0 = efeito pepita

C_1 = contribuição

Como teste decisivo, para discernir o modelo mais adequado entre os modelos semivariográficos que tiveram os critérios avaliativos semelhantes, foi realizado 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, pode-se calcular o coeficiente de determinação (R^2_{cv}) e a raiz quadrada do erro médio quadrático ($RMSE_{cv}$) 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 da RPS coletada em campo. Suas equações matemáticas são respectivamente:

$$R^2_{CV} = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad \left\{ \begin{array}{l} SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (e_i - \hat{e}_i)^2 \\ SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)^2 \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\{RMSE_{CV} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \hat{e}_i)^2} \quad (10)$$

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 do modelo semivariográfico que melhor representa a RPS, foi realizado a interpolação por krigagem ordinária. Esse interpolador geoestatístico permite estimar valores de variáveis distribuídas no espaço, utilizando as propriedades estruturais do modelo semivariográfico (Efeito Pepita, Patamar e Alcance), assim, obtendo uma matriz de covariança 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 de RPS, cuja soma foi igual a 1 (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Em seguida, aplica-se a fórmula matemática da krigagem ordinária para a construção do mapa de predição:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z[x_1] \quad (11)$$

Onde:

n = número de vizinhos medidos

$Z[x_1]$ = valor conhecido de cada ponto

λ_i = ponderadores aplicados a cada $Z[x_1]$

2.6 Extração dos Dados e Análise Comparativa

Após a confecção do mapa de predição da RPS, utilizando a ferramenta “amostrar valores do raster” do programa Qgis 3.34, juntamente com o arquivo shapefile do inventário fitossanitário da área de estudo, pode-se extrair os valores da RPS para cada planta, dessa forma, criando 2 grupos independentes (Plantas COM AF e Plantas SEM AF) para análise comparativa.

Como os dados de cada grupo não atenderam aos pressupostos paramétricos, foi utilizado o teste não paramétrico Mann-Whitney a 5% de significância. Também foi construído gráfico de Boxplot e calculados as medianas de cada grupo para demonstração comparativa dos dados.

2.7 Softwares Utilizados

Para a replicabilidade do estudo, esta pesquisa utilizou exclusivamente softwares gratuitos e de código aberto. Como sistema operacional computacional, utilizou-se o Linux Mint Debian Edition 6 Faye. Para organização e tabulação dos dados, utilizou-se o software Libreoffice Calc. Para as análises estatísticas, geoestatística e construções de gráficos, foi utilizado a linguagem de programação R 4.2.2 (R CORE TEAM, 2022), combinado à interface gráfica Rstudio e os pacotes gstat, rstatix, psych e ggplot2. Para o layout dos mapas, confecção do mapa de localização e mapa fitossanitário do AF, foi utilizado o software livre Qgis 3.34 e o plugin QuickMapServices.

3. Resultados

3.1 Estatística Descritiva

Os resultados da análise estatística descritiva das observações de campo da RPS revelam um coeficiente de variação de 19,47%, indicando uma baixa variabilidade espacial. Além disso, foi observada uma assimetria e curtose negativa, embora estas sejam menores que -1. Isso sugere que os dados estão ligeiramente concentrados à direita do observador, com uma curva levemente achatada. Apesar da presença de distribuições assimétricas nos dados, os valores da média e da mediana são próximos, o que confirma que não há uma assimetria pronunciada (Tabela 1).

Tabela 1 – Estatística Descritiva dos dados da RPS analisados na profundidade de 0-10 cm.

Variável	Informações	Dados
Resistência à Penetração do Solo (MPa)	Observações (n)	179
	Média (\bar{x})	3,03
	Mediana (M_d)	3,04
	Desvio Padrão (s)	0,59
	Variância (s^2)	0,35
	Valor Mínimo	1,7
	Valor Máximo	4,28
	Coeficiente de Assimetria (Cs)	-0,16
	Coeficiente de Curtose (Ck)	-0,57
	Coeficiente de Variação (CV)	19,47%

Fonte: Autores (2024).

