

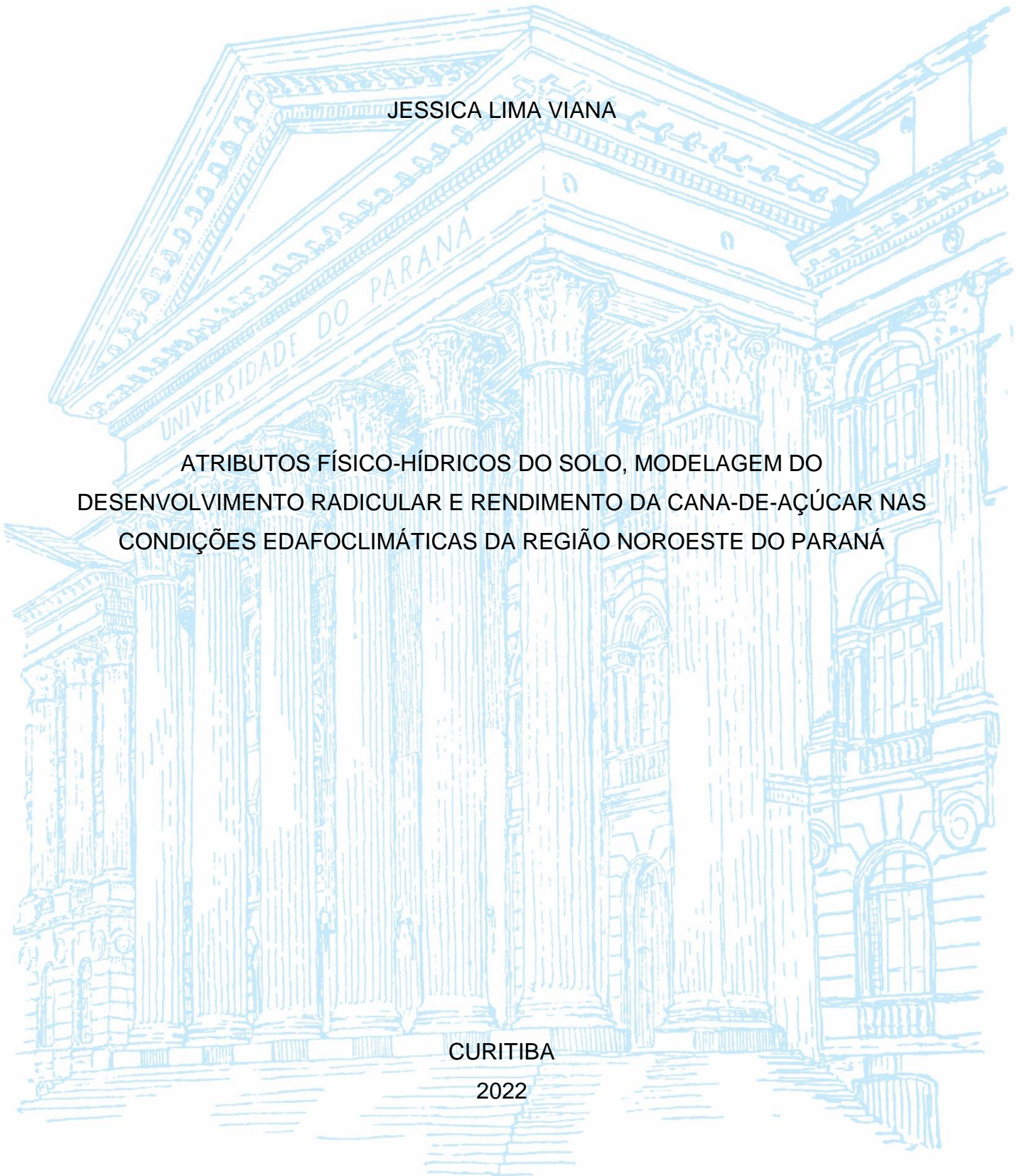
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JESSICA LIMA VIANA

ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO, MODELAGEM DO
DESENVOLVIMENTO RADICULAR E RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NAS
CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ

CURITIBA

2022



JESSICA LIMA VIANA

ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO, MODELAGEM DO
DESENVOLVIMENTO RADICULAR E RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NAS
CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto de Oliveira

CURITIBA

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA

Viana, Jessica Lima

Atributos físico-hídricos do solo, modelagem do desenvolvimento radicular e rendimento da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas da região noroeste do Paraná / Jessica Lima Viana. – Curitiba, 2022.

1 recurso online: PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto de Oliveira

1. Solos – Análise - Paraná. 2. Cana-de-açúcar.
I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II. Oliveira, Ricardo Augusto de. III.
Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-
Graduação Ciência do Solo. IV. Título.

Bibliotecário: Douglas Alex Jankoski CRB-9/1167



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JESSICA LIMA VIANA** intitulada: **ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO, MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO RADICULAR E RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ**, sob orientação do Prof. Dr. JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Fevereiro de 2022.

Assinatura Eletrônica

22/02/2022 18:35:03.0

JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/02/2022 20:45:26.0

LUIZ RICARDO SOBENKO

Avaliador Externo (VALLEY IRRIGATION)

Assinatura Eletrônica

23/02/2022 18:24:57.0

BRUNO CESAR GURSKI

Avaliador Externo (FERTIPAR - FERTILIZANTES DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

22/02/2022 18:14:43.0

RICARDO AUGUSTO DE OLIVEIRA

Coorientador(a)

Assinatura Eletrônica

24/02/2022 11:02:59.0

CORNÉLIO ALBERTO ZOLIN

Avaliador Externo (EMBRAPA AGROSSILVIPASTORIL MT)

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5648 - E-mail: pgcisolo@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 154405

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 154405

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Jesus e o Espírito Santo pelo amor e misericórdia, por todas as bênçãos e pessoas especiais em minha vida, família, família de Curitiba, amigos, amigas do futsal, da igreja, orientador e professores. Gratidão por todos momentos e ensinamentos.

À mãe Maria Santíssima pelo amor e cuidado.

À intercessão de Santa Rita de Cássia.

Família, José Luiz Viana, Roza Celma Lima Viana, Tiago Lima Viana, Janaína Lima Viana, Pedro Henrique Baldin Viana, Bruna Maria de Miranda Viana, Luciana Miranda.

Família de Curitiba, Larissa, Lenir, Daiane e Thais.

Amigos, Ana Paula, Taise, Suian, Yohanne e Davi.

Às meninas do time de futsal La Corote.

Adri e Marlova e nossos passeios de bicicleta por Curitiba.

Orientador Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

Coorientador Dr. Ricardo Augusto de Oliveira.

Amigos e professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Professor Dr. André Carlos Auler.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná.

Ao Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/SCA/UFPR e a RIDESA.

Renã e toda equipe da RIDESA.

Amigos do LAMOSA, Aline, Stefanie, Jocelito, Felipe, Denis, Juliana.

À Universidade Federal do Paraná.

À Capes.

À banca Dr. Cornélio Alberto Zolin, Dr. Bruno Cesar Gurski e Dr. Luiz Ricardo Sobenko.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial da cana-de-açúcar e a identificação dos fatores mais sensíveis do solo e clima que interferem no desenvolvimento radicular e rendimento da cultura é fundamental para entender, prever mudanças e subsidiar a implantação e condução da lavoura, com o uso eficiente dos recursos ambientais disponíveis. Modelos de produção são utilizados em pesquisas agronômicas com o intuito de avaliar o comportamento e respostas das plantas a diferentes condições ambientais que são submetidas. Teve-se por objetivo na realização do presente trabalho identificar os principais fatores do solo e clima que interferem no desenvolvimento radicular e rendimento da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas de Paranavaí-PR, mediante a avaliação e identificação de modelos para sua estimativa. Os dados observados do desenvolvimento radicular e rendimento da cana-de-açúcar foram provenientes de experimentos realizados na área da Estação Experimental de Paranavaí / RIDESA, coletados ou levantados no período de 2002-2003 e 2011-2012 (desenvolvimento radicular) e 1999-2006, 2008, 2018 e 2019 (rendimento). A base de dados foi composta da coleta de amostras deformadas e indeformadas do solo, análise dos atributos físico-hídricos do solo na área de estudo e dos dados agrometeorológicos disponíveis de uma estação meteorológica na região de Paranavaí. A avaliação do desempenho estatístico dos modelos de estimativa do desenvolvimento radicular e rendimento da cana-de-açúcar foram realizados estimando os erros e índice estatísticos. A pesquisa foi estruturada em cinco capítulos: Capítulo I – Referencial teórico; Capítulo II – Dinâmica da água e funções hidráulicas em solos arenosos: limitações ao cultivo da cana-de-açúcar no Sul do Brasil; Capítulo III – Temperatura basal inferior para o desenvolvimento da cana-de-açúcar em clima subtropical; Capítulo IV – Modelagem do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar na região de Paranavaí – PR; e, Capítulo V – Modelo multivariado de estimativa do rendimento da cana-de-açúcar em clima subtropical considerando variáveis climáticas e o armazenamento de água no solo. Nas análises verificou-se que: *i*) Nos solos arenosos analisados, as frações areia grossa e fina precisou ser mensurada para melhor avaliação dos atributos físico-hídrico do solo. Os maiores teores de areia grossa interferiram no aumento da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e não saturado ($K(\theta)$), diâmetro máximo do poro (d_{max}) e macroporosidade (*Macro*), bem como na redução da microporosidade (*Micro*). Os teores de areia fina reduziram a K_s e aumentaram a retenção de água no solo, nas camadas subsuperficiais; *ii*) A temperatura basal inferior (T_b) das três variedades de cana-de-açúcar analisadas variou entre $20,5 \leq T_b \leq 23,0$ °C na Segunda Fase de desenvolvimento. A T_b foi de 15,5 e 15,0 °C na Terceira Fase de desenvolvimento das variedades RB036066 e RB966928, respectivamente. O modelo linear não foi significativo para estimar a T_b da RB867515; *iii*) A densidade de comprimento radicular e o volume radicular da cana-de-açúcar são maiores na camada de 0-0,20 m. As raízes finas estão distribuídas em profundidade. Os modelos ajustados à profundidade efetiva que consideram os dias após plantio (*DAP*), dias julianos (*J*) e graus-dia acumulado (*GDA*) não foram satisfatórios. O modelo logístico foi adequado para estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar nos dias após o plantio (*DAP*); e, *iv*) A regressão linear múltipla com as variáveis climáticas e o armazenamento de água no solo apresenta capacidade preditiva da profundidade efetiva radicular da cana-de-açúcar. Os graus dia acumulado nas Fases I e II e o armazenamento de água no solo na Fase II de desenvolvimento exercem efeito significativo no rendimento da

cana-de-açúcar. O modelo de regressão linear múltipla com os graus dia acumulado (GDA_I) e o armazenamento de água no solo (Arm_{II}) nas Fases I e II de desenvolvimento apresenta capacidade preditiva do rendimento da cana-de-açúcar das variedades analisadas.

Palavras-chave: Atributos físico-hídricos do solo. Fatores climáticos. Profundidade efetiva radicular. Modelagem do rendimento. Relação solo-planta-atmosfera.

ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of sugarcane and the identification of the most sensitive soil and climate factors that interfere with root development and crop yield is essential to understand, predict changes and support the implementation and management of the crop, with the efficient use of available environmental resources. Production models used in agronomic research in order to evaluate environmental behavior and plant responses. The objective of the present work was to identify the main soil and climate factors that interfere in the root development and yield of sugarcane under the edaphoclimatic conditions of Paranaíba-PR, through the evaluation and identification of models for their estimation. The observed data of root development and yield of sugarcane came from experiments conducted in the area of the Experimental Station of Paranaíba / RIDESA, collected or surveyed in the period 2002-2003 and 2011-2012 (root development) and 1999-2006, 2008, 2018 e 2019 (yield). The database was composed of the collection of deformed and undeformed soil samples, analysis of the physical-hydric soil attributes in the study area and the agrometeorological data available from a weather station in the Paranaíba region. The statistical performance of the models for estimating root development and sugarcane yield were evaluated using statistical errors and indexes. The research was structured in five chapters: Chapter I – Theoretical framework; Chapter II – Water dynamics and hydraulic functions in sandy soils: limitations to sugarcane cultivation in southern Brazil; Chapter III – Lower basal temperature for sugarcane development in subtropical climate; Chapter IV – Sugarcane root development modeling in Paranaíba – PR region; and, Chapter V – Multivariate model for estimating sugarcane yield in subtropical climate considering climatic variables and soil water storage. In the analyses it was found that: *i)* In the sandy soils analyzed, the coarse and fine sand fractions needed to be measured for better evaluation of the soil physical-hydric attributes. The higher contents of coarse sand interfered in the increase of saturated (K_s) and unsaturated ($K(\theta)$) soil hydraulic, maximum pore diameter (d_{max}) and macroporosity (*Macro*), as well as in the reduction of microporosity (*Micro*). The fine sand contents reduced K_s and increased soil water retention in the subsurface layers; *ii)* The lower basal temperature (T_b) of the three sugarcane varieties analyzed ranged from $20.5 \leq T_b \leq 23.0$ °C in the Second Phase of development. In the Third Developmental Phase, T_b was 15.5 and 15.0 °C for varieties RB036066 and RB966928, respectively. The linear model was not significant to estimate the T_b of RB867515; *iii)* The root length density and root volume of sugarcane are highest in the 0-0.20 m layer. Fine roots are distributed at depth. The models fitted to the effective depth that consider days after planting (*DAP*), Julian days (*J*) and accumulated degree days (*GDA*) were not satisfactory. The logistic model was suitable for estimating the effective depth of the sugarcane root system at days after planting (*DAP*); and, *iv)* The multiple linear regression with climate variables and soil water storage showed predictive ability of sugarcane effective root depth. The accumulated degree days in Phases I and II and soil water storage in Phase II of development exert significant effect on sugarcane yield. The multiple linear regression model with the accumulated degree days (GDA_I) and the water storage in the soil (Arm_{II}) in Phases I and II of development presents predictive capacity of the sugarcane yield of the analyzed varieties.

Keywords: Soil water-physical attributes. Climatic factors. Effective root depth. Yield modeling. Soil-plant-atmosphere relationship.

LISTA DE SÍMBOLOS

Descrição dos principais símbolos utilizados no resumo geral, capítulos da tese e considerações gerais.

RESUMO GERAL

RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento Sucroenergético;
 K_S – Condutividade hidráulica do solo saturado;
 $K(\theta)$ – Condutividade hidráulica do solo não saturado;
 d_{max} – Diâmetro máximo do poro;
 $Macro$ – Macroporosidade;
 $Micro$ – Microporosidade;
 Tb – Temperatura basal inferior;
 DAP – Dias após plantio;
 J – Dias julianos;
 GDA – Graus-dia acumulado; e,
 Arm_{II} – Armazenamento de água no solo na Fase II de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

CAPÍTULO I

MF – Massa fresca;
 STa – Soma térmica acumulada;
 Ta – temperatura média do ar acumulada;
 STd – Soma térmica diária;
 STa – Soma térmica diária acumulada;
 DR – Densidade de comprimento radicular;
 z – Profundidade efetiva do sistema radicular;
 TCH – Rendimento da cana-de-açúcar; e,
 ATR – Açúcar Total Recuperável.

CAPÍTULO II

ρ_p – Densidade de partículas do solo;
 TP – Porosidade total;
 $Micro$ – Microporosidade;
 $Macro$ – Macroporosidade;
 ρ_s – Densidade do solo;
 θ – Saturação efetiva;
 $\theta(\psi_m)$ – Umidade volumétrica no solo;
 θ_r – Umidade volumétrica residual do solo;
 θ_s – Umidade volumétrica do solo na saturação;
 ψ_m – Potencial matricial da água no solo;
 α – Valor de entrada de ar;
 n – Parâmetro empírico do ajuste;

θ_{hco} – Umidade volumétrica do solo no potencial matricial de -1030 kPa, na i -ésima camada.
 ψ_{hco} – Ponto de sucção de água de poro no corte hidráulico;
 K_S – Condutividade hidráulica saturada;
 $K(\theta)$ – Condutividade hidráulica do solo não saturada;
 $\hat{\theta}_{CC}$ – Real umidade volumétrica na capacidade de campo;
 ψ_{CC} – Potencial matricial na capacidade de campo;
 τ – Taxa de drenagem;
 p – Porcentagem da K_S ;
 t_{CC} – Tempo correspondente à capacidade de campo;
 $\hat{\theta}_{IP}$ – Umidade no ponto de inflexão;
 ψ_{IP} – Potencial matricial no ponto de inflexão;
 σ – Tensão superficial da água;
 r – Raio do poro;
 r_{max} – Raio máximo do poro;
 d_{max} – Diâmetro máximo do poro;
 AWC – Capacidade de água disponível no solo;
 θ_{CCi} – Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo na i -ésima camada, no potencial matricial de -6 kPa;
 θ_{PMPI} – Umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente na i -ésima camada, no potencial matricial de -1500 kPa;
 $\hat{\theta}_{CC}$ – Umidade volumétrica do solo estimada na capacidade de campo na i -ésima camada, no potencial matricial ψ_{CC} ; e,
 EAW – Água Facilmente Disponível no solo (mm).

CAPÍTULO III

MF – Massa fresca da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.);
 DAP – Dias após plantio;
 STa – Soma térmica acumulada no período;
 STd_i – Soma térmica do i -ésimo dia;
 TB – Temperatura basal superior da cana-de-açúcar;
 TM – Temperatura máxima do ar do i -ésimo dia;
 Tm – Temperatura mínima do ar do i -ésimo dia;
 Tb – Temperatura basal inferior da cana-de-açúcar na fase considerada;
 A – Parâmetro numérico representando a assíntota da curva ajustada (Modelo Logístico);
 T_f – Parâmetro numérico que representa o valor T no ponto de inflexão da curva (Modelo Logístico);
 Ta – Temperatura média do ar acumulada; e,
 E – Parâmetro de escala numérica no eixo de entrada (Modelo Logístico).