Ao analisar o histograma, o boxplot e os resultados do teste de Shapiro-Wilk, pode-se concluir que os dados da RPS não possuem valores extremos e exibem uma distribuição normal (Figura 4). Essa característica, corroborada pela estatística descritiva, reflete um bom adensamento amostral, o que permitiu a captura eficaz da assinatura da variabilidade espacial do fenômeno. Isso, por sua vez, facilita o procedimento de ajuste do semivariograma experimental. No entanto, é importante ressaltar que a condição de normalidade dos dados não é estritamente necessária para a aplicação da geoestatística e da krigagem ordinária.

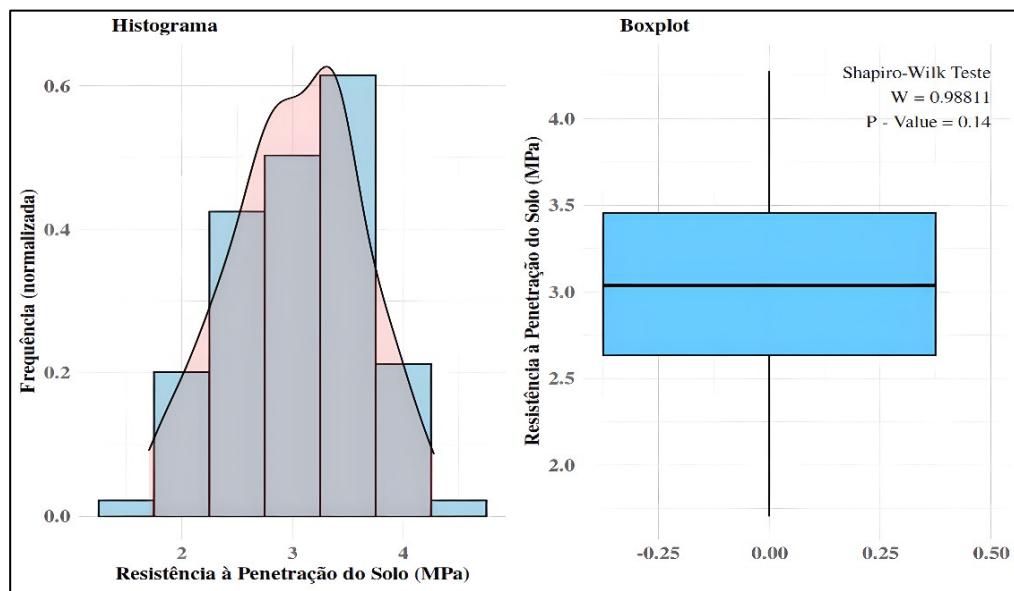


Figura 4 – Histograma, Boxplot e Teste Shapiro-Wilk dos dados da RPS analisados na profundidade de 0-10 cm.
Fonte: Autores (2024).

3.2 Análise Geoestatística

Considerando as medições realizadas sobre a Resistência à Penetração do Solo, as análises geoestatísticas efetuadas e os procedimentos de validação cruzada empregados, foi possível realizar o ajuste do semivariograma experimental, sendo o comportamento da variável, o modelo Exponencial (Figura 5).

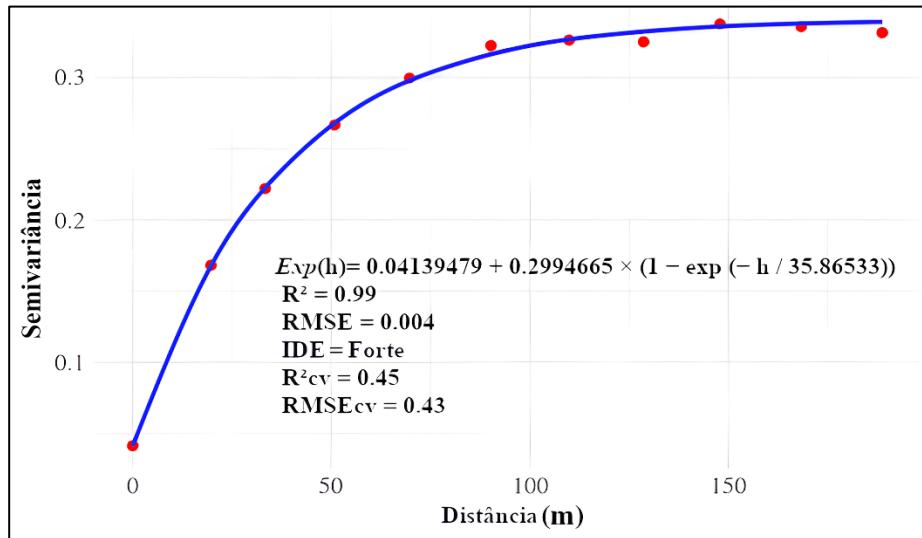


Figura 5 – Ajuste do modelo semivariográfico e seus parâmetros para a RPS analisados na profundidade de 0-10 cm.
Fonte: Autores (2024).

O coeficiente de determinação (R^2) demonstrou uma proximidade significativa com 1, indicando um ajuste robusto do modelo ao semivariograma experimental. Além disso, a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) se aproximou de zero, sugerindo uma boa capacidade de previsão do modelo. O índice de dependência espacial (IDE) revelou uma forte correlação espacial entre as observações, o alcance do modelo foi estimado em 35,87 metros, um valor relativamente baixo,

o que indica mudanças frequentes na Resistência à Penetração do Solo (RPS) em um curto período de espaço. Os valores de R^2_{cv} e RMSE_{cv} se destacaram como os mais favoráveis entre os três modelos avaliados, evidenciando o modelo exponencial como o mais adequado entre os modelados testados.

3.3 Incidência do AF da palma de óleo em resposta à RPS

Ao analisar a distribuição espacial da incidência do AF e a variabilidade espacial da RPS, que variou de 1,88 a 4,05 MPa, demonstra-se que suas concentrações são mais pronunciadas ao sul da área de estudo, indicando uma influência da RPS sobre a incidência da doença (Figura 6).