CAPÍTULO IV

R_s – Radiação solar;
 V – Velocidade do vento;
 z – Profundidade efetiva do sistema radicular;

DR – Densidade de comprimento radicular;
 $Camada$ – Camada do solo;
 A e B – Parâmetros de ajuste do modelo exponencial;
 $z(DAP)_S$, $z(GDA)_{DV}$, $z(J)_{CD}$ e $z(DAP)_{AC}$ – Profundidade efetiva do sistema radicular estimada com os modelos Schouwenaaers, Dourado Neto e van Lier, Campbell e Diaz e AquaCrop, respectivamente;
 z_x – Profundidade efetiva máxima do sistema radicular;
 DAP_i – i -ésimo dia após o plantio;
 DAP_T – Total de dias após o plantio para completar o ciclo da cultura;
 z_0 – Profundidade inicial do sistema radicular;
 GDA_i – Graus-dia acumulado até o i -ésimo dia;
 GDA_T – Graus-dia acumulado total necessários para completar o ciclo da cultura;
 f – Fator de forma (adimensional);
 z_n – Profundidade efetiva mínima do sistema radicular;
 J_i – i -ésimo dia juliano;
 J_0 – Dia juliano de emergência da cultura;
 J_f – Dia juliano de maturação da cultura;
 DAP_0 – Tempo para atingir 90% da emergência da cultura;
 DAP_x – Tempo após o plantio, quando o z_x é atingida;
 MS – Massa seca total;
 GD – Graus-dia;
 Tb_i – Temperatura base inferior da cultura;
 T_{xi} – Temperatura máxima do i -ésimo dia;
 T_{ni} – Temperatura mínima do i -ésimo dia;
 $z(DAP)_L$ – Profundidade efetiva do sistema radicular (Modelo Logístico);
 A – Parâmetro numérico que representa a assíntota da curva ajustada (Modelo Logístico);
 DAP_{PI} – Parâmetro numérico que representa o valor DAP no ponto de inflexão da curva (Modelo Logístico);
 E – Parâmetro de escala numérica no eixo de entrada (Modelo Logístico);
 Arm – Armazenamento de água no solo até 60 cm de profundidade;
 ET – Evapotranspiração de referência diária;
 P – Precipitação pluviométrica diária;
 UR – Umidade relativa média diária do ar;
 Rn – Radiação líquida na superfície; e,
 $Tmed$ – Temperatura média diária do ar.

CAPÍTULO V

Rs – Radiação solar incidente;
 $Tmax$ – Temperatura máxima;
 $Tmin$ – Temperatura mínima;
 $Tmed$ – Temperatura média do ar;
 UR – Umidade relativa do ar;
 v – Velocidade do vento;
 TCH – Toneladas de colmo por hectare;
 Arm – Armazenamento de água no solo até 60 cm;
 ET – Evapotranspiração de referência diária;

P – Precipitação pluviométrica diária;
 UR – Umidade relativa média diária do ar;
 Rn – Saldo de radiação na superfície;
 GDA – Graus-dia acumulado;
 GD – Graus-dia;
 Tb_i – Temperatura base inferior da cultura;
 T_{xi} – Temperatura máxima do i -ésimo dia; e,
 T_{ni} – Temperatura mínima do i -ésimo dia.

CONCLUSÕES GERAIS

Tb – Temperatura base inferior da cultura;
 DAP – Dias após plantio;
 J – Dias julianos;
 GDA – Graus-dia acumulado;
 GDA_I – Graus-dia acumulado na Fase I de desenvolvimento da cana-de-açúcar; e,
 Arm_{II} – Armazenamento de água no solo na Fase II de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1 CAPÍTULO I – REFERENCIAL TEÓRICO	18
1.2 REFERÊNCIAS	25
2 CAPÍTULO II – DINÂMICA DA ÁGUA E FUNÇÕES HIDRÁULICAS EM SOLOS ARENOSOS: LIMITAÇÕES AO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO SUL DO BRASIL	30
2.1 RESUMO	30
2.2 ABSTRACT	31
2.3 INTRODUÇÃO	32
2.4 MATERIAL E MÉTODOS	33
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
2.6 CONCLUSÕES	55
2.7 REFERÊNCIAS	56
3 CAPÍTULO III – TEMPERATURA BASAL INFERIOR PARA O DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CLIMA SUBTROPICAL	61
3.1 RESUMO	61
3.2 ABSTRAT	62
3.3 INTRODUÇÃO	63
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	64
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
3.6 CONCLUSÕES	75
3.7 REFERÊNCIAS	75
4 CAPÍTULO IV – MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DE PARANAÍ-PR	78
4.1 RESUMO	78
4.2 ABSTRAT	79
4.3 INTRODUÇÃO	80
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	81
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.6 CONCLUSÕES	106
4.7 REFERÊNCIAS	107
5 CAPÍTULO V – MODELO MULTIVARIADO DE ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CLIMA SUBTROPICAL CONSIDERANDO VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E O ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO.....	112
5.1 RESUMO	112
5.2 ABSTRAT	113
5.3 INTRODUÇÃO	114
5.4 MATERIAL E MÉTODOS	115
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	119

5.6 CONCLUSÕES	127
5.7 REFERÊNCIAS	128
6 CONCLUSÕES GERAIS	131
7 REFERÊNCIAS GERAIS	132
APÊNDICE 1 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR	145
APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS AJUSTES REALIZADOS COM O MODELO LINEAR	147
APÊNDICE 3 – AJUSTES E PARÂMETROS OBTIDOS COM O MODELO LOGÍSTICO PARA VARIEDADES DA CANA-DE-AÇÚCAR, ENVOLVENDO A RELAÇÃO: MASSA FRESCA (MF) vs TEMPERATURA MÉDIA DO AR ACUMULADA (Ta)	153
APÊNDICE 4 – NORMALIDADE UNIVARIADA DA PROFUNDIDADE EFETIVA RADICULAR (z) E DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (Arm)	154
APÊNDICE 5 – ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR), EM RELAÇÃO AOS DIAS APÓS PLANTIO (DAP) E CAMADAS DE SOLO	161
APÊNDICE 6 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR)	166
APÊNDICE 7 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR) EM FUNÇÃO DAS CAMADA DE SOLO COM AS BANDAS DE CONFIANÇA	168
APÊNDICE 8 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DO RENDIMENTO POTENCIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR (TCH), DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA NO SOLO (Arm)	175

1 INTRODUÇÃO GERAL

A estimativa da produção da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na safra 2021/22 no Brasil é de 568,4 milhões de toneladas. A produção será 13,2% menor em relação à safra 2020/21, devido aos efeitos climáticos da estiagem durante o ciclo produtivo das lavouras e baixas temperaturas registradas em junho e julho, com ocorrência de geada em áreas de produção em São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Impactos na produção, como o estimado na safra 2021/22 são muito prejudiciais para o agronegócio e economia brasileira, pois a cana-de-açúcar tem grande potencialidade e participação na produção de etanol e subprodutos, destacando-se no setor de biocombustíveis (CONAB, 2021). Neste sentido, é importante a realização de estudos que contribuam para identificar as variáveis do clima e solo relevantes na produção da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é uma cultura semi perene e o seu desenvolvimento é influenciado pelas condições meteorológicas ocorridas durante todo ciclo. A produtividade agrícola pode ser alterada devido aos fatores como variedade escolhida, estágio de maturação, manejo da cultura e características do solo e clima da região (Manhães et al., 2015).

Marin e Carvalho (2012) avaliando a variabilidade espacial e temporal da eficiência produtiva da cana-de-açúcar, bem como o déficit de produtividade ao longo de 16 safras agrícolas, verificaram que alguns fatores climáticos (radiação solar, deficiência hídrica, temperatura máxima, precipitação e temperatura mínima) explicaram 43% da variabilidade da eficiência produtiva da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Bem como, o solo explicou 15% da variabilidade, considerando todas as safras analisadas.

A profundidade efetiva do sistema radicular influencia diretamente na disponibilidade de água no solo para as culturas, e no manejo da água em sistemas agrícolas (Allen et al., 1998). As variações ocorrem ao longo das fases de desenvolvimento das culturas, conforme as condições do solo e climáticas da região (Gurski, 2014). A resposta das culturas ao ambiente pode ser estimada com modelos matemáticos, que consideram variáveis agrometeorológicas (Caetano, 2017). Nas condições edafoclimáticas do centro-oeste goiano, Caetano (2017) verificou que a estimativa do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar

podem ser realizadas considerando os graus-dia acumulados, evapotranspiração de referência acumulado e o déficit hídrico acumulado.

Na literatura, modelos de produção são muito utilizados em pesquisas agronômicas com o intuito de entender as respostas das plantas a diferentes condições ambientais, como déficit hídrico, estresse térmico, entre outros, bem como prever o comportamento da cultura. O desenvolvimento radicular também é um parâmetro importante para os modelos de previsão de produção. Ohashi et al. (2015) avaliando o crescimento e a distribuição do sistema radicular de três variedades de cana-de-açúcar fertirrigada em sistema de gotejamento, com o método do minirhizotron, encontraram maiores taxas de crescimento e densidade acumulada das raízes nas primeiras camadas de solo. Houve concentração de 50% do total das raízes na camada de 0-20 cm, e mais de 80% das raízes até os 40 cm. As variações meteorológicas influenciam diretamente no desenvolvimento do sistema radicular, podendo reduzir a produtividade quando a cultura é submetida a condições ambientais desfavoráveis (Aquino et al., 2015). A água no solo também exerce interferência direta no desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, e sua disponibilidade depende das condições climáticas e capacidade de armazenamento do solo, conforme interação solo-planta-atmosfera. Características físicas (temperatura, impedimento mecânico e aeração) e químicas (pH, salinidade e altos níveis de alumínio ou manganês) do solo também afetam o crescimento das raízes (Hsiao et al., 2012).

A produção da cana-de-açúcar no Brasil cresceu no período entre 2000 a 2013. No entanto, 88% do aumento deveu-se a expansão da área de produção e apenas 12% ocorreu devido ao aumento da produtividade (Marin et al., 2016). Mais de 90% de toda cana-de-açúcar é cultivada sem irrigação no Brasil, dependendo da chuva (Marin et al., 2016) para atender a demanda hídrica da cultura durante o crescimento, desenvolvimento e produção.

Os fatores climáticos e do solo interferem no desenvolvimento da cana-de-açúcar durante o ciclo, e conseqüentemente no seu rendimento. O uso da modelagem possibilita descrever e interpretar sistemas complexos e variáveis no tempo, como a profundidade do sistema radicular, prever a resposta e rendimento de uma cultura, subsidiar o melhoramento genético e auxiliar o manejo e planejamento da lavoura, mesmo antes de implantá-la. A literatura é riquíssima em

modelos que foram desenvolvidos para essa finalidade. Cada modelo apresenta vantagens e desvantagens e sua resposta depende do local de seu desenvolvimento. Modelos multivariados são uma alternativa para identificar as variáveis que mais interferem no rendimento da cana-de-açúcar e realizar a sua estimativa (Scarpari, 2002; Andretta, 2012; Marcari et al., 2015).

Na área da Estação Experimental de Paranaíba, a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento Sucroenergético (RIDESA) realiza experimentos de melhoramento genético da cana-de-açúcar, com o intuito de aumentar ou melhorar os seguintes parâmetros: a produção por unidade de área; qualidade industrial, adaptação à colheita mecanizada; resistência às doenças e pragas; e, tolerância a estresse abiótico. De acordo com o censo varietal na safra 2017/18, as variedades RB de cana-de-açúcar representaram 66% da área total plantada no Brasil (Ridesa, 2022).

A contextualização realizada anteriormente indica que a identificação e entendimento das variáveis relevantes do solo e clima que interferem no desenvolvimento radicular e rendimento da cana-de-açúcar são fundamentais para planejar ações de manejo do solo e da cultura, distinguir os melhores períodos de plantio considerando o uso eficiente dos recursos ambientais disponíveis e os riscos à cultura. Desta forma, teve-se por objetivo no presente trabalho identificar os principais fatores do clima e solo que interferem no desenvolvimento radicular e rendimento da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas de Paranaíba-PR, mediante a avaliação e identificação de modelos para sua estimativa.

Para atingir o objetivo proposto, a presente pesquisa foi estruturada em cinco capítulos, sendo:

Capítulo I – Referencial teórico;

Capítulo II – Dinâmica da água e funções hidráulicas em solos arenosos: limitações ao cultivo da cana-de-açúcar no Sul do Brasil;

Capítulo III – Temperatura basal inferior para o desenvolvimento da cana-de-açúcar em clima subtropical;

Capítulo IV – Modelagem do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar na região de Paranaíba – PR; e,

Capítulo V – Modelo multivariado de estimativa do rendimento da cana-de-açúcar em clima subtropical, considerando variáveis climáticas e o armazenamento de água no solo.

1.1 CAPÍTULO I – REFERENCIAL TEÓRICO

1.1.1 Atributos físicos-hídricos em solos arenosos e sua importância

O solo da região da Estação Experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA) é desenvolvido no Arenito Caiuá. A dinâmica da água e funções hidráulicas em solos arenosos são fundamentais para entender as respostas da cana-de-açúcar durante o seu ciclo de desenvolvimento, devido às características inerentes do solo.

Em solos arenosos, o tamanho das partículas influencia nos atributos físico-hídricos, principalmente a granulometria da fração areia (Parahyba et al., 2019). A fração areia do solo pode ser subdividida em grossa (2 – 0,2 mm) e fina (0,2 – 0,05 mm), apresentando amplitudes de tamanho conforme a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) (Ferreira, 2010).

O tamanho da partícula do solo interfere na distribuição de poros e retenção de água. A relação entre textura e retenção de água está associada ao teor de argila e a fatores como empacotamento, forma e orientação dos grãos no solo. A redução do tamanho dos poros proporciona o aumento no potencial de retenção de água no solo (Donagemma et al., 2016). Assim, o arranjo das partículas também resulta em menor diâmetro da rede capilar, presença de um filme de água mais espesso retido entre as partículas, movimento mais lento da solução do solo e, conseqüentemente, maior quantidade de água retida no solo (Kiehl, 1979).

O solo retém a água em seu espaço poroso devido às forças matriciais, e a tensão aumenta conforme o conteúdo de água diminui em seu interior. A retenção da água ocorre devido aos fenômenos de capilaridade e adsorção na matriz do solo. As forças capilares são responsáveis pela retenção de água nos poros capilares dos agregados, e as forças de adsorção responsáveis pela retenção de água nas superfícies das partículas do solo (Libardi, 2010).

Os solos arenosos apresentam diferenças quanto à retenção de água, devido à composição granulométrica da fração areia. Altos valores de areia média e fina encontrados em solos arenosos estudados por Parahyba et al. (2019) promoveram rede de distribuição capilar com poros de menor diâmetro, permitindo a retenção de água entre as partículas do solo e movimento da solução do solo. Os teores de partículas mais finas (entre 40 e 75% da areia total) em combinação com teores de argila ($< 0,02$ mm), apesar de baixas, contribuíram para aumentar a retenção de água nos solos arenosos.

A água disponível diminui com o aumento da proporção da fração de areia grossa em solos derivados do arenito Caiuá (Fidalski, 2017). Os solos da Formação Caiuá têm granulometria mais grosseira, poros com maior diâmetro e menor disponibilidade de água do que os de Paranaíba. Assim, os riscos de deficiência hídrica são maiores em solos da Formação Caiuá do que os de Paranaíba (Fidalski et al., 2013), visto que maiores diâmetros dos poros necessitam de menor energia para a remoção da água no solo (Parahyba et al., 2019).

A retenção e a condução da água nos solos são favorecidas em sistema poroso estável e bem distribuído no perfil (Libardi, 2010). Ribeiro et al. (2007) observaram maiores valores de condutividade hidráulica saturada, devido ao menor valor de densidade de solo e maior porosidade total, em decorrência da estrutura do solo. Desta forma, a variação na condutividade hidráulica do solo saturado, densidade do solo, porosidade total e índice de vazios foi explicada pela variação na distribuição do tamanho dos poros dos solos estudados.

Silva et al. (2018) observaram em solos arenosos que a condutividade hidráulica saturada diminuiu com o aumento da profundidade, devido ao aumento da densidade e microporosidade dos solos analisados. Os autores verificaram correlação positiva entre a condutividade hidráulica saturada com as frações areia grossa e areia média, e correlação negativa com a capacidade de água disponível. A capacidade de água disponível apresentou correlação linear negativa com as frações granulométricas areia grossa e areia média, e linear positiva com o volume de microporos.

O solo é um sistema complexo e os atributos dos solos arenosos dependem da dinâmica da matéria orgânica, teor e mineralogia da fração argila, teores de areia

grossa e de areia total, em relação aos de areia fina, diâmetro médio da fração areia e capacidade de retenção de água (Donagemma et al., 2016).

Diante do exposto, os seguintes aspectos são fundamentais para caracterizar e manejar solos arenosos: ajuste e obtenção dos parâmetros da curva de retenção de água no solo com o modelo de van Genuchten (1980), utilizando a restrição de Burdine (1953); e a caracterização das funções hidráulicas (condutividade hidráulica do solo não saturada e a redistribuição de água no solo, distribuição do tamanho dos poros do solo, armazenamento e disponibilidade de água no solo). A restrição de Burdine (1953) é utilizada quando o parâmetro de forma “ n ” da curva de van Genuchten (1980) for maior que 2 ($n > 2$). É importante observar que solos arenosos geralmente apresentam essa condição (Fidalski et al., 2013; Parahyba et al., 2019), especificidade nas funções hidráulicas. O regime hídrico do solo arenoso é influenciado pelas magnitudes dos atributos do solo, e conseqüentemente interferem no desenvolvimento radicular e rendimento da cana-de-açúcar, sendo dependente da interação solo-planta-manejo-clima durante as fases de fenológicas da cana-de-açúcar.