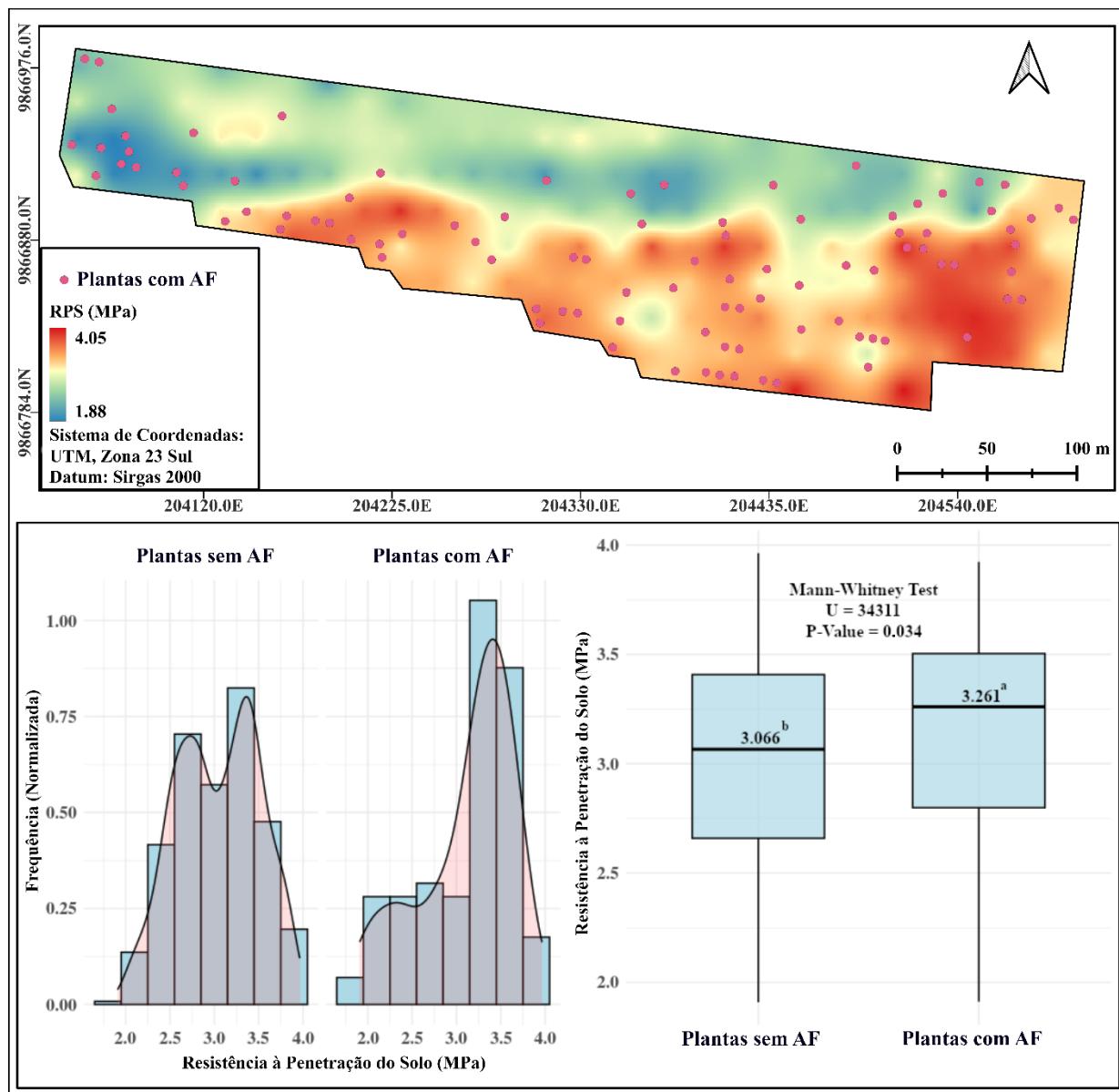


Figura 6 – Mapa de predição da RPS, Distribuição espacial do AF, Histograma e Boxplot da RPS para os grupos Plantas com AF e Plantas sem AF.

Fonte: Autores (2024).

Essa constatação é corroborada pela análise dos histogramas dos grupos plantas com AF e plantas sem AF, que revelam uma maior concentração de plantas doentes em valores onde a RPS é mais pronunciada. Isso é evidenciado pela tendência central do histograma plantas com AF, que está deslocada para a direita, em torno de 3,5 MPa. Além disso, a análise do boxplot revela uma mediana mais elevada para o grupo de plantas com AF, indicando diferenças estatisticamente entre os grupos, conforme o teste de Mann-Whitney, com um nível de significância de 5%. Portanto, esses dados sugerem que áreas com maior RPS apresentam uma maior incidência de AF em palma de óleo.

4. Discussão

A etapa de análise descritiva é extremamente importante na análise dos dados, permite identificar falhas, desde erros de output dos dados a erros de calibragem do aparelho, e permitem obter um entendimento preliminar do comportamento da variável estudada (AMARAL; FIGUEIREDO, 2022; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Outro fator importante, é o coeficiente de variação (CV), segundo os preceitos delineados por Pimentel-Gomes (2022) no âmbito da estatística clássica, a mensuração do coeficiente de variação é um indicador fundamental em contextos experimentais de campo. De acordo com essa perspectiva, um coeficiente de variação inferior a 10% é indicativo de uma precisão alta, refletindo a consistência metodológica do estudo. Também, intervalos situados entre 10% e 20% são considerados bons, mantendo um nível satisfatório de precisão.

No entanto, ainda para o mesmo autor, ao ultrapassar a faixa dos 20% até 30%, evidencia-se uma incerteza crescente, o que compromete a confiabilidade dos resultados. Acima de 30%, o coeficiente de variação denota uma variabilidade excessiva, comprometendo as conclusões do experimento. Nesse contexto, a detecção do coeficiente de variação abaixo de 20% nas aferições de campo da RPS na camada de 0 – 10 cm, reitera uma boa precisão do experimento, conferindo-lhes uma base confiável para as análises posteriores.

Em relação aos parâmetros geoestatísticos, a avaliação da confiabilidade do ajuste do modelo semivariográfico para o semivariograma experimental pode ser realizada por meio dos coeficientes de determinação (R^2), sendo de 0,99 para o modelo exponencial da variável RPS. Conforme indicado por Tavanti et al. (2019), modelos semivariográficos com R^2 a partir de 0,50 já demonstram um ajuste aceitável, ratificando a robustez do ajuste do modelo utilizado para a análise da RPS.

Outro critério de análise é o alcance do modelo semivariográfico, que indica o raio da dependência espacial da variável, isto é, a extensão até a qual distâncias os valores são semelhantes entre si (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015; YAMAMOTO, 2020; YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Na área de estudo, no cultivo de palma de óleo, esse alcance foi determinado como sendo de 35,87 m para a RPS. Essa variável é altamente sensível ao estresse mecânico à qual o solo é submetido (NEGRÓN; LÓPEZ; DÖRNER, 2019). Estudos demonstram que em áreas como pastagens, sujeitas ao constante pisoteio de bovinos, observou-se ao longo do tempo, um aumento de 800% da RPS para a camada de 0 – 10 cm, sendo os alcances variando entre 8 e 12 m (BATISTA et al., 2024).

Enquanto em plantações de cana-de-açúcar, onde todas as operações são mecanizadas, desde o plantio até a colheita, situação um pouco menos intenso que o pastoril, os alcances variaram entre 22 e 24 m (SOUZA; MARQUES JÚNIOR; PEREIRA, 2004). Isso sugere que o estresse mecânico é menos pronunciado no cultivo da palma de óleo em comparação com esses agroecossistemas, uma vez que algumas práticas, como o manejo de poda e colheita, menos a parte de recolhimento dos cachos, ainda são realizadas de forma manual. No entanto, o parâmetro alcance não ratifica um bom estado condicional do solo.

Acerca da RPS, vale salientar que valores compreendidos entre 2 a 4 MPa são considerados elevados (BEUTLER et al., 2001; SILVA et al., 2020; VALADÃO et al., 2011), denotando uma condição desfavorável na área de estudo (1,88 a 4,05 MPa). Nesse contexto, o tráfego intenso de implementos pesados emerge como o principal fator desse estresse mecânico. Em virtude da ausência de sazonalidade na produção, a colheita da palma de óleo ocorre de forma contínua ao longo do ano. Durante o período chuvoso, a operação de maquinários nos campos para o recolhimento dos cachos induz à formação de crostas no solo, promovendo uma maior coesão das partículas, e consequentemente, um aumento significativo na RPS (YU et al., 2024). Estudos mais localizados têm demonstrado que a RPS se mostra mais pronunciada nas linhas de tráfego dos implementos agrícolas do que nas vias dedicadas exclusivamente à deposição de palhada da palma de óleo (SATO et al., 2017).

No contexto da incidência do AF, uma das potenciais causas é a hipóxia do solo. Essa condição propicia o aumento de íons reduzidos, como Fe^{2+} , Mn^{3+} e NO^{3+} na solução do solo, resultando em danos ao sistema radicular e posterior manifestação dos sintomas associados ao AF (TEIXEIRA et al., 2017). Em locais onde a RPS é mais elevada, indica maior

compactação e menor aeração do solo, observando uma possível migração acentuada desses íons reduzidos para a solução do solo. Além disso, solos com maior teor de argila tendem a possuir óxidos metálicos em sua mineralogia e uma maior coesão entre suas partículas, o que contribui para uma RPS mais alta e uma concentração maior de óxidos metálicos, como ferro e manganês, na solução do solo, agravando assim a intoxicação da planta (NASCIMENTO et al., 2018).