1.1.2 Temperatura basal inferior para o desenvolvimento da cana-de-açúcar

A temperatura do ar é um dos principais fatores que interferem no desenvolvimento das plantas. Araújo (2019) verificou que o maior acúmulo de massa fresca e seca da cana-de-açúcar coincidiu com os meses de temperaturas do ar mais elevadas. Valores abaixo da temperatura basal das culturas proporcionam desenvolvimento desprezível. A temperatura basal inferior influencia no desenvolvimento e crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, sendo relatados valores divergentes entre 7 a 21 °C na literatura (Inman-Bamber, 1994; Sinclair et al., 2004; Cardozo, 2012; Morais, 2015; Amaral et al., 2019). A temperatura basal difere entre genótipos, estádios de desenvolvimento e ciclos de cana planta e soca (Slafer e Rawson, 1995; Morais, 2015), evidenciando a importância de sua determinação para variedades da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas de cada região produtora brasileira.

A temperatura basal inferior (T_b) da cana-de-açúcar estimada com o método da Regressão Linear é uma boa alternativa, possibilitando a associação entre a

massa fresca (MF , $g\ m^{-2}$) e soma térmica acumulada (STa , $^{\circ}C$), com os dados medidos na Segunda e Terceira Fases de desenvolvimento da cultura (Sinclair et al., 2004; Schwerz et al., 2019). Sinclair et al. (2004) e Schwerz et al. (2019) consideraram a Tb aquela com o menor erro quadrático médio (MSE) e quadrado médio do erro (QME), respectivamente. Sinclair et al. (2004) também considerou o maior coeficiente de determinação (R^2) nas análises. Assim, a Tb selecionada pode ser obtida por meio do melhor ajuste de associações lineares entre MF e STa , mediante a constatação com indicadores estatísticos. Contudo, a Tb da Primeira Fase de desenvolvimento muitas vezes não pode ser determinada, pois as observações da massa fresca disponíveis (apenas duas) não possibilitam realizar a análise de regressão linear. Com essa limitação, o modelo logístico é uma alternativa interessante para verificar a tendência e ajuste da massa fresca (MF ; $g\ m^{-2}$) em função da temperatura média do ar acumulada (Ta ; $^{\circ}C$), durante o ciclo da cana-de-açúcar.

Prela e Ribeiro (2002) e Renato et al. (2013) recomendam que a soma térmica diária (STd ; $^{\circ}C$) e acumulada (STa ; $^{\circ}C\ dia$) podem ser determinadas conforme Ometto (1981). Renato et al. (2013) compararam os métodos da soma térmica de Ometto, Snyder, Dufault e o método residual de Arnold, para cultura do milho e feijão utilizando temperaturas observadas em Viçosa-MG e simuladas (acréscimo aleatório entre 0 a 5 $^{\circ}C$ em cada dia do período). Os métodos apresentaram resultados similares ao serem comparados com dados observados. No entanto, o método de Ometto foi o mais indicado para as simulações, principalmente em cenários com maiores incrementos de temperatura do ar. O método de Ometto considera as temperaturas basais inferior e superior, bem como o cálculo da soma térmica apresenta cinco condicionantes. Prela e Ribeiro (2002) também encontram menor erro na previsão do período semeadura-colheita no feijão-vagem com o método de Ometto, em comparação com método de Arnold, em Londrina-PR.

A temperatura basal inferior da cultura é utilizada no cálculo para determinar os graus dia acumulado durante o ciclo da cana-de-açúcar. Os graus dia é um fator importante utilizado em modelos de estimativa do desenvolvimento radicular e rendimento da cana-de-açúcar (Dourado Neto e van Lier, 1991; Scarpari, 2002; Andretta, 2012).

1.1.3 Modelagem do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar

A modelagem do desenvolvimento radicular de uma cultura é fundamental para entender, prever mudanças e subsidiar a implantação e condução da lavoura, com o uso eficiente dos recursos ambientais disponíveis.

A densidade de comprimento radicular (DR , cm de raiz por cm^3 de solo) é um parâmetro padrão de distribuição e caracterização radicular (Chopart et al., 2008), utilizada para determinar a absorção de água pelas raízes em modelos de simulação de crescimento e produção da cana-de-açúcar (Marin e Jones, 2014; Inman-Bamber et al., 2016). A DR da cana-de-açúcar apresenta declínio exponencial com a camada de solo (Smith et al., 2005). Todavia, ainda não foi realizada a parametrização da DR da cana-de-açúcar durante o ciclo cana-planta nas condições edafoclimáticas da região de Paranaíba. O modelo exponencial da DR em função da camada do solo foi utilizado para realizar a parametrização no Capítulo IV.

A profundidade efetiva da raiz é um parâmetro em modelos hidrológicos e de produtividade (Yang et al., 2016; Raes et al., 2018). No modelo de produção água-cultura AquaCrop, a profundidade radicular é função da cultura e do tempo (dias ou graus-dia) em condição de solo bem irrigado (Raes et al., 2018). O crescimento e a distribuição das raízes são parâmetros relevantes para modelos de previsão de produção (Ohashi et al., 2015).

Os modelos de estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar testados no Capítulo IV foram: Schouwenaars (1988) e Campbell e Diaz (1988), que foram selecionados devido ao desempenho “bom” e “ótimo” obtidos, respectivamente, no estudo realizado por Gurski et al. (2016) em ajustes para cana-de-açúcar; Dourado Neto e Van Lier (1991); e, modelo utilizado internamente no programa AquaCrop.

A curva de crescimento radicular é peculiar para as condições experimentais, bem como as interações entre solo, planta, manejo e clima (Borg e Grimes, 1986). Assim, os modelos AquaCrop e logístico foram parametrizados e validados no Capítulo IV com os dados observados de profundidade efetiva do sistema radicular (z) da cana-de-açúcar em função dos dias após plantio (DAP). Os modelos AquaCrop e logístico foram selecionados para representar o crescimento radicular durante o ciclo de cultivo da cana planta. O processo de parametrização consistiu

em utilizar uma porcentagem da amostra dos dados observados, geralmente de 60 a 70%, para obtenção dos parâmetros do modelo. O restante da amostra, de 40 a 30%, foram utilizados na validação para verificar a capacidade de estimativa dos parâmetros obtidos mediante os erros e índices estatísticos.

A análise de regressão linear múltipla com seleção *Stepwise* também foi realizada no Capítulo IV entre a profundidade efetiva radicular (z) e as variáveis do clima e o armazenamento de água no solo. O intuito consistiu em identificar as variáveis que apresentam efeito significativo na z e constituir modelo para sua estimativa.

Na seleção *Stepwise*, passo a passo, as variáveis são adicionadas alternadamente e retiradas no modelo de regressão utilizando um critério estatístico. A função *step* do pacote *stats* do R seleciona o modelo utilizando o critério de informação de Akaike (*Akaike information criterion* – AIC) (R Core Team, 2021).

Diante do contexto apresentado anteriormente, tem-se que a parametrização e ajuste de modelos de estimativa da “densidade de comprimento” e “profundidade efetiva radicular” da cana-de-açúcar justifica-se e é importante nas condições edafoclimáticas da região Noroeste do Paraná, para melhorar o manejo da cultura.

1.1.4 Modelagem multivariada do rendimento da cana-de-açúcar

No modelo agroclimático de previsão do rendimento da cana-de-açúcar (TCH , toneladas de colmo por hectare), Scarpari (2002) utilizou a precipitação, graus dia e graus dia negativo dos cinco meses anteriores à colheita na análise de regressão linear múltipla e constituiu dois modelos estatísticos que não apresentaram capacidade de prever o rendimento da cana-de-açúcar. No entanto, foram constituídos dois modelos para prever a maturação (ATR – Açúcar Total Recuperável; kg de açúcar por tonelada de cana) com as variáveis supraditas.

Modelos agrometeorológicos com dados mensais de temperatura do ar, precipitação, deficiência e excedente hídrico, evapotranspiração potencial e real, armazenamento de água no solo e irradiação solar global do ano anterior também foram utilizados por Marcari et al. (2015), para estimativa do rendimento (TCH , toneladas de colmo por hectare) e qualidade (ATR , açúcar total recuperável) para o próximo ano. Os autores selecionaram os dez melhores modelos de regressão linear

múltipla utilizando critérios de significância dos coeficientes ($t < 0,05$), regressões ($F < 0,05$), erro absoluto médio percentual (MAPE) mínimo e coeficiente de determinação (R^2) ajustado máximo. Os autores utilizaram o método realizando todas às combinações possíveis entre as variáveis mensais, e constituíram modelos contendo quatro variáveis explicativas com bom desempenho.

Andretta (2012) realizou análise de regressão linear múltipla para estimar a produtividade média anual com as seguintes variáveis explicativas no Estado do Paraná: média das temperaturas máxima, mínima e médias compensadas; média da evapotranspiração relativa; e, somas de graus dia, precipitação, deficiência e excesso de água no solo no verão, outono, inverno e primavera. O modelo de regressão linear estabelecido com as variáveis média da temperatura mínima na primavera, soma da precipitação no inverno, soma do excesso de água no solo no outono e verão e a soma da deficiência de água no solo no verão explicou 98% da variação (R^2 ajustado = 0,982).

Analisando os modelos apresentados por Scarpari (2002), Andretta (2012) e Marcari et al. (2015) verifica-se as dificuldades e aspectos sobre a melhor forma para analisar as variáveis climáticas e o armazenamento de água no solo no ciclo de cultivo. No ciclo da cana soca ocorrem três fases de desenvolvimento, que foram utilizados nos ajustes de modelos por Gurski et al. (2020): Fase I - Brotação e intenso perfilhamento; Fase II - Crescimento em estatura; e, Fase III - Diminuição do crescimento e acúmulo de sacarose. Os fatores climáticos e do solo também interferem no desenvolvimento da cana-de-açúcar durante o ciclo, e por essa razão o rendimento da cana-de-açúcar foi relacionado no Capítulo V com as variáveis explicativas nas Fases fenológicas I, II e III, com intuito de identificar quais apresentariam efeito significativo no seu rendimento, para constituir modelos preditivos.

O modelo de regressão linear múltipla com seleção *Stepwise* e o método de reamostragem de validação cruzada *k-fold* repetida também foram utilizados para ajuste do modelo no Capítulo V. O método *Stepwise* é usado para selecionar o melhor subconjunto de variáveis que resulta no modelo com menor erro de predição da validação cruzada (James et al., 2014). No método de validação cruzada *k-fold* os dados são divididos aleatoriamente em k grupos de tamanho igual, utiliza " $k - 1$ " grupos para ajustar o modelo e o primeiro grupo para validação. O processo é

repetido k vezes, sendo utilizado um grupo diferente na validação. O erro de validação é calculado com a média dos erros de testes (James et al., 2014).

A identificação das variáveis climáticas, armazenamento de água no solo e a constituição de modelo de estimativa são excelentes alternativas que subsidiam o manejo e o melhoramento genético de culturas, principalmente a cana-de-açúcar para a região de Paranaíba.

1.2. REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

AMARAL, M. A. C. M.; COELHO, R. D.; VIEIRA JOSÉ, J.; OLIVERIRA, A. S. Temperatura base e taxa de crescimento de oito variedades de cana-de-açúcar. **Revista GEAMA**, v.5, n.1, p.21-29, 2019.

ANDRETTA, R. L. **Influência de variáveis climáticas, da água disponível no solo, e dos eventos El Niño e La Niña na produtividade da cana-de-açúcar no Estado do Paraná**. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, Curitiba, 2012.

AQUINO, G. S.; MEDINA, C. C.; PORTEIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O.; SANTOS JUNIOR, J. H.; ALMEIDA, L. F.; SANTIAGO, A. D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.12, p.1150-1159, 2015.

ARAÚJO, R. M. **Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar na região sul do Brasil**. 101 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – (Produção Vegetal), Curitiba, 2019.

BORG, H.; GRIMES, D. W. **Depths development of roots with time: an empirical description**. Transaction of ASAE, St. Joseph, v.29, p.194-197, 1986.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **American Institute Mining and Metallurgy Engineering**, v.198, 1953.

CAETANO, J. M. **Modelagem agrometeorológica da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas do Centro-Oeste Goiano**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos (EAEA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia, 2017.

CAMPBELL, G. S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F. R.; JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru: ICRISAT, p.15-26, 1988.

CARDOZO, N. P. **Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas**. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

CHOPART, J.-L.; RODRIGUES, S. R.; AZEVEDO, M. C.; MEDINA, C. C. Estimating sugarcane root length density through root mapping and orientation modelling. **Plant Soil**, v.313, p.101-112, 2008.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v.8, Safra 2021/22, n.3 – Terceiro levantamento, Brasília, p.1-63, 2021.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAUJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1003-1020, 2016.

DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. J. **Programa para elaboração do balanço hídrico para culturas anuais e perenes**. Piracicaba: ESALQ/USP. Departamento de Agricultura, 1991. 58p.

FERREIRA, M. Caracterização física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed.). **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., 2010, p. 1-27.

FIDALSKI, J. Disponibilidade de água e comportamento físico dos solos da Formação Arenito Caiuá. In: **V Reunião Paranaense de Ciência do Solo e II Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos**. 2017, Maringá. Livro eletrônico. Curitiba: SBCS/NEPAR; Londrina: IAPAR.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; AULER, P. A. M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos das Formações Caiuá e Paranaíba. **Revista Brasileira Ciência de Solo**, v.37, p.613-621, 2013.

GURSKI, B. C. **Funções destinadas ao estudo e estimativa das relações hídricas para o aprimoramento do balanço hídrico agrícola**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, A. W. P.; JERSZURKI, D.; ARMINDO, R. A. Modelos para estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho. **Irriga**, Edição Especial, p.155-167, 2016.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERG, E.; OLIVEIRA, R. A. Water requirements and restrictions to sugarcane in cane plants and ratoon cane cycles in Southern Brazil. **Acta Agronômica**, v.69, n.2, p.135-143, 2020.

HSIAO, T. C.; FERERES, E.; STEDUTO, P.; RAES, D. 3.3 AquaCrop parameterization, calibration, and validation guide. In: **Crop yield response to water**. Irrigation and Drainage Paper Nr. 66, FAO, Rome, Italy. 2012, 500p.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v.36, n.1, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N. G.; JACKSON, P. A.; STOKES, C. J.; VERRALL, S.; LAKSHMANAN, P.; BASNAYAKE, J. Sugarcane for water-limited environments: Enhanced capability of the APSIM sugarcane model for assessing traits for transpiration efficiency and root water supply. **Field Crops Research**, v.196, p.112-123, 2016.

JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. **An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R**. Second Edition, Springer, 2014.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações Solo Planta**. 1 ed., São Paulo, Agronomia Ceres, 262p., 1979.

LIBARDI, P. L. Água no solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed.). **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., 2010, p. 103-152.

MANHÃES, C. M. C; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, p.163-181, 2015.

MARCARI, M. A.; ROLIM, G. S.; APARECIDO, L. E. O. Agrometeorological models for forecasting yield and quality of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v.9, n.11, p.1049-1056, 2015.

MARIN, F. R.; CARVALHO, G. L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.2, 2012.

MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, v.71, n.1, p.1-16, 2014.

MARIN, F. R.; MARTHA JUNIOR, G. B.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P. Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil. **BioScience**, v.66, n.4, p.307-316, 2016.

MORAIS, K. P. **Determinação da temperatura base, desempenho agrônômico e correlação de componentes de rendimento em genótipos de cana-de-açúcar**. 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2015.

OHASHI, A. Y. P.; PIRES, R. C. M.; RIBEIRO, R. V.; SILVA, A. L. B. O. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, v.74, n.2, p.131-138, 2015.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

PARAHYBA, R. B. V.; ARAÚJO, M. S. B.; ALMEIDA, B. G.; ROLIM NETO, F. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CALDAS, A. M. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.91, n.4, 2019.

PRELA, A.; RIBEIRO, A. M. A. Determinação de graus-dia acumulados e sua aplicação no planejamento do cultivo de feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) para Londrina-PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.83-86, 2002.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2021.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Chapter 3 Calculation procedures, Reference Manual: AquaCrop Version 6.0-6.1**. Roma, FAO, 2018, 151p.

RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.4, 382-388, 2013.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. de F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência agrotécnica**, v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.

RIDESA – REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. **Censo Varietal de Cana-de-açúcar - Safra 2017/18**. Disponível em: <<https://www.ridesa.com.br/censo-varietal>>. Acesso em: 12/01/2022.

SCARPARI, M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SCHOUWENAARS, J. M. Rainfall irrigation and sowing strategies in southern Mozambique. **Agriculture Water Management**, v.13, p.49-64, 1988.

SCHWERZ, F.; ELOY, E.; ELLI, E. F.; CARON, B. O.; PAULA, G. M. Temperatura e radiação solar na produção de mudas de cedro australiano. **Scientia Forestalis**, v.7, n.124, p.733-743, 2019.

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; BORBA, J. O. M.; TAVARES, D. D.; AMARAL, A. J.; MARTINS, A. F. Solos arenosos para Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n.5, p.581-589, 2018.

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE JR., J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, p.171-178, 2004.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Base and optimum temperatures vary with genotype and stage of development in wheat. **Plant, Cell and Environment**, v.18, p.671-679, 1995.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, p.169-183, 2005.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

YANG, Y.; DONOHUE, R. J.; McVICAR, T. R. Global estimation of effective plant rooting depth: Implications for hydrological modeling. **Water Resources Research**, v.52, p.8260-8276, 2016.