No entanto, estudos indicam que solos com uma atividade biológica mais intensa apresentam uma maior incidência de AF (NAKAKOJI, 2024). Essa atividade biológica só pode ser observada em solos com predominância de condições aeróbicas, uma vez que é comprovado que a atividade anaeróbica, que solubiliza os íons metálicos, é consideravelmente menor do que a atividade aeróbica (PRIMAVESI, 2022; SCHAEFER, 2012), o que não geraria esses índices de atividade biológica do estudo, portanto, a hipóxia do solo possa não ser a causa única para o AF, suscitando a investigação de outros fatores, como a desnutrição das plantas.

Em solos com elevada RPS, gera-se o encurtamento das raízes e a menor disponibilidade de ar, o que causa a redução da respiração celular das plantas, tornando-as mais vulneráveis a microrganismos oportunistas (JUNIOR et al., 2014; PRIMAVESI, 2022), principalmente em locais onde a atividade biológica é mais pronunciada. Esses microrganismos podem desencadear a degradação das raízes mais tenras, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, culminando na sintomatologia característica do AF.

Em uma análise adicional, conduzida para detecção de metabólicos extraídos de amostras foliares, provenientes de plantas saudáveis e enfermas, revelou uma deficiência em nove metabólicos nas plantas afetadas pelo AF, destacando-se dois em particular, a tiramina e a glicerofosforilcolina (GPC) (RODRIGUES-NETO et al., 2018). A tiramina é reconhecida como um metabólico crucial empregado pelas plantas em resposta a agressões de insetos e herbívoros, além de apresentar propriedades defensivas contra a salinidade em plantações de arroz, em solanáceas, a tiramina é sintetizada em resposta a danos provocados por patógenos (GUILLET; DE LUCA, 2005; LEFÈVRE; GRATIA; LUTTS, 2001; SERVILLE et al., 2017).

Quanto à GPC, durante o processo catabólico mediado pelas fosfodiesterases extracelulares, ocorre a absorção e distribuição de colina nas células vegetais, desempenhando um papel fundamental na regulação lipídica (KHAN; FARIDUDDIN; YUSUF, 2017; VAN DER REST et al., 2002). A elevação das enzimas fosfodiesterases extracelulares, geralmente observada em condições de deficiência de fósforo, acarreta uma diminuição nos níveis de GPC (RODRIGUES-NETO et al., 2018), cuja insuficiência, em conjunto com a ausência de tiramina, pode precipitar a vulnerabilidade das raízes jovens da palma de óleo, desencadeando a síndrome do amarelecimento fatal.

Como conjectura, é plausível sugerir que o aumento da resistência à penetração do solo pode desencadear um desequilíbrio nutricional na palma de óleo, contribuindo assim para a deficiência dos metabólitos mencionados. Este desequilíbrio é potencializado pela hipóxia do solo, como já supramencionado, e pelo aumento do teor de argila, fenômenos que coincidem com o aumento da resistência à penetração do solo. A elevação na proporção de argila, por sua vez, favorece o aumento da RPS e, consequentemente, propicia a imobilização do fósforo pelos óxidos metálicos presentes (DOS SANTOS et al., 2020), resultando na carência de GPC. Este conjunto de condições adversas agrava ainda mais a situação desfavorável da planta, contribuindo para o desenvolvimento da sintomatologia do AF.

É válido ressaltar também o papel do fator genético na manifestação AF, uma vez que plantas saudáveis e doentes compartilham frequentemente o mesmo ambiente onde apresentam características semelhantes de RPS. Essa observação pode estar relacionada à variabilidade genética inerente a cultivar Tenera, a qual é proveniente de populações (GOMES JR. et al., 2014). Essa diversidade genética confere a cultivar uma ampla gama de manifestações fenotípicas, tais como diâmetros de troncos variáveis, altura das plantas, produção de óleo, entre outras que são facilmente observados em campo.

Assim, é plausível que dentro dessa diversidade genética existam indivíduos que possuam maior resistência às condições adversas do solo e, portanto, nunca manifestem a sintomatologia do AF. Esta adaptabilidade genética pode ser um fator determinante na capacidade das plantas de tolerar e se recuperar de condições desfavoráveis do solo, ressaltando a importância da seleção de exemplares mais resistentes ao AF para garantir a produtividade e a sustentabilidade dos cultivos de palma de óleo.

4. Considerações finais

A elaboração de mapas de variabilidade espacial da resistência à penetração do solo constitui um método válido e promissor, capaz de identificar áreas que necessitam de intervenção para aprimorar as condições do solo e, consequentemente, atenuar a incidência do Amarelecimento Fatal da palma de óleo.

No entanto, é crucial reconhecer que a resistência à penetração do solo, isoladamente, não explica de maneira completa as causas dessa enfermidade. Ainda há uma necessidade significativa de estudos aprofundados sobre fatores edafoclimáticos e genéticos para esclarecer as causas do AF.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) pelo apoio técnico prestado e pela disponibilização do penetrômetro. Com grande apreço, agradecemos à Fazenda Nogami pela concessão da área de estudo e pelo fornecimento de dados referentes ao Amarelecimento Fatal (AF). Além disso, o primeiro autor estende seus sinceros agradecimentos ao ecólogo Dr. Maurício Humberto Vancine pela valiosa disponibilização das configurações que possibilitaram a adaptação do R para aplicações em geoprocessamento, contribuindo significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- ABRAPALMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA. Diagnóstico da palma de óleo brasileira. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/pt/a-palma-no-brasil-e-no-mundo/>. Acesso em: 23 mar. 2024.
- AMARAL, L. R. DO; FIGUEIREDO, G. K. D. Geoprocessamento aplicado ao gerenciamento de lavouras. In: *Agricultura digital*, 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2022.
- BATISTA, P. H. D. et al. Assessment spatial soil physical properties under rotational cattle grazing in Northeastern Brazil. 2024.
- BENEZOLI, V. H. et al. Modeling oil palm crop for Brazilian climate conditions. *Agricultural Systems*, v. 190, p. 103130, 1 maio 2021.
- BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 1, p. 167–177, mar. 2001.
- BHUNIA, G. S.; SHIT, P. K.; CHATTOPADHYAY, R. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). *Annals of Agrarian Science*, v. 16, n. 4, p. 436–443, dez. 2018.
- BOARI, A. DE J. Estudos realizados sobre o amarelecimento fatal do dendêzeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) no Brasil. *Documentos* 348, n. 1a ed., p. 66, 2008.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, 1994.
- COLOMBI, T. et al. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Science of The Total Environment*, v. 626, p. 1026–1035, 1 jun. 2018.
- DE OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- DOS SANTOS, D. et al. Ciclo biogeoquímico do fósforo, diagnóstico de disponibilidade e adubação fosfatada. [s.l.: s.n.].
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Mapas de solos e de aptidão agrícola das áreas alteradas do Pará. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147241/1/MapasSolosPara.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2024.
- 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, set. 2002.