2 CAPÍTULO II – DINÂMICA DA ÁGUA E FUNÇÕES HIDRÁULICAS EM SOLOS ARENOSOS: LIMITAÇÕES AO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO SUL DO BRASIL

2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo determinar os atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar na região Noroeste do Paraná e avaliar sua qualidade física para o desenvolvimento da cultura. Foram coletadas amostras de solo nas camadas 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m e determinados: teores de argila, silte, areia, areia fina e grossa; densidade de partículas do solo (ρ_p); densidade do solo (ρ_s); porosidade total (TP); microporosidade (*Micro*) e macroporosidade (*Macro*); condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e não saturado ($K(\theta)$); curva de distribuição de poros; parâmetros da curva de retenção de água no solo; capacidade de água disponível no solo (AWC); água facilmente disponível (EAW); e estimativa da umidade ($\hat{\theta}_{cc}$), potencial matricial (ψ_{cc}) e tempo (t_{cc}) na capacidade de campo. A validação das associações entre os atributos físico-hídricos do solo foi realizada com análise de componentes principais (PCA). Para os solos arenosos analisados a distribuição das frações areia grossa e fina precisou ser mensurada para melhor avaliação dos atributos físico-hídrico do solo. Os maiores teores de areia grossa interferiram no aumento da K_s , $K(\theta)$, d_{max} e *Macro*, bem como na redução da *Micro*. Os teores de areia fina reduziram a condutividade e aumentaram a retenção de água no solo, nas camadas subsuperficiais.

Palavras-chave: Textura, condutividade hidráulica, curva de retenção, capacidade de água disponível, curva de distribuição de poros.

2.2 ABSTRACT

This study aimed to determine the physical-hydric attributes of an Latossolo Vermelho distrófico (Oxisol) with sugarcane cultivation in the northwestern region of Paraná and to evaluate its physical quality for crop development. Soil samples were collected in the layers 0-0.20 m, 0.20-0.40 m and 0.40-0.60 m and determined: clay, silt, sand, fine and coarse sand contents; soil particle density (ρ_p); soil bulk density (ρ_s); total porosity (TP); microporosity (*Micro*) and macroporosity (*Macro*); saturated (K_s) and unsaturated ($K(\theta)$) soil hydraulic conductivity; pore distribution curve; soil water retention curve parameters; available soil water capacity (AWC); readily available water (EAW); and the estimation of moisture ($\hat{\theta}_{CC}$), matric potential (ψ_{CC}) and time (t_{CC}) at field capacity. Validation of the associations among the soil physical-hydric attributes was performed using principal component analysis (PCA). For the sandy soils analyzed the distribution of coarse and fine sand fractions needed to be measured for a better evaluation of the soil physical and hydric attributes. The higher coarse sand contents interfered in increasing K_s , $K(\theta)$, d_{max} e *Macro*, as well as reducing *Micro*. The fine sand contents reduced conductivity and increased soil water retention in the subsurface layers.

Keywords: Texture, hydraulic conductivity, retention curve, available water capacity, pore distribution curve.

2.3 INTRODUÇÃO

Os atributos físico-hídricos são utilizados para entender e avaliar os solos quanto à sua variabilidade e qualidade, influenciando na aeração, condutividade hidráulica, redistribuição da água, capacidade de armazenamento, disponibilidade de água às plantas e seu crescimento radicular (Ferreira, 2010; Barbosa, 2015; Silva et al., 2018).

Densidade do solo, textura, porosidade total e condutividade hidráulica saturada do solo são atributos físico-hídricos utilizados como indicadores primários para monitorar a qualidade do solo (Stefanoski et al., 2013). Solos arenosos geralmente estão associados à alta condutividade hidráulica, e a granulometria da fração areia grossa associa-se com a menor disponibilidade de água (Fidalski et al., 2013; Souza et al., 2018).

Além de fatores intrínsecos, o uso e manejo do solo também interferem na retenção de água no solo (Machado et al., 2008) e conseqüentemente na disponibilidade de água para as plantas. Fidalski et al. (2013), estudando solos desenvolvidos em arenitos na camada de 0,0-0,40 m, encontraram 48,60 e 58,70 mm de capacidade de água disponível (*CAD*) no solo sob integração lavoura-pecuária e abacaxi, respectivamente. A diferença de 10,10 mm ocorreu basicamente devido ao uso e manejo do solo. Desta forma, devido ao intenso manejo da cultura da cana-de-açúcar, o conhecimento dos atributos físico-hídricos do solo é importante principalmente para os cultivos estabelecidos em solos arenosos. O efeito do cultivo da cana-de-açúcar pode aumentar a densidade do solo, atingindo valores críticos de 1760 e 1770 kg m⁻³ nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, em Latossolo de textura média (Cavaliari et al., 2011).

Nos solos arenosos existem diferenças na retenção de água no solo, devido à composição granulométrica da fração areia (Parahyba et al., 2019). Altos valores de areia média e fina em solos arenosos favorecem a formação de uma rede de distribuição capilar com poros de menor diâmetro, permitindo a retenção de água entre as partículas do solo. Essa matriz proporciona menor perda por percolação e, conseqüentemente, maior armazenamento de água devido às altas porcentagens de partículas mais finas (entre 40 e 75% da areia total), combinadas com baixos teores

de argila ($< 0,02$ mm). Apesar de baixos, os teores de argila também contribuem para aumentar a retenção de água nos solos arenosos (Parahyba et al., 2019).

A Estação Experimental PMGCA/UFPR e RIDESA realiza anualmente inúmeros estudos visando o melhoramento genético e produtividade da cana-de-açúcar (Daros et al., 2018; Berton et al., 2020). Os resultados obtidos nos experimentos desenvolvidos na Estação são referência para inúmeras atividades de planejamento agrícola na região Noroeste do Estado do Paraná (Brasil). Todavia, ainda não foi feito um estudo detalhado dos atributos físico-hídricos dos solos da estação experimental, que representam grande parte dos Latossolos da região. A obtenção de informações sobre a dinâmica da água no solo, principalmente por tratar-se de região dominada por solos desenvolvidos no Arenito Caiuá, podem auxiliar na tomada de decisões quanto à seleção de variedades mais adaptadas às condições de estresse hídrico. O levantamento dos atributos físico-hídricos também pode subsidiar o manejo da água em áreas irrigadas em solos arenosos do Noroeste do Paraná. Neste contexto, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os principais atributos físico-hídricos do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar na região Noroeste do Paraná (Sul Brasil), e avaliar sua qualidade física para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar.

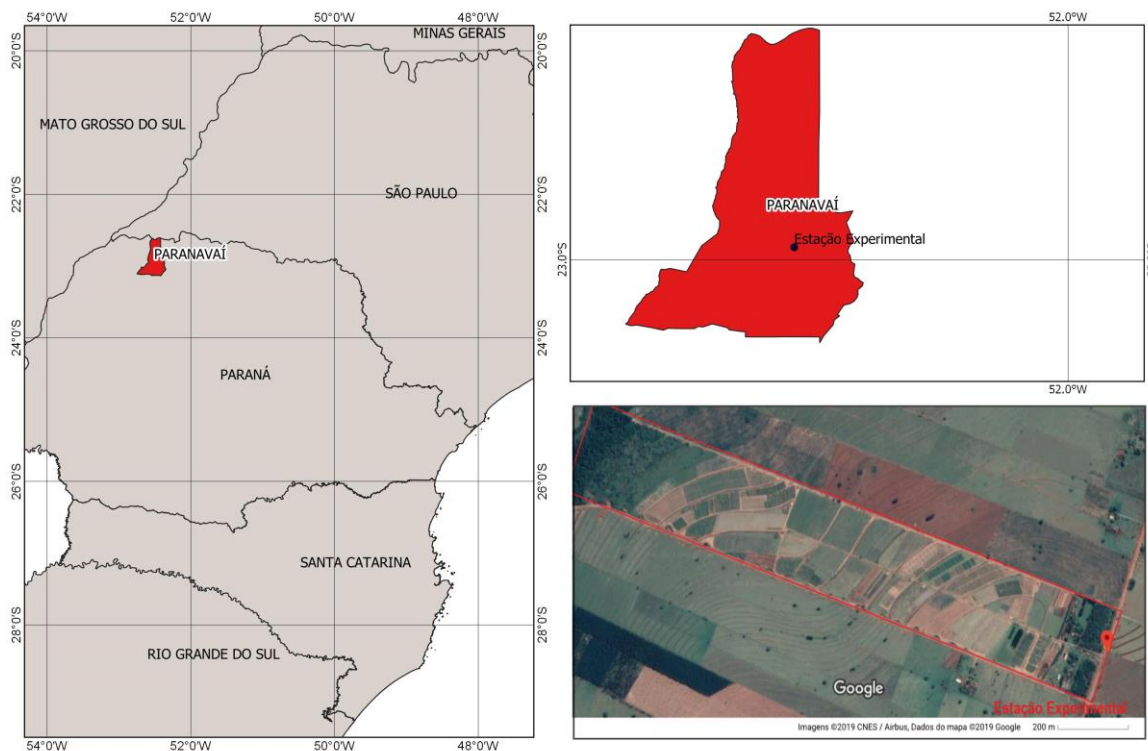
2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Caracterização do local de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/SCA/UFPR. As análises foram realizadas com amostras de solo retiradas da Estação Experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA), pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR) e integrante da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento Sucroenergético (RIDESA). O solo da Estação Experimental de Paranavaí é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2018). A PMGCA está localizada à $22^{\circ} 58'$ Sul de latitude, $52^{\circ} 28'$ Oeste de longitude e 470 m de altitude média, no Município de Paranavaí, região Noroeste do Estado do Paraná (FIGURA 2.1). O clima da região, conforme classificação de Köppen é *Cfa* (clima subtropical),

apresenta média anual da temperatura do ar entre 22,1 e 23,0 °C, e precipitação média anual entre 1400 e 1600 mm (Nitsche et al., 2019).

FIGURA 2.1 – LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROGRAMA DE MELHORAMENTO GENÉTICO DE CANA-DE-AÇÚCAR (PMGCA), PERTENCENTE À UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR) E INTEGRANTE DA REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUCROENERGÉTICO (RIDESA).



FONTE: a Autora (2022), adaptado do IBGE (2018) e Google Maps (2019).

2.4.2 Coleta de amostras e determinação de atributos físicos do solo

Para determinação dos atributos físico-hídricos do solo, em julho de 2019 foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo em dez pontos representativos na área experimental, nas camadas entre 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. As análises foram realizadas nos Laboratórios de Física do Solo, do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola/UFPR, e no Instituto de Desenvolvimento Rural (IDR), em Londrina-PR.

As amostras deformadas foram coletadas com trado calador, secas em estufa (40 °C), peneiradas em malha de 2 mm e armazenadas em sacos plásticos. Na sequência, foi feita a determinação da granulometria (argila, silte e areia; g kg⁻¹), com o método da pipeta. Também foi feita a separação da fração areia total em areia grossa (2 – 0,2 mm; g kg⁻¹) e fina (0,2 – 0,05 mm; g kg⁻¹), conforme

metodologia descrita por EMBRAPA (2011). A densidade de partículas do solo (ρ_p ; kg m^{-3}) foi determinada com o método do balão volumétrico modificado, conforme Gubiani et al. (2006).

$$\rho_p = \frac{M_{bs} - M_b}{50 - \left(\frac{M_{bsa} - M_{bs}}{\rho_a} \right)}$$

Sendo: ρ_p – densidade de partículas do solo (kg m^{-3}); M_{bs} – massa do balão volumétrico contendo o solo (kg); M_b – massa do balão volumétrico (kg); M_{bsa} – massa do balão volumétrico contendo solo mais álcool (kg); ρ_a – densidade do álcool (kg m^{-3}), determinada pela relação entre M_a e V_b ; M_a – massa de álcool (kg); V_b – volume do balão (m^3).

2.4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado

As amostras indeformadas do solo foram coletadas em duplicata em cada ponto amostral, com o auxílio de anéis volumétricos (4,69 cm de diâmetro interno e 3,51 cm de altura) e um amostrador de Uhland. Após o devido preparo, as amostras foram saturadas por ascensão capilar. Após a saturação, a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s ; cm h^{-1}) foi determinada com o método do Permeâmetro de Carga Constante (Youngs, 1991):

$$K_s = \frac{V \cdot L}{(L + h) \cdot A \cdot t}$$

Sendo: K_s – condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1}); V – volume de água percolado (cm^3); L – altura do anel cilíndrico com solo (cm); h – lâmina de água sobre a amostra (cm); A – seção transversal da amostra (cm^2); e, t – tempo de percolação (h).

A porosidade total (TP ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi considerada igual à umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). A microporosidade ($Micro$; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) correspondeu à umidade volumétrica da amostra de solo submetida à tensão de -6 kPa. A macroporosidade ($Macro$; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi obtida fazendo-se a diferença entre a TP e $Micro$ (EMBRAPA, 2011).

2.4.4 Retenção de água no solo

As amostras de solo foram submetidas as tensões de -6 e -10 kPa, em mesa de tensão, e -33 , -100 , -500 e -1500 kPa, em câmara de Richards. Após cada potencial matricial aplicado, as amostras foram secas em estufa (105 °C; 48 h) para determinação da densidade do solo (ρ_s) e pontos de umidade volumétrica (θ), conforme as metodologias descritas por EMBRAPA (2011).

Os pontos “ θ vs ψ_m ” e a umidade na saturação foram utilizados para determinar a curva de retenção da água no solo (CRAS), ajustada com o modelo de van Genuchten (1980), utilizando a restrição de Burdine (1953). O ajuste dos parâmetros do modelo de van Genuchten e estimativa da umidade volumétrica no solo ($\hat{\theta}$) foram realizados com a função *nls* do Software R (Versão 4.0.0; R Core Team, 2020).

$$\theta = \frac{\theta(\psi_m) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha \cdot |\psi_m|)^n]^m}$$

Sendo: θ – saturação efetiva (adimensional); $\theta(\psi_m)$ – umidade volumétrica no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_r – umidade volumétrica residual do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s – umidade volumétrica do solo na saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ψ_m – potencial matricial da água no solo (kPa); α – valor de entrada de ar (kPa^{-1}); n – parâmetro empírico do ajuste (adimensional); e, m – restrição de Burdine: $m = 1 - \left(\frac{2}{n}\right)$.

A umidade volumétrica no solo (θ_{hco} ; $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) no ponto de sucção de água de poro no corte hidráulico (ψ_{hco} ; kPa) foi calculada conforme Czyz e Dexter (2013), considerando $\psi_{hco} = -1030$ kPa.

2.4.5 Condutividade hidráulica do solo não-saturado e redistribuição de água no solo

A condutividade hidráulica do solo não saturada ($K(\theta)$; cm h^{-1}) foi calculada com a equação de van Genuchten-Burdine:

$$K(\theta) = K_s \cdot \theta^2 \cdot \left[1 - \left(1 - \theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right] \quad (1)$$

Calculou-se a umidade volumétrica do solo (θ) nos potenciais -1 a -6 kPa (para ψ menores que -6 kPa a água encontra-se retida) para estimativa da $K(\theta)$. Posteriormente, foi elaborado o gráfico $K(\psi)$ para as camadas de solo 0,00-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m.

Para a estimativa da real umidade volumétrica ($\hat{\theta}_{CC}$) e potencial matricial (ψ_{CC}) na capacidade de campo considerou-se que essa condição é atingida quando a taxa de drenagem (τ) é uma porcentagem (p) da condutividade hidráulica saturada (K_S ; Prevedello, 1999), conforme restrição de Burdine (1953):

$$\tau = K(\theta)$$

$$\tau = K_S \cdot \theta^2 \cdot \left[1 - \left(1 - \theta \frac{1}{m} \right)^m \right]$$

$$p = \frac{\tau}{K_S} \cdot \theta^2 \cdot \left[1 - \left(1 - \theta \frac{1}{m} \right)^m \right]$$

$$\theta = \frac{\hat{\theta}_{CC} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha \cdot \psi_{CC})^n]^m}$$

$$\psi_{CC} = \frac{\left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\hat{\theta}_{CC} - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (2)$$

Baseando-se em Sisson et al. (1980) (Equação 3) e Prevedello e Armindo (2015) (Equação 4), obteve-se o modelo analítico da redistribuição de água no solo. Para isso, a Equação 1 foi derivada em relação a θ e igualada a z/t :

$$\frac{z}{t} = \frac{dK}{d\theta} \quad (3)$$

$$\frac{dK}{d\theta} = \frac{dK}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{d\theta} \quad (4)$$

Em seguida, foi obtido o tempo correspondente à capacidade de campo em cada camada de solo:

$$\frac{z}{t_{CC}} = \left[\left(K_S \cdot (2 \cdot \theta) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\theta \frac{1}{m} \right)^m \right) \right) + K_S \cdot (\theta)^2 \cdot \left(\left(1 - \left(\theta \frac{1}{m} \right)^m \right)^{m-1} \cdot \left(m \cdot \left(\left(\theta \frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{m}-1} \cdot \frac{1}{m} \right) \right) \right) \right) \cdot \left(\frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \right) \right]$$

Sendo: p – porcentagem da K_S (considerou-se os valores: 0,0050; 0,0100; 0,0150; 0,0200; 0,0250; 0,0300; 0,0400 e 0,0500); θ – saturação efetiva (adimensional); m –

parâmetro proveniente da restrição de Burdine (1953) (adimensional); t_{CC} – tempo correspondente à capacidade de campo (h); z – camada do solo (m); K_S – condutividade hidráulica saturada ($m\ h^{-1}$). A estimativa da função θ foi realizada em uma rotina desenvolvida no programa R (R Core Team, 2020).

A umidade no ponto de inflexão ($\hat{\theta}_{IP}$; $m^3\ m^{-3}$) da curva de retenção de água no solo foi determinada conforme Dexter e Bird (2001), e o respectivo potencial matricial (ψ_{IP} ; kPa) foi estimado com a Equação 2.

$$\hat{\theta}_{IP} = (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-m} + \theta_r$$

2.4.6 Função capacidade de água no solo

A distribuição do tamanho dos poros do solo, representada pela função capacidade de água, foi realizada com o modelo da curva de retenção e teoria da capilaridade (Libardi, 2012; Silva; Libardi; Gimenes, 2018). O modelo de van Genuchten (1980) foi modificado substituindo o ψ_m pelo raio do poro (r), utilizando a equação da capilaridade (Silva; Libardi; Gimenes, 2018).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + \left(\frac{A}{r}\right)^n\right]^m}$$

$$A = 2 \cdot \sigma \cdot \alpha \cdot 10^3$$

Com a derivada do modelo modificado, tem-se:

$$\frac{d\theta}{d\log r} = (\theta_s - \theta_r) \cdot m \cdot n \cdot A^n \cdot r^{-n} \cdot (1 + A^n \cdot r^{-n})^{-m-1}$$

Derivando e igualando a zero, tem-se:

$$r_{max} = A \cdot \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$d_{max} = 2 \cdot r_{max}$$

Sendo: σ – tensão superficial da água ($N\ m^{-1}$); r – raio do poro (μm); r_{max} – raio máximo do poro (μm); d_{max} – diâmetro máximo do poro (μm).

2.4.7 Armazenamento e disponibilidade teórica e real de água no solo

A capacidade de água disponível no solo foi determinada nos potenciais matriciais -6 kPa (AWC_1) e ψ_{CC} (AWC_2), em relação ao potencial matricial de -1500 kPa.

$$AWC_1 = \sum_{i=1}^n (\theta_{CCi} - \theta_{PMPI}) \cdot z_i$$

$$AWC_2 = \sum_{i=1}^n (\hat{\theta}_{CCi} - \theta_{PMPI}) \cdot z_i$$

Sendo: AWC – capacidade de água disponível no solo (mm); θ_{CCi} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo na i -ésima camada ($m^3 m^{-3}$), no potencial matricial de -6 kPa; θ_{PMPI} – umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente na i -ésima camada ($m^3 m^{-3}$), no potencial matricial de -1500 kPa; $\hat{\theta}_{CC}$ – umidade volumétrica do solo estimada na capacidade de campo na i -ésima camada ($m^3 m^{-3}$), no potencial matricial ψ_{CC} ; z_i – i -ésima camada do solo (mm); n – número de camadas consideradas (adimensional).

Considerando os resultados obtidos da redistribuição de água no solo e ponto de corte hidráulico, determinou-se a Água Facilmente Disponível nos potenciais matriciais -6 kPa (EAW_1) e ψ_{CC} (EAW_2), em relação a umidade volumétrica a -1030 kPa (ψ_{hco}):

$$EAW_1 = \sum_{i=1}^n (\theta_{CCi} - \theta_{hco}) \cdot z_i$$

$$EAW_2 = \sum_{i=1}^n (\hat{\theta}_{CCi} - \theta_{hco}) \cdot z_i$$

Sendo: EAW – Água Facilmente Disponível no solo (mm); θ_{hco} – umidade volumétrica do solo no potencial matricial de -1030 kPa, na i -ésima camada ($m^3 m^{-3}$); z_i – i -ésima camada do solo (mm); n – número de camadas consideradas (adimensional).

2.4.8 Análises estatísticas

Utilizou-se estatística descritiva para analisar previamente os resultados com auxílio do gráfico *Boxplot*, sendo que os valores discriminantes (*outliers*) foram retirados das análises posteriores (com 6 repetições).

Os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias foram verificados com os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Atendidas as pressuposições, os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas com o teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Os dados de t_{CC} foram submetidos ao teste de Kruskal Wallis.

Os erros e índice estatísticos entre os valores observados (Y) e estimados (\hat{Y}) foram quantificados com as expressões (Willmott, 1982; Mangiafico, 2016):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\bar{Y}}}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}}}{Dp_Y}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \right]$$

Sendo: $RMSE$ – raiz quadrada do erro quadrado médio ($m^3 m^{-3}$); $NRMSE$ – raiz quadrada do erro médio quadrático normalizada pela média (%); RSR – razão entre $RMSE$ e o desvio padrão (adimensional); d – índice de concordância de Willmott (adimensional); \hat{Y}_i – i -ésimo valor da variável estimada ($m^3 m^{-3}$); Y_i – i -ésimo valor da variável observada ($m^3 m^{-3}$); n – número de dados da variável observada (unidades); \bar{Y} – média dos valores da variável observada ($m^3 m^{-3}$); Dp_Y – desvio padrão dos dados observados ($m^3 m^{-3}$).

Na interpretação dos erros $RMSE$, $NRMSE$ e RSR valores iguais ou próximos a zero indicam ajuste perfeito aos dados. Para o RSR o desempenho foi verificado

conforme a classificação: muito bom ($0,00 \leq RSR < 0,50$); bom ($0,50 \leq RSR < 0,60$); satisfatório ($0,60 \leq RSR < 0,70$); e insatisfatório ($RSR \geq 0,70$). O índice d igual a 1 indica concordância perfeita (Moriasi et al., 2007; Mangiafico, 2016).

A validação das associações entre os atributos físico-hídricos do solo foi realizada com análise de componentes principais (PCA). A matriz de correlação das variáveis padronizadas (variâncias unitárias e médias zero) de cada camada de solo foram utilizadas na PCA. Para realizar a PCA utilizou-se a função *prcomp*, e para elaboração do gráfico utilizou-se o pacote *ggfortify* (Horikoshi; Tang, 2016) do Software R (R Core Team, 2020).

2.5 RESULTADO E DISCUSSÃO

2.5.1 Textura e estrutura do solo arenoso

Houve acúmulo de argila nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m em relação à camada superficial do solo (0,00-0,20 m) (TABELA 2.1). O processo pedogenético de perda de argila na camada superficial e o acúmulo gradual nas camadas subsuperficiais (EMBRAPA, 2018), apesar de baixas e não condicionar mudança textural abrupta no solo, contribuiu com o aumento da retenção de água nos solos arenosos. Como consequência, os teores de areia e silte foram menores nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Assim, o solo analisado encontra-se nas classes texturais arenoso na camada 0-0,20 m, e franco arenoso nas camadas 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m (Soil Science Division Staff, 2017), característica na Formação de arenito Paranavaí, na região noroeste do Paraná (Fidalski et al., 2013).

Houve relação inversa entre as frações areia grossa e fina no perfil de solo, sendo a proporção areia fina maior na camada mais profunda em comparação à camada superficial (TABELA 2.1). O maior teor de areia grossa da fração areia é característica em solos da região de Paranavaí, confirmando com a caracterização granulométrica de Fidalski et al. (2013), em áreas de integração lavoura-pecuária e abacaxi nas Formações de arenito Caiuá e Paranavaí. Fidalski (2017) considerou que a caracterização granulométrica é um dos critérios a ser utilizado para o uso e manejo dos solos do arenito Caiuá na região Noroeste do Paraná, devido a relação inversa dos teores de areia (total ou grossa) com a água disponível no solo.

TABELA 2.1 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DAS CAMADAS DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO PMGCA, CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR.

Camada m	Areia			Silte	Argila	-Densidade do solo-		----- Porosidade do solo -----		
	Total	Grossa	Fina			Partícula	Solo	Total	Macro	Micro
	----- g kg ⁻¹ -----					--- kg m ⁻³ ---		----- m ³ m ⁻³ -----		
0,00-0,20	837,600a	769,700a	120,680b	67,600a	94,800b	2710a	1582a	0,331a	0,158a	0,173b
0,20-0,40	792,700b	685,125b	134,545b	64,300b	143,000a	2722a	1690a	0,316a	0,091b	0,225a
0,40-0,60	784,900b	627,250b	167,175a	65,400b	149,700a	2703a	1653a	0,329a	0,088b	0,241a
Média	805,067	694,025	140,080	65,767	129,166	2712	1642	0,325	0,112	0,213
Var ⁽¹⁾	571,075	3622,876	402,205	1,993	633,193	2216,8	10584	0,000	0,002	0,001
sd ⁽²⁾	23,897	60,190	20,055	1,412	25,163	47,08	102,88	0,021	0,041	0,033
CV ⁽³⁾	2,968%	8,673%	14,244%	2,147%	19,481%	1,736%	6,266%	6,313%	36,420%	15,329%

⁽¹⁾ Var, variância (unidade da variável); ⁽²⁾ sd, desvio padrão (unidade da variável); ⁽³⁾ CV, coeficiente de variação (%). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

As densidades do solo (ρ_s) e de partículas (ρ_p) não apresentaram diferença significativa entre as camadas do solo (TABELA 2.1), e a magnitude dos valores obtidos são de solos de textura arenosa (Ferreira, 2010), considerando que a ρ_s de solos arenosos pode variar de 1300 a 1800 kg m⁻³ (Libardi, 2012). Souza et al. (2015) encontraram ρ_s média de 1620 kg m⁻³ na área da Estação Experimental PMGCA/UFPR e RIDESA, sendo próximo da ρ_s média obtida no presente trabalho ($\rho_s = 1640$ kg m⁻³). Na literatura encontra-se relato de restrição do crescimento radicular da cana-de-açúcar para ρ_s superiores a 1700 kg m⁻³, em solo de textura arenosa, na camada 0,0-1,0 m: areia grossa > 337 g kg⁻¹; areia fina > 409 g kg⁻¹; argila > 87 g kg⁻¹; silte > 57 g kg⁻¹ (Barbosa, 2015). Assim, os valores obtidos no presente estudo (entre 1600 e 1700 kg m⁻³) encontram-se no limite de induzir possíveis restrições ao crescimento radicular da cultura, justificando a adoção de práticas de manejo para minimizar a compressão do solo.

A média da porosidade total ($TP = 0,33$ m³ m⁻³) obtida foi baixa, como comumente é observado em solos arenosos com teores de areia fina (Barbosa, 2015; Parahyba et al., 2016). Ortiz et al. (2017) encontraram TP entre 0,29 e 0,38 m³ m⁻³ em solo arenoso (areia > 866,00 g kg⁻¹) cultivado no primeiro, terceiro e quinto ciclo da cana-de-açúcar, em 44, 40 e 15 anos de produção, respectivamente. Foram obtidos baixos valores de *Macro* poros (0,09 m³ m⁻³) nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m (TABELA 2.1; APÊNDICE 1), podendo ser um problema, pois valores

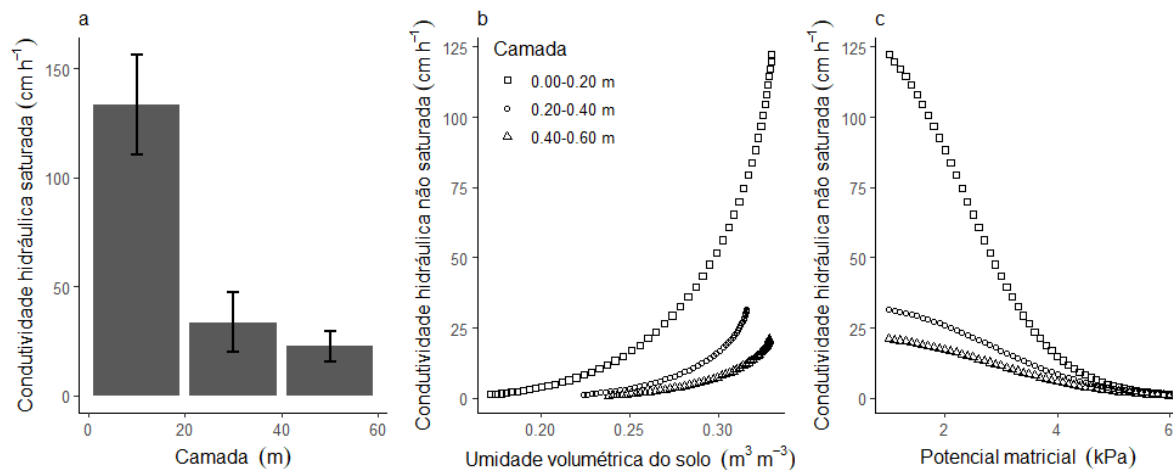
inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ são limitantes à aeração do solo e prejudicial para produção agrícola (Ferreira, 2010; Cabral et al., 2015; Arcoverde et al., 2019). Os resultados obtidos são importantes para o manejo de solos arenosos (Cabral et al., 2015), em que as práticas devem condicionar a redução da ρ_s e aumento da *TP* e *Macro*, principalmente nas camadas mais profundas. O aporte contínuo de resíduos orgânicos é uma das práticas que se destaca para aumentar a matéria orgânica no solo e promover mudanças na estrutura em solos arenosos (Auler et al., 2020). A matéria orgânica possui baixa densidade, e o seu aumento no solo proporciona a redução da ρ_s (Chaudhari et al., 2013; Parahyba et al., 2019). Em solos sob sistemas conservacionistas, o aporte contínuo de resíduos orgânicos aumenta a atividade da fauna do solo, condicionando a abertura da rede de poros, favorecendo o aumento da *Macro* e conectividade dos poros (Galdos et al. 2019).

Com a redução da *Macro* verificou-se aumento da *Micro*, mas não houve aumento da ρ_s e redução da *TP* ($p < 0,05$) nas camadas subsuperficiais (TABELA 2.1; APÊNDICE 1). Houve aumento da *Micro* e dos teores de argila e silte em profundidade. Os resultados obtidos indicaram que a dinâmica da água nos solos analisados pode ser modificada entre suas camadas, visto que a *Micro* é responsável pela retenção e condução de água em solo não saturado, e a *Macro* pela drenagem e aeração do solo (Ferreira, 2010; Parahyba et al., 2016).

2.5.2 Movimento da água em solo arenoso

A K_s foi superior na camada 0,00-0,20 m e reduziu abruptamente em profundidade (FIGURA 2.2; APÊNDICE 1), devido à *Macro* facilitar a drenagem da água em solo saturado (Parahyba et al., 2016). Altos valores de K_s em camadas mais superficiais é característica de solos de textura arenosa e bem drenados (Souza et al. 2018). Entretanto, principalmente na camada 0,40-0,60 m, a mudança abrupta na K_s pode tornar o solo suscetível ao cisalhamento e potencializar seu processo erosivo, devido a K_s e o teor de areia representarem mais de 80% da variabilidade nas perdas de solo (Jadczyzyn e Niedzwiecki, 2005). O resultado obtido reforça a hipótese da necessidade do aumento da macroporosidade em profundidade.

FIGURA 2.2 – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_S) E NÃO SATURADA ($K(\theta)$; $K(\psi)$) NAS CAMADAS 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m E 0,40-0,60 m, DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO PMGCA, CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR.



FONTE: a Autora (2022).

Mesmo com a K_S na camada superficial superior às demais (FIGURA 2.2a), os valores foram inferiores aos solos de outras texturas, também cultivados com cana-de-açúcar (Cherubin et al., 2016; Silva et al., 2018). Devido aos efeitos do preparo do solo recém realizado para o replantio da cana-de-açúcar (escarificação e gradagem), Cherubin et al. (2016) encontraram K_S (medida em campo) de 250,0 cm h^{-1} em solo com textura média argilosa, na camada superficial. Os autores verificaram que a K_S apresentou correlação direta com a TP e $Macro$, e inversa com ρ_S e o grau de compactação do solo, sendo influenciada diretamente pelo manejo do solo. Silva et al. (2018) observaram em solos arenosos que a K_S diminuiu com o aumento da profundidade, com o aumento da densidade e microporosidade. Os autores verificaram correlação direta entre a K_S com as frações areia grossa e areia média, e correlação inversa com a capacidade de água disponível. Além disso, verificou-se que a capacidade de água disponível apresentou correlação linear inversa com a frações granulométricas areia grossa e areia média, e linear direta com o volume de microporos.

Como a K_S , a $K(\theta)$ também foi maior na camada mais superficial do solo. Contudo, a diminuição da $K(\theta)$ com a redução da umidade volumétrica no solo foi mais expressiva na camada 0,00-0,20 m, em comparação com as demais (FIGURA

2.2b). A $K(\psi)$ na camada superficial apresentou maior decaimento (FIGURA 2.2c) com o aumento do potencial matricial, devido a menor quantidade de poros capilares (Parahyba et al., 2016). A $K(\psi)$ entre as camadas de solo foram similares em potenciais matriciais maiores que -5 kPa, sugerindo que a capacidade de campo do solo arenoso foi atingida antes de -6 kPa (Prevedello, 1999).

A relação de dependência da $K(\theta)$ com o potencial matricial indicou que podem haver modificações na retenção de água no solo, como consequência de alguma variação na curva de distribuição de poros. Assim, os resultados da $K(\psi)$ dos solos arenosos analisados demonstraram que a avaliação da qualidade do solo não pode se limitar a separação da TP em *Macro* e *Micro*, mas se faz necessária a determinação detalhada da curva de distribuição de poros (Parahyba et al., 2019).

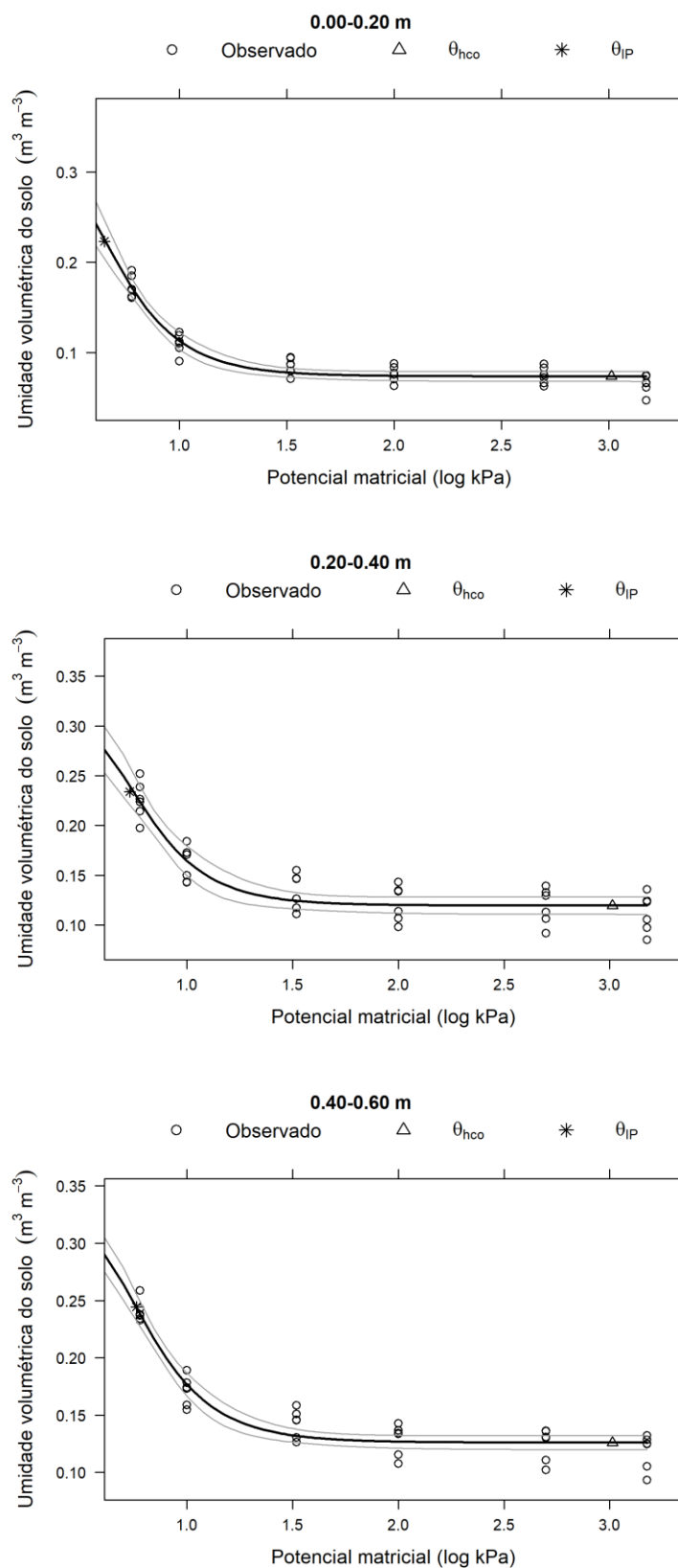
2.5.3 Retenção de água e distribuição de poros

As curvas de retenção de água no solo não evidenciaram efeitos de compressão (FIGURA 2.3), pois os valores de ρ_s encontram-se abaixo do crítico para cultura ($\rho_{s \text{ crítico}} > 1,70 \text{ kg dm}^{-3}$; Barbosa, 2015).

Os parâmetros do modelo van Genuchten (α e n) foram significativos ($p < 0,05$) para representar a curva de retenção de água no solo para todas as camadas de solo (TABELA 2.2). Os erros e índice estatísticos entre as umidades volumétricas do solo observadas (θ ; $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e estimadas ($\hat{\theta}$; $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) indicaram que os ajustes com o modelo van Genuchten-Burdine foram satisfatórios para as camadas analisadas (TABELA 2.3). Entre os erros, o *NRMSE* foi maior, devido à utilização das seis repetições em cada potencial matricial para realizar o ajuste da curva de retenção de água no solo, o que melhorou a significância do ajuste.

Observou-se maior retenção de água no solo nas camadas subsuperficiais (TABELA 2.2; FIGURA 2.3), devido ao aumento da *Micro* e teores de argila e silte, e redução do teor de areia grossa em profundidade (TABELA 2.1). O erro relativo correspondeu à 33,5% e 37,6% nas camadas 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, em relação a camada superficial, respectivamente. Nos potenciais -33 kPa, -100 kPa e -500 kPa os erros relativos médios foram de 35,6% e 39,5%. O maior erro relativo (40,3% e 43,9%) ocorreu no potencial matricial de -1500 kPa.

FIGURA 2.3 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO, NAS CAMADAS 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m E 0,40-0,60 m. OS VALORES AJUSTADOS ESTÃO ACOMPANHADOS DA BANDA DE CONFIANÇA PARA O VALOR PREDITO.



FONTE: a Autora (2022).

TABELA 2.2 – PARÂMETROS AJUSTADOS PARA O MODELO DE VAN GENUCHTEN E SEUS INTERVALOS DE CONFIANÇA (IC_{95%}).

Camadas (m)	Parâmetro	Valor estimado	Erro	<i>t</i>	<i>p</i> -valor	IC _{95%}	<i>R</i> ²
0,00-0,20	θ_s (m ³ m ⁻³)	0,330815	0,005	63,935	<0,001	[0,321; 0,341]	0,98
	θ_r (m ³ m ⁻³)	0,073671	0,003	26,005	<0,001	[0,068; 0,079]	
	α (kPa ⁻¹)	0,264650	0,027	9,633	<0,001	[0,211; 0,318]	
	<i>n</i> (ad.)	3,919098	0,331	11,847	<0,001	[3,271; 4,567]	
0,20-0,40	θ_s (m ³ m ⁻³)	0,316257	0,008	39,121	<0,001	[0,300; 0,332]	0,93
	θ_r (m ³ m ⁻³)	0,119548	0,004	26,803	<0,001	[0,111; 0,128]	
	α (kPa ⁻¹)	0,214783	0,028	7,607	<0,001	[0,159; 0,270]	
	<i>n</i> (ad.)	3,897158	0,507	7,680	<0,001	[2,903; 4,892]	
0,40-0,60	θ_s (m ³ m ⁻³)	0,329086	0,006	59,020	<0,001	[0,318; 0,340]	0,96
	θ_r (m ³ m ⁻³)	0,125932	0,003	40,440	<0,001	[0,120; 0,132]	
	α (kPa ⁻¹)	0,211041	0,018	11,550	<0,001	[0,175; 0,247]	
	<i>n</i> (ad.)	3,823957	0,318	12,040	<0,001	[3,201; 4,447]	

θ_s e θ_r – umidade volumétrica do solo na saturação e residual, respectivamente; α e *n* – parâmetros do modelo de van Genuchten.

TABELA 2.3 – ERROS E ÍNDICE ESTATÍSTICOS ENTRE A UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO OBSERVADA (θ ; m³ m⁻³) E ESTIMADA ($\hat{\theta}$; m³ m⁻³), COM O MODELO DE VAN GENUCHTEN, UTILIZANDO A RESTRIÇÃO DE BURDINE.

Camada (m)	<i>RMSE</i> (m ³ m ⁻³)	<i>NRMSE</i> (%)	<i>RSR</i> (ad.)	<i>d</i> (ad.)
0,00-0,20	0,01	13,40	0,13	1,00
0,20-0,40	0,02	25,80	0,26	0,98
0,40-0,60	0,01	17,50	0,17	0,99

O solo retém água devido as forças matriciais capilares e de adsorção, que são responsáveis pela retenção de água nos poros capilares dos agregados e nas superfícies das partículas do solo, respectivamente (Libardi, 2010). As superfícies das argilas são negativamente carregadas e adsorvem grandes quantidades de molécula de água na superfície do solo, devido à sua alta área superficial específica (caulinita: 70000 a 300000 cm² g⁻¹; Giasson, 2017; Silva; Libardi; Gimenes, 2018). Assim, as camadas de solo com maiores teores de argila retêm mais água no solo, reforçando os resultados obtidos.

Os solos da formação do arenito Caiuá apresentam baixo teor de argila, com predomínio da caulinita (> 80%) e presença de illita, argilominerais 2:1 e pequenas quantidades de óxidos de ferro e alumínio (Costa et al., 2020). Tem-se também alto teor de areia, com predominância de grandes diâmetros de poros (> 30 μ m; FIGURA

2.4), que são drenados em baixos potenciais matriciais (Costa et al., 2013; Parahyba et al., 2019), reduzindo a capacidade de retenção de água no solo.

A camada de solo (0,40-0,60 m) com maior teor de areia fina reteve mais água no solo, principalmente em baixos potenciais matriciais (menores que -33 kPa; FIGURA 2.3). O resultado obtido reforça a importância do fracionamento da areia total dos solos arenosos, devido à maior área superficial específica da areia fina ($318 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) em relação a areia grossa ($79 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) (Fidalski et al., 2013; Giasson, 2017). A distribuição entre as frações de areia fina e grossa é uma característica inerente da formação do solo, não sendo alterada pelo manejo. Desta forma, é válido ressaltar a importância que o acúmulo de matéria orgânica tem em solos arenosos, pois além de aumentar a agregação, beneficia a retenção e disponibilidade de água no solo (Rawls et al., 2003; Ferreira, 2010; Lopes et al., 2017; Costa et al., 2020; Auler et al., 2020).

Dentre os resultados obtidos nas análises das curvas de retenção de água no solo, verificou-se que: *i*) A umidade residual (θ_r) foi semelhante à umidade volumétrica do solo no ponto de corte hidráulico (θ_{hco}), nas camadas 0,00-0,20 m ($0,073677 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), 0,20-0,40 m ($0,119555 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 0,40-0,60 m ($0,125943 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (TABELA 2.2); *ii*) A umidade residual (θ_r) foi maior que a umidade volumétrica observada a -1500 kPa; e, *iii*) A diferença relativa média da umidade volumétrica a -500 e -1500 kPa foi de 12,92%, 6,03% e 5,09% nas camadas 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente, com indicativos que o potencial matricial no ponto de murcha permanente ocorre entre -500 kPa e -1030 kPa (ponto de corte hidráulico).

A obtenção do real valor do potencial matricial para culturas agrícolas melhoradas tem sido uma discussão recorrente (Wiecheteck et al., 2020; Torres et al., 2021). Torres et al. (2021) encontraram valores de $\psi_{PMP} < -1500$ kPa e constataram que as culturas girassol, milho e soja murcharam em potenciais inferiores aos potenciais matriciais estimados no corte hidráulico. Quando as plantas murcham com sucções de água menores que o corte hidráulico, o ponto de murcha permanente é limitado pela planta. E quando as plantas murcham em sucções maiores que o corte hidráulico a limitação é do solo (Czyz e Dexter, 2013).

Logo, em solos arenosos, a obtenção do real ponto de murcha permanente deve receber maior atenção. Na literatura, em solo de textura arenosa (803 g kg^{-1}), existem indicações que o potencial matricial médio no ponto de murcha permanente fisiológico foi de $-163,7 \text{ kPa}$ (Mestre) e $-241,7 \text{ kPa}$ (Noble) para duas cultivares modernas de trigo, e $-90,9 \text{ kPa}$ (ANAG 01) e $-45,9 \text{ kPa}$ (BRS Brau) para duas cultivares de cevada (Wiecheteck et al., 2020).

A diferença relativa da umidade volumétrica a -200 e -1030 kPa foi de $0,164\%$, $0,125\%$ e $0,166\%$, nas camadas de solo $0,00-0,20 \text{ m}$, $0,20-0,40 \text{ m}$ e $0,40-0,60 \text{ m}$, respectivamente. Contudo, é fundamental enfatizar que não foram encontrados na literatura estudos que reportem o potencial matricial estimado no ponto de murcha permanente fisiológico para cultivares modernas de cana-de-açúcar, provenientes de programas de melhoramento genético. A sucção de corte hidráulico (-1030 kPa) inferior à -1500 kPa reforçam a necessidade de maiores estudos para o tipo de solo arenoso analisado.

O *RSR* é uma das estatísticas quantitativas recomendadas por Moriasi et al. (2007) para avaliar modelos. As menores magnitudes do *RSR* foram observadas em p distintos nas camadas de solo, devido aos atributos físico-hídricos do solo (TABELA 2.4). Prevedello (1999) verificou em solos homogêneo e heterogêneo que a taxa de drenagem (τ) correspondeu a $p = 0,01$ da condutividade hidráulica saturada do solo ($\tau = 0,01 \cdot K_S$). Andrade e Stone (2011) encontraram $\psi_{CC} = -6,5 \text{ kPa}$ correspondente à $\hat{\theta}_{CC}$, para τ de $0,01$ da K_S , em solo de textura arenosa, no Cerrado.

A umidade no ponto de inflexão ($\hat{\theta}_{IP}$) é considerada ótima para o preparo do solo (Dexter e Bird, 2001) e correlaciona-se bem com a umidade na capacidade de campo (Andrade e Stone, 2011). No ponto de inflexão da curva de retenção a primeira derivada altera de negativo (convexidade) para positivo (concavidade), e a segunda derivada é zero (Silva et al., 2010), sendo relevante sua determinação para realizar a estimativa da $\hat{\theta}_{CC}$.

TABELA 2.4 – ESTIMATIVA DA REAL UMIDADE ($\hat{\theta}_{CC}$; $m^3 m^{-3}$), POTENCIAL MATRICIAL (ψ_{CC} ; kPa) E TEMPO (t_{CC} ; h) NA CAPACIDADE DE CAMPO, E ERRO ESTATÍSTICO ENTRE AS UMIDADES VOLUMÉTRICAS NA CAPACIDADE DE CAMPO OBSERVADAS (θ_{CC} ; $m^3 m^{-3}$) A -6 kPa E ESTIMADAS ($\hat{\theta}_{CC}$; $m^3 m^{-3}$).

Camada (m)	Porcentagem p da K_s							
	0,0050	0,0100	0,0150	0,0200	0,0250	0,0300	0,0400	0,0500
----- $\hat{\theta}_{CC}$ ($m^3 m^{-3}$) -----								
0,00-0,20	0,1571c	0,1722c	0,1823b	0,1900b	0,1963b	0,2017b	0,2106b	0,2179a
0,20-0,40	0,1835ab	0,1951ab	0,2028ab	0,2087ab	0,2135ab	0,2176ab	0,2245ab	0,2301a
0,40-0,60	0,1921a	0,2041a	0,2121a	0,2182a	0,2232a	0,2275a	0,2345a	0,2403a
Média	0,1776	0,1905	0,1990	0,2056	0,2110	0,2156	0,2232	0,2295
Var	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
sd	0,0201	0,0191	0,0186	0,0182	0,0180	0,0178	0,0175	0,0173
CV	11,3169	10,0498	9,3414	8,8648	8,5125	8,2366	7,8313	7,5444
----- RSR (adimensional) -----								
0,00-0,20	1,96	1,57	1,78	2,15	2,52	2,87	3,49	4,02
0,20-0,40	2,41	1,88	1,57	1,37	1,23	1,15	1,10	1,15
0,40-0,60	5,20	4,00	3,23	2,66	2,23	1,89	1,47	1,35
----- ψ_{CC} (kPa) -----								
0,00-0,20	6,5540c	5,9328c	5,5858c	5,3456c	5,1619b	5,0134b	4,7809b	4,6016b
0,20-0,40	8,1606ab	7,3799ab	6,9446ab	6,6431ab	6,4130ab	6,2267ab	5,9359ab	5,7113ab
0,40-0,60	8,5609a	7,7264a	7,2608a	6,9388a	6,6928a	6,4940a	6,1828a	5,9424a
Média	7,7585	7,0130	6,5971	6,3092	6,0893	5,9114	5,6332	5,4184
Var	1,4782	1,3023	1,2106	1,1496	1,1039	1,0675	1,0120	0,9694
sd	1,2158	1,1412	1,1003	1,0722	1,0507	1,0332	1,0060	0,9846
CV	15,6706	16,2724	16,6784	16,9938	17,2546	17,4785	17,8582	18,1711
----- t_{CC} (h) -----								
0,00-0,20	0,6043c	0,3548c	0,2594c	0,2074c	0,1742c	0,1510c	0,1204c	0,1008c
0,20-0,40	1,8445b	1,0827b	0,7913b	0,6327b	0,5315b	0,4606b	0,3671b	0,3074b
0,40-0,60	2,8429a	1,6686a	1,2193a	0,9750a	0,8190a	0,7099a	0,5656a	0,4734a
Média	1,7639	1,0354	0,7567	0,6050	0,5082	0,4405	0,3510	0,2939
Var	0,9529	0,3283	0,1753	0,1121	0,0791	0,0595	0,0378	0,0265
sd	0,9762	0,5730	0,4187	0,3348	0,2813	0,2439	0,1944	0,1627
CV	55,3420	55,3397	55,3381	55,3457	55,3500	55,3613	55,3699	55,3672

Var, variância (unidade da variável); sd, desvio padrão (unidade da variável); CV, coeficiente de variação (%). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($\hat{\theta}_{CC}$ e ψ_{CC}); t_{CC} pelo teste de Kruskal Wallis.

Análises da umidade no ponto de inflexão da curva de retenção da água no solo (TABELA 2.5; FIGURA 2.3) indicaram que a taxa de drenagem do solo correspondeu à $p = 0,0500$ da K_s . A maior magnitude da taxa de drenagem do solo analisado deveu-se à textura, predominantemente da fração areia grossa. Para $p = 0,0500$ verificou-se ψ_{CC} médio de $-4,6016$ kPa (0,00-0,20 m), $-5,7113$ kPa (0,20-0,40 m) e $-5,9424$ kPa (0,40-0,60 m). Em relação ao tempo para ocorrer a capacidade de campo (t_{CC} ; h), o solo apresentou rápida drenagem vertical devido à magnitude da condutividade hidráulica saturada (K_s). Neste caso, a alta magnitude da K_s influenciou os valores baixos do t_{CC} . Verificou-se menor ψ_{IP} na camada 0,00-0,20 m, devido à textura do solo (TABELA 2.5). A fração areia do solo também interfere no potencial matricial correspondente ao ponto de murcha permanente.

TABELA 2.5 – ESTIMATIVA DA UMIDADE ($\hat{\theta}_{IP}$; $m^3 m^{-3}$) E POTENCIAL MATRICIAL (ψ_{IP} ; kPa) NO PONTO DE INFLEXÃO, E ERRO ESTATÍSTICO ENTRE AS UMIDADES VOLUMÉTRICAS NA CAPACIDADE DE CAMPO OBSERVADAS (θ_{CC} ; $m^3 m^{-3}$) A -6 KPA E ESTIMADAS ($\hat{\theta}_{IP}$; $m^3 m^{-3}$).

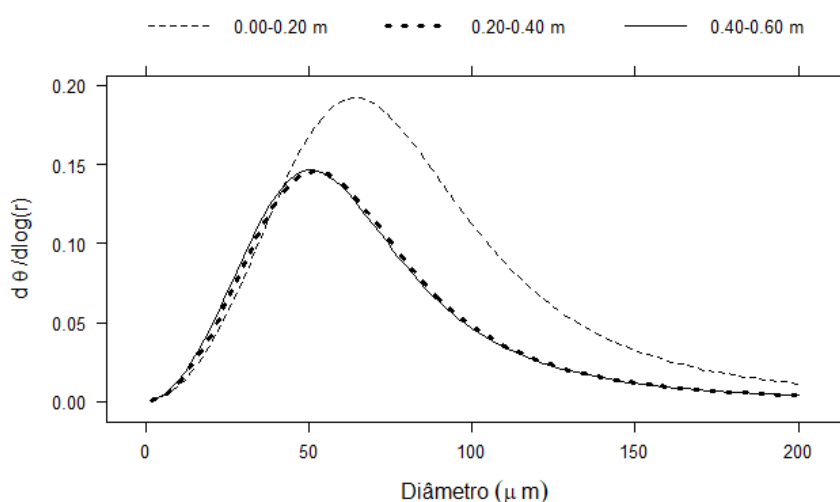
Camada (m)	$\hat{\theta}_{IP}$ ($m^3 m^{-3}$)	ψ_{IP} (kPa)	RSR (adimensional)
0,00-0,20	0,2233b	4,4752b	4,29
0,20-0,40	0,2341ab	5,3710ab	1,08
0,40-0,60	0,2444a	5,7851a	1,37
Média	0,2339	5,2104	–
Var. ⁽¹⁾	0,0002	0,8792	–
sd ⁽²⁾	0,0151	0,9377	–
CV ⁽³⁾	6,4752	17,9958	–

⁽¹⁾ Var – variância (unidade da variável); ⁽²⁾ sd – desvio padrão (unidade da variável); ⁽³⁾ CV – coeficiente de variação (%). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

A curva de distribuição de poros (FIGURA 2.4) apresentou diâmetro máximo dos poros (d_{max}) de $64,19 \mu m$ (0,00-0,20 m), $51,96 \mu m$ (0,20-0,40 m) e $50,60 \mu m$ (0,40-0,60 m). O ponto máximo da curva de frequência do diâmetro de poros $d\theta/d\log(r)$ correspondeu à $0,192$ (0,00-0,20 m), $0,1458$ (0,20-0,40 m) e $0,1463$ (0,40-0,60 m) nas camadas de solo analisadas. Observou-se maior magnitude do diâmetro de poros na camada superficial do solo, devido ao maior teor de areia grossa (TABELA 2.1). A influência da fração areia grossa no maior diâmetro de poros e, conseqüentemente, menor disponibilidade de água em solos predominantemente arenosos também foi constatado por Fidalski et al. (2013). Em solos com predominância de areia, especialmente areia grossa, a agregação do solo é reduzida, não permitindo o desenvolvimento de rede de poros mais

diversa; principalmente nos poros de menor diâmetro, formados predominantemente pelas interações organo-minerais na fração argila (Parahyba et al., 2019; Costa et al., 2020).

FIGURA 2.4 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS DAS CAMADAS 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR, NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL PMGCA/UFPR E RIDESA.



FONTE: a Autora (2022).

É importante ressaltar que maiores diâmetros dos poros necessitam de menor energia para a remoção da água no solo (Parahyba et al., 2019), conforme os resultados obtidos de K_S e $K(\theta)$ (FIGURA 2.2).

2.5.4 Disponibilidade de água

De modo geral, o solo da área experimental cultivado com cana-de-açúcar apresentou baixa disponibilidade de água para às plantas nas camadas analisadas (TABELA 2.6), sendo característica de solos com baixos valores de argila (Souza et al., 2015; Souza et al., 2018). Não houve diferença estatística entre as camadas ($p > 0,05$), mas as maiores AWC_1 e EAW_1 ocorrem nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, devido a maior quantidade de argila e *Micro* (Souza et al., 2018). As maiores AWC_2 e EAW_2 ocorreram na camada superficial ($p > 0,05$), devido ao maior teor de carbono orgânico que aumenta a retenção e disponibilidade de água para as plantas (Rawls et al., 2003).

TABELA 2.6 – ATRIBUTOS HÍDRICOS DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO, CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL PMGCA/UFPR E RIDESA.

Camada m	θ_{CC}	$\hat{\theta}_{CC}$	θ_{PMP}	θ_{hco}	AWC_1	AWC_2	EAW_1	EAW_2
	----- m ³ m ⁻³ -----				----- mm -----			
0,00-0,20	0,173b	0,218a	0,065b	0,073b	21,597a	30,589a	19,906a	28,898a
0,20-0,40	0,225a	0,230a	0,112a	0,119a	22,713a	23,643b	21,214a	22,144b
0,40-0,60	0,241a	0,240a	0,118a	0,126a	24,470a	24,436b	22,910a	22,876b
Média	0,213	0,229	0,098	0,106	22,927	26,222	21,344	24,639
Var ⁽¹⁾	0,001	0,0003	0,0008	0,001	9,343	21,217	7,912	20,663
sd ⁽²⁾	0,033	0,017	0,028	0,027	3,057	4,606	2,813	4,546
CV ⁽³⁾	15,329	7,544	28,823	25,827	13,332	17,566	13,179	18,449

⁽¹⁾ Var – variância (unidade da variável); ⁽²⁾ sd – desvio padrão (unidade da variável); ⁽³⁾ CV – coeficiente de variação (%). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Fidalski et al. (2013) estudando solos de formação do arenito Paranavaí, na região noroeste do Paraná, verificaram que o uso e manejo do solo interferiu na disponibilidade de água às plantas. Os autores encontraram AWC na camada entre 0,0-0,40 m de 48,60 mm e 58,70 mm no solo sob integração lavoura-pecuária e abacaxi, respectivamente. Helbel Júnior e Fidalski (2017) encontraram capacidade média de armazenamento de água de 1 mm cm⁻¹ na camada 0,00-0,60 m, em Latossolo Vermelho distrófico, textura média, da região Noroeste do Paraná.

Na camada de solo 0,00-0,60 m foram verificados: $AWC_1 = 68,78$ mm; $AWC_2 = 78,67$ mm; $EAW_1 = 64,03$ mm e $EAW_2 = 73,92$ mm. A AWC_2 superestima a disponibilidade de água no solo, pois a umidade volumétrica real no ponto de murcha permanente do solo analisado ocorre antes de -1500 kPa (θ_{PMP}). A EAW_1 subestima a disponibilidade de água no solo, pois a umidade volumétrica real na capacidade de campo ocorre em potenciais matriciais mais baixos que -6 kPa (θ_{CC}), ressaltando-se a importância da estimativa real da umidade volumétrica na capacidade de campo (Andrade e Stone, 2011) e do ponto de corte hidráulico (Czyz e Dexter, 2013).

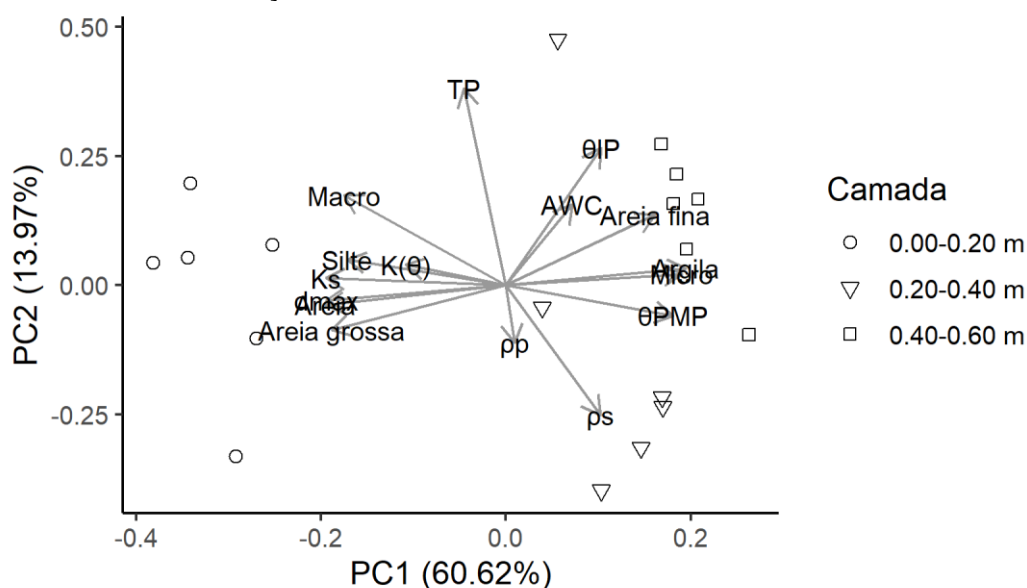
A baixa disponibilidade de água para as plantas em solos arenosos pode proporcionar a ocorrência de déficit hídrico durante o ciclo da cana-de-açúcar, como evidenciado por Gurski et al. (2020) e Araújo (2019). A alta condutividade hidráulica do solo ($K(\theta)$) e o baixo tempo para atingir a umidade na capacidade de campo (t_{CC}) intensificam a ocorrência do déficit hídrico. Gurski et al. (2020) verificou que a deficiência e excedente hídrico concentraram-se principalmente na Fase de

desenvolvimento II (crescimento vegetativo), nas safras 1997/98 a 2008/09, em Paranaíba-PR, sendo necessário irrigação de salvamento. Assim, os atributos físico-hídricos determinados no presente estudo devem ser considerados no manejo da irrigação e da planta em cada fase do seu desenvolvimento.

2.5.5 Relações multivariadas entre os atributos físico-hídricos do solo

A análise de componentes principais (PCA) foi utilizada para validação das associações entre os atributos físicos estruturais e hidráulicos, estabelecidas previamente. Realizada a PCA, observou-se que o primeiro componente principal (PC1) explicou 60,6% da variância total. O PC1 (autovalor de 3,114) e PC2 (autovalor de 1,495) explicaram juntos 74,6% da variância total (FIGURA 2.5).

FIGURA 2.5 – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO, CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL PMGCA/UFPR E RIDESA.



FONTE: a Autora (2022).

A PCA também foi eficiente na distinção entre as camadas de solo. A camada 0,00-0,20 m foi caracterizada e influenciada principalmente pelos atributos físico-hídricos *Macro*, silte, K_s , $K(\theta)$, areia, areia grossa e d_{max} . As variáveis areia fina, argila, *Micro*, θ_{PMP} , θ_{IP} , ρ_s e AWC_1 foram maiores e mais expressivas nos atributos físico-hídricos das camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m (FIGURA 2.5).

Verificou-se que a K_s apresentou relação direta com areia, areia grossa, silte, *Macro* e d_{max} , e inversa com *Micro*, argila, θ_{PMP} e areia fina. A ρ_s apresentou

relação inversa com a *Macro*. A *Micro* teve relação direta com argila, areia fina e θ_{PMP} , e inversa com K_S , areia, areia grossa, silte, *Macro* e d_{max} .

O efeito dos teores de areia na retenção de água do arenito Caiuá, da região Noroeste do Paraná, foi confirmada com a correlação inversa dos teores de areia grossa com *Micro*, θ_{PMP} , argila, areia fina e θ_{IP} , concordando com Fidalski (2017). Os resultados indicaram novamente a importância da avaliação mais detalhada dos atributos físico-hídricos dos solos arenosos, principalmente para o monitoramento da qualidade física e manejo da água no solo analisado.

2.6 CONCLUSÕES

No presente estudo foram investigados os principais atributos físico-hídricos de um solo arenoso, no Estado do Paraná (Sul do Brasil), destinado ao cultivo de cana-de-açúcar em um programa de melhoramento genético. As informações serão importantes em futuros programas de melhoramento quanto a seleção de variedades mais tolerantes ao déficit hídrico:

- Nos solos arenosos (teor de areia total próximo a 800 g kg^{-1}) analisados, a distribuição das frações areia grossa (2-0,2 mm) e fina (0,2-0,05 mm) deve ser mensurada para avaliação dos atributos físico-hídricos do solo, e não apenas o teor de areia total. Os maiores teores de areia grossa interferem no aumento da condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado, diâmetro máximo dos poros e macroporosidade, bem como na redução da microporosidade. A maior proporção de areia fina reduz a condutividade e aumenta a retenção de água, principalmente em camadas mais profundas (0,40-0,60 m);
- O real potencial matricial na capacidade de campo foi de $-4,60 \text{ kPa}$, abaixo do difundido para solos arenosos (-6 kPa), na camada mais superficial do solo. O ponto de corte hidráulico do solo indicou que o potencial matricial do ponto de murcha permanente é atingido em -1030 kPa , e não -1500 kPa . Embora a retenção de água no solo aumente em profundidade, a sua disponibilidade é maior na camada 0,00-0,20 m, com as modificações na real umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente;

2.7 REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.111-116, 2011.

ARAÚJO, R. M. **Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar na região sul do Brasil**. 101 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – (Produção Vegetal), Curitiba, 2019.

ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A.; SUAREZ, A. H. T.; COLMAN, B. A.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.6, n.1, p.41-47, 2019.

AULER, A. C.; ROMANIW, J.; SÁ, J. C. M.; PIRES, L. F.; HARTMAN, D. C.; INAGAKI, T. M.; ROSA, J. A. Improvement on soil structure and water retention after application of industrial organic waste as a crop fertilizer. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p.2771-2783, 2020.

BARBOSA, L. C. **Atributos físicos do solo e desenvolvimento radicular à cana-planta em diferentes sistemas de manejo**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, 2015.

BERTON, G. S.; OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BRASILEIRO, B. P.; IDO, O. T.; RUARO, L.; WEBER, H. RB036091 - an early-maturing sugarcane cultivar for the Central South of Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.20, n.2, 2020.

BURDINE, N.T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **American Institute Mining and Metallurgy Engineering**, v.198, 1953.

CABRAL, M. C. M.; CARVALHO, L. A.; NOVAK, E.; SCHICARELLI, C. D. S. Sistema de preparo de solo em área de reforma de canavial e as alterações físicas do solo. **Revista Agrarian**, v.8, n.30, p.376-386, 2015.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1541-1549, 2011.

CHAUDHARI, P. R.; AHIRE, D. V.; AHIRE, V. D.; CHKRAVARTY, M.; MAITY, S. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 3, 2013.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v.267, p.156-168, 2016.

COSTA, A. C. S.; SOUZA JUNIOR, I. G.; CANTON, L. C.; GIL, L. G.; FIGUEIREDO, R. Contribution of the chemical and mineralogical properties of sandy-loam tropical soils to the cation exchange capacity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 2020.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; PÉRTILE, P.; SILVA, F. R. Water retention and availability in soils of the state of Santa Catarina-Brazil: effect of textural classes, soil classes and lithology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p.1535-1548, 2013.

CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R. Influence of soil type on the wilting of plants. **International Agrophysics**, v. 27, p.385-390, 2013.

DAROS, E.; OLIVERIA, R. A.; ZAMBON, J. L. C.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BRASILEIRO, B. P.; IDO, O. T.; RUARO, L.; WEBER, H. RB036066 - a sugarcane cultivar with high adaptability and yield stability to Brazilian South-Central region. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.18, n.3, 2018.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil & Tillage Research**, v.57, 2001.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

FERREIRA, M. Caracterização física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed.). **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., 2010, p. 1-27.

FIDALSKI, J. Disponibilidade de água e comportamento físico dos solos da Formação Arenito Caiuá. In: **V Reunião Paranaense de Ciência do Solo e II Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos**. 2017, Maringá. Livro eletrônico. Curitiba: SBCS/NEPAR; Londrina: IAPAR.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; AULER, P. A. M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos das Formações Caiuá e Paranavaí. **Revista Brasileira Ciência de Solo**, v.37, p.613-621, 2013.

GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, H. V.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, v.337, p.1126-1135, 2019.

GIASSON, E. Introdução ao estudo dos solos. In: Meurer E. J.; Editor. **Fundamentos de Química do Solo**. 6ª. Ed. Porto Alegre: 2017. p.11-28.

Google Maps. Google. 2019. “Estação Experimental da UFPR”. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.9762068,-52.4722051,971m/data=!3m1!1e3>>.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v.36, p.664-668, 2006.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERG, E.; OLIVEIRA, R. A. Water requirements and restrictions to sugarcane in cane plants and ratoon cane cycles in Southern Brazil. **Acta Agronômica**, v.69, n.2, p.135-143, 2020.

HELBEL JUNIOR, C.; FIDALSKI, J. Parâmetros técnicos sobre o armazenamento de água no solo na Região Noroeste do Paraná. In: **V Reunião Paranaense de Ciência do Solo e II Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos**. 2017, Maringá. Livro eletrônico. Curitiba: SBCS/NEPAR; Londrina: IAPAR.

HORIKOSHI, M; TANG, Y. **ggfortify: Data Visualization Tools for Statistical Analysis Results**. <https://CRAN.R-project.org/package=ggfortify>, 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malha territoriais do Brasil, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>>.

JADCZYSZYN, J.; NIEDZWIECKI, J. Relation of Saturated Hydraulic Conductivity to Soil Losses. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 14, n. 4, p.431-435, 2005.

LIBARDI, P. L. Água no solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed.). **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., 2010, p. 101-152.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

LOPES, I. M; ZIVIANI, M. M.; PINTO, L. A. S.; PINHEIRO, E. F. M.; WEBER, H.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E.; CAMPOS, D. V. B. Agregação e distribuição do carbono nos agregados de Latossolo Vermelho sob diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar em Paranavaí (PR). **Revista Virtual de Química**, n.9, v.5, 2017.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.495-502, 2008.

MANGIAFICO, S. S. Summary and Analysis of Extension Program Evaluation in R, version 1.18.1. <https://rcompanion.org/handbook/>. 2016.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the Asabe**, v. 50, p.885-900, 2007.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

ORTIZ, P. F. S.; ROLIM, M. M.; LIMA, J. L. P.; PEDROSA, E. M. R.; DANTAS, M. S. M.; TAVARES, U. E. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. **Geoderma Regional**, v.11, p.62-70, 2017.

PARAHYBA, R. B. V.; ALMEIDA, B. G.; ROLIM NETO, F. C.; ARAÚJO, M. S. B. Condutividade hidráulica dos solos arenosos da região semiárida da Bacia sedimentar do Tucano no município de Glória, Bahia, Brasil. **III Reunião Nordestina de Ciência do Solo: Integração e uso do conhecimento para uma agricultura sustentável no Nordeste**. 12 a 15 de setembro de 2016 – Aracajú/SE.

PARAHYBA, R. B. V.; ARAÚJO, M. S. B.; ALMEIDA, B. G.; ROLIM NETO, F. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CALDAS, A. M. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.91, n.4, 2019.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.4, n.3, p.23-28, 1999.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos**. 2.ed. rev. e amp. – Curitiba: C. L. Prevedello, 2015. 474 p.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, 2020.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, v. 116, p.61-76, 2003.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed.). **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., 2010, p. 241-281.

SILVA, M. L. N.; LIBARDI, P. L.; GIMENES, F. H. S. Soil water retention curve as affected by sample height. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.42, p.1-13, 2018.

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; BORBA, J. O. M.; TAVARES, D. D.; AMARAL, A. J. do; MARTINS, A. F. Solos arenosos para Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n.5, p.581-589, 2018.

SISSON, J. B.; FERGUSSON, A. H.; van GENUCHTEN, M. Th. Simple method for predicting drainage from field plots. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.1147-1152, 1980.

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. 2017. **Soil survey manual**. C. DITZLER; K. SCHEFFE; H.C. MONGER (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.

SOUZA, J. L. M.; FEZER, K. F.; GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; PACHECHENIK, P. E.; EVANGELISTA, A. W. P. Atributos físicos e balanço hídrico do solo com Floresta Ombrófila Mista, em Latossolo Vermelho-Amarelo, em Telêmaco Borba - PR. **Ciência Florestal**, v.28, n.1, p.90-101, 2018.

SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERGER, E.; GURSKI, B. C.; OLIVEIRA, R. A. Adjustment of water-crop production models for ratoon sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, n.4, p.426-433, 2015.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.12, p.1301-1309, 2013.

TORRES, L. C.; KELLER, T.; LIMA, R. P.; TORMENA, C. A.; LIMA, H. V.; GIAROLA, N. F. B. Impacts of soil type and crop species on permanent wilting of plants. **Geoderma**, v. 384, 2021.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

WIECHETECK, L. H.; GIAROLA, N. F. B.; LIMA, R. P.; TORMENA, C. A.; TORRES, L. C.; PAULA, A. L. Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (-15,000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures. **Agricultural Water Management**, v. 230, 2020.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.63, n.11, p.1309-1313, 1982.

YOUNGS, E. G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. cap. 4, p.161-207.

3 CAPÍTULO III – TEMPERATURA BASAL INFERIOR PARA O DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CLIMA SUBTROPICAL

3.1 RESUMO

O presente estudo teve por objetivo estimar a temperatura basal inferior (T_b) para o desenvolvimento da cana-de-açúcar em clima subtropical da região Noroeste do Paraná, mediante avaliação dos erros estatísticos na sua mensuração com o modelo linear. Os dados observados de massa fresca (MF ; $g\ m^{-2}$) da parte aérea da cana-de-açúcar foram provenientes de experimento realizado na área da Estação Experimental da RIDESA (20/04/2016 a 10/05/2017). A MF das variedades RB036066, RB867515 e RB966928 foram avaliadas aos 120, 156, 194, 232, 288, 324 e 385 dias após plantio (DAP). O ciclo da cana-de-açúcar foi dividido em três fases de desenvolvimento: Primeira – perfilhamento entre 120-156 DAP ; Segunda – crescimento dos colmos entre 156-288 DAP ; e, Terceira – maturação dos colmos entre 288-385 DAP . A estimativa da T_b foi realizada com o ajuste do modelo linear, tendo a MF em função da soma térmica acumulada. A avaliação dos ajustes dos modelos lineares foi realizada considerando a magnitude dos erros estatísticos. A T_b das três variedades de cana-de-açúcar variou entre $20,5 \leq T_b \leq 23,0$ °C na Segunda Fase de desenvolvimento. Na Terceira Fase de desenvolvimento, a T_b foi de 15,5 e 15,0 °C para as variedades RB036066 e RB966928, respectivamente, e o modelo linear não foi significativo para RB867515.

Palavras-chave: Massa fresca, modelo linear, fator climático, tempo térmico.

3.2 ABSTRACT

The present study aimed to estimate the lower basal temperature (T_b) for the development of sugarcane in a subtropical climate in northwestern Paraná, through the evaluation of statistical errors in their measurement with the linear model. The observed data of fresh mass (FM ; g m^{-2}) of the aerial part of sugarcane came from an experiment conducted in the area of the Experimental Station of RIDESA (04/20/2016 to 05/10/2017). The FM of the varieties RB036066, RB867515 and RB966928 were evaluated at 120, 156, 194, 232, 288, 324 and 385 days after planting (DAP). The sugarcane cycle was divided into three development phases: First - tillering between 120-156 DAP ; Second - cane growth between 156-288 DAP ; and Third - cane maturation between 288-385 DAP . T_b was estimated by fitting the linear model: FM as a function of the accumulated heat sum. The evaluation of the linear model fits was performed considering the magnitude of the statistical errors. The T_b of the three sugarcane varieties ranged between $20.5 \leq T_b \leq 23,0$ °C in the Second Phase of development. In the Third Phase of development, T_b was 15.5 and 15.0 °C for the varieties RB036066 and RB966928, respectively, and the linear model was not significant for RB867515.

Keywords: Fresh mass, linear model, climatic factor, thermal time.

3.3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. No agronegócio brasileiro, a cana-de-açúcar possui grande potencialidade para produção de etanol e subprodutos, destacando-se no setor de biocombustíveis. A estimativa de produção da cultura para a safra 2021/22 é de 628,1 milhões de toneladas (CONAB, 2021).

A cana-de-açúcar é uma cultura semi perene e o seu desenvolvimento é influenciado pelas condições meteorológicas ocorridas durante todo ciclo. A produtividade agrícola pode ser alterada devido a fatores como variedade escolhida, estágio de maturação, manejo da cultura e características do solo e clima da região (Manhães et al., 2015).

Doorenbos e Kassam (1994) consideram que a cana-de-açúcar para crescer e desenvolver necessita de estação longa e quente, com umidade do ar adequada e alta incidência de radiação solar. E para maturação, a cultura precisa de um período levemente frio e seco.

A temperatura do ar é relevante para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo observado por Guerra et al. (2014) redução na eficiência fotossintética, altura das plantas, massa seca e diâmetro do colmo em plantas submetidas a temperaturas baixas (19 °C diurna e 13 °C noturna) na fase inicial de crescimento da planta.

Valores abaixo da temperatura basal de uma cultura proporcionam desenvolvimento desprezível. A temperatura basal inferior influencia no desenvolvimento e crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, sendo relatados valores divergentes entre 7 a 21 °C na literatura (Inman-Bamber, 1994; Sinclair et al., 2004; Cardozo, 2012; Morais, 2015; Amaral et al., 2019). A temperatura basal difere entre genótipos, estádios de desenvolvimento e ciclo de cana planta e cana soca (Slafer e Rawson, 1995; Morais, 2015), evidenciando a importância de determinar a temperatura basal de variedades da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas de cada região produtora brasileira.

A temperatura basal pode ser estimada com métodos estatísticos, mediante dados observados da cultura, durante as fases fenológicas e temperatura média do ar. Os principais métodos são: desvio padrão (*DP*; dias e graus-dia); coeficiente de variação (*CV*; dias e graus-dia); coeficiente de regressão (*CR*; adimensional);

desenvolvimento relativo (*DeR*; adimensional); menor quadrado médio do erro (*QME*; unidade da variável explicada); e metodologias modificadas (Yang et al., 1995; Sinclair et al., 2004; Souza e Martins, 2014; Martins et al., 2019; Schwerz et al., 2019). Os valores da temperatura basal diferem conforme a metodologia adotada para sua estimativa (Souza e Martins, 2014; Martins et al., 2019), evidenciando a necessidade de pesquisas quanto a inovação metodológica para estimar a temperatura basal.

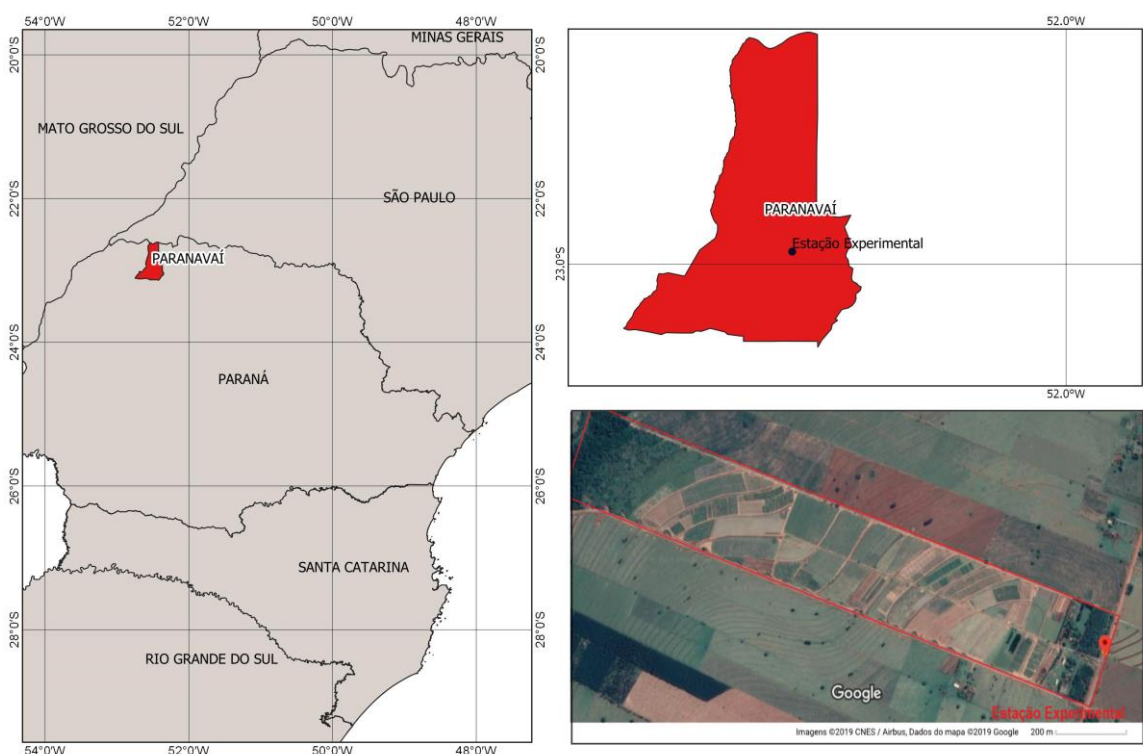
O conhecimento da temperatura basal nas condições de campo é indispensável para entender, prever mudanças e subsidiar a seleção de genótipos, implantação e condução da lavoura. Conforme contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente trabalho estimar a temperatura basal da cana-de-açúcar em clima subtropical da região Noroeste do Paraná, mediante avaliação dos erros estatísticos na mensuração da *Tb* com o modelo linear.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Caracterização do local de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/SCA/UFPR. As análises foram realizadas com amostras de solo retiradas da Estação Experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA), pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR) e integrante da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento Sucroenergético (RIDESA). O solo da Estação Experimental de Paranavaí é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2018). A PMGCA está localizada à 22° 58' Sul de latitude, 52° 28' Oeste de longitude e 470 m de altitude média, no Município de Paranavaí, região Noroeste do Estado do Paraná (FIGURA 3.1). O clima da região, conforme classificação de Köppen é *Cfa* (clima subtropical), apresenta média anual da temperatura do ar entre 22,1 e 23,0 °C, e precipitação média anual entre 1400 e 1600 mm (Nitsche et al., 2019).

FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROGRAMA DE MELHORAMENTO GENÉTICO DE CANA-DE-AÇÚCAR (PMGCA), PERTENCENTE À UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR) E INTEGRANTE DA REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUCROENERGÉTICO (RIDESA).



FONTE: a Autora (2022), adaptado do IBGE (2018) e Google Maps (2019).

3.4.2 Experimento para o cultivo e levantamento de dados da cana-de-açúcar

No plantio da cana-de-açúcar na área experimental realizou-se a distribuição de seis toletes com três gemas cada, no total de 18 gemas por metro, na profundidade de 0,10 m. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas no tempo e quatro repetições. As parcelas experimentais foram compostas por seis linhas, com 31 m de comprimento e 1,5 m de espaçamento entre linhas. As avaliações foram realizadas nas quatro linhas centrais.

A massa fresca (MF ; $g\ m^{-2}$) da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), das variedades RB036066, RB867515 e RB966928 foram avaliadas aos 120, 156, 194, 232, 288, 324 e 385 dias após plantio (DAP), em ciclo de cana planta. O plantio foi realizado em 20 de abril de 2016 e o corte realizado em 29 de junho de 2017. As amostras foram compostas pela parte aérea total da planta, em coleta de 1 m na

parcela experimental. Para determinação da *MF* (TABELA 3.1) as amostras foram divididas aleatoriamente em subamostras com cinco colmos e pesadas.

TABELA 3.1 – MASSA FRESCA (*MF*; g m⁻²) DA CANA-DE-AÇÚCAR, EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, SAFRA 2016/2017.

Variedades	----- Anos, datas e dias após o plantio (<i>DAP</i>) -----							
	----- 2016 -----					----- 2017 -----		
	20/04 0	18/08 120	21/09 156	31/10 194	08/12 232	01/02 288	10/03 324	10/05 385
	----- Massa fresca (<i>MF</i> , g m ⁻²) -----							
RB036066	0,0	266,5	371,8	926,5	2671,8	4223,0	5605,0	7163,3
RB867515	0,0	210,0	356,8	1198,3	1728,3	5317,0	6130,0	5358,5
RB966928	0,0	160,0	475,0	1381,5	2881,5	5845,0	7109,0	8558,0

Fonte: Araújo (2019).

Conforme Araújo (2019) o ciclo da cana-de-açúcar foi dividido em três fases de desenvolvimento: perfilhamento (120 a 156 *DAP*); crescimento dos colmos (156 a 288 *DAP*); e, maturação dos colmos (288 a 385 *DAP*).

3.4.3 Dados e análises realizadas com a temperatura do ar

Os dados meteorológicos utilizados foram provenientes do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR), estação meteorológica de Paranaíba – PR, no período de 2016-2017.

Para analisar a distribuição da temperatura média do ar (*T*; °C), durante as fases de desenvolvimento da cultura, determinou-se a frequência relativa (%) com a fórmula de Sturges (Sturges, 1926).

A temperatura basal inferior (*T_b*) da cana-de-açúcar foi estimada com o método da Regressão Linear, realizando-se a associação entre a massa fresca (*MF*; g m⁻²) em relação a soma térmica acumulada (*STa*; °C), com os dados medidos na Segunda e Terceira Fases de desenvolvimento (Sinclair et al., 2004; Schwerz et al., 2019).

A soma térmica diária (*STd*; °C) e acumulada (*STa*; °C dia) foram determinadas conforme Ometto (1981), recomendado por Renato et al. (2013):

$$STa = \sum_{i=1}^n STd_i$$

Condições para realizar a contabilização da STa :

Se, $TB > TM > Tm > Tb$

$$STd_i = \frac{TM - Tb}{2} + Tm - Tb$$

Senão se, $TB > TM > Tb > Tm$

$$STd_i = \frac{(TM - Tb)^2}{2 \cdot (TM - Tm)}$$

Senão se, $TB > Tb > TM > Tm$

$$STd_i = 0$$

Senão se, $TM > TB > Tm > Tb$

$$STd_i = \frac{2 \cdot (TM - Tm) \cdot (Tm - Tb) + (TM - Tm)^2 - (TM - TB)}{2 \cdot (TM - Tm)}$$

Então, $TM > TB > Tb > Tm$

$$STd_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{(TM - Tb)^2 - (TM - TB)^2}{TM - Tm}$$

Sendo: STa – soma térmica acumulada no período (°C); STd_i – soma térmica do i -ésimo dia (°C); TB – temperatura basal superior da cana-de-açúcar (considerou-se $TB = 35,0$ °C, conforme Pereira et al., 2015); TM – temperatura máxima do ar do i -ésimo dia (°C); Tm – temperatura mínima do ar do i -ésimo dia (°C); Tb – temperatura basal inferior da cana-de-açúcar na fase considerada (°C); n – número de dias.

– Modelo Linear