- FERNANDES, J. A. F. et al. Contexto socioambiental del cultivo extensivo de palma en Colombia. *Mercator (Fortaleza)*, v. 21, p. e21007, 18 maio 2022.
- GLORIA, G. C. P. et al. Root morphological traits of oil palm genotypes with differential resistance to fatal yellowing. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 42, n. 6, p. 3073–3088, 12 ago. 2021.
- GOMES JR., 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, 1 jan. 2014.
- 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, 1 fev. 2005.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE | Cidades@ | Pará | Igarapé-Açu | Panorama. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/igarape-acu/panorama>. Acesso em: 24 mar. 2024.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied geostatistics. New York: *Oxford University Press*, 1989.
- JUNIOR, D. D. V. et al. Penetration resistance according to penetration rate, cone base size and different soil conditions. *Bragantia*, v. 73, p. 171–177, jun. 2014.
- KHAN, T. A.; FARIDUDDIN, Q.; YUSUF, M. Low-temperature stress: is phytohormones application a remedy? *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 27, p. 21574–21590, set. 2017.
- LEFÈVRE, I.; GRATIA, E.; LUTTS, S. Discrimination between the ionic and osmotic components of salt stress in relation to free polyamine level in rice (*Oryza sativa*). *Plant Science*, v. 161, n. 5, p. 943–952, out. 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, 8 jan. 2020.
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. DO; COLAÇO, A. F. Agricultura de precisão. 1. ed. São Paulo, SP: *Oficina de Textos*, 2015.
- MORAES, M. T. DE et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 200, p. 104611, 1 jun. 2020.
- NAKAKOJI, N. K. N. et al. Geo-statistical analysis of enzymatic, chemical, and granulometric soil attributes in response to the incidence of Fatal Yellowing in oil palm. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 10, e08995, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-214>. Acesso em: 01 mar. 2025.
- NASCIMENTO, S. V. DO et al. Differential accumulation of proteins in oil palms affected by fatal yellowing disease. *PLOS ONE*, v. 13, n. 4, p. e0195538, 5 abr. 2018.
- NEGRÓN, M.; LÓPEZ, I.; DÖRNER, J. Consequences of intensive grazing by dairy cows of contrasting live weights on volcanic ash topsoil structure and pasture dynamics. *Soil and Tillage Research*, v. 189, p. 88–97, jun. 2019.
- PACHÊCO, N. A.; BASTOS, T. X. Boletim Agrometeorológico 2006 - Igarapé-Açu. *Documentos* 296, p. 30, 2007.
- PIMENTEL-GOMES, F. Curso de estatística experimental. 15. ed. Piracicaba, SP: Fealq, 2022.
- PRIMAVESI, A. M. Manual do solo vivo. 2. ed. São Paulo, SP: *Expressão Popular*, 2022.
- R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 4 fev. 2024.

- RODRIGUES-NETO, J. C. 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, n. 10, p. 142, 11 out. 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, set. 2021.
- SATO, M. K. et al. Least limiting water range for oil palm production in Amazon region, Brazil. *Scientia Agricola*, v. 74, n. 2, p. 148–156, abr. 2017.
- SCHAEFER, C. E. G. R. Pedologia: fundamentos. [s.l.]: Sbcs, 2012.
- SERVILLO, L. et al. Tyramine pathways in citrus plant defense: glycoconjugates of tyramine and its N-methylated derivatives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 65, n. 4, p. 892–899, 1 fev. 2017.
- SHAHBANDEH, M. Vegetable oils consumption worldwide 2023/24. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263937/vegetable-oils-global-consumption/>. Acesso em: 23 mar. 2024.
- SILVA, G. J. et al. Resistência à penetração em solo sob pastagem degradada. *Cultura Agronômica: Revista de Ciências Agronômicas*, v. 29, n. 2, p. 256–273, 13 jul. 2020.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 6, p. 937–944, dez. 2004.
- 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*, v. 34, n. 4, p. 1569–1594, 1 abr. 2022.
- TAVANTI, R. F. R. et al. Least limiting water as a soil indicator in an integrated crop-livestock systems of the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, v. 19, p. e00232, nov. 2019.
- TEIXEIRA, W. G. et al. A hipótese abiótica como agente causal do amarelecimento fatal (AF) da palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) no Brasil. *Amazônia e seus solos: peculiaridades e potencialidades*. Anais... In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Belém, PA: SBCS, 2017.
- 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, abr. 2016.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: ADVANCES IN AGRONOMY, Hawaii: Elsevier, 1986. v. 38, p. 45–94.
- VALADÃO, F. C. D. A. et al. Variação nos atributos do solo em sistemas de manejo com adição de cama de frango. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 6, p. 2073–2082, dez. 2011.
- VAN DER REST, B. et al. Glycerophosphocholine metabolism in higher plant cells: evidence of a new glyceryl-phosphodiester phosphodiesterase. *Plant Physiology*, v. 130, n. 1, p. 244–255, 1 set. 2002.
- YAMAMOTO, J. K. Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais. 1. ed. São Paulo: *Grafica Paulos*, 2020.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: *Oficina de Textos*, 2013.
- YU, C. et al. The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*, v. 29, p. 100838, mar. 2024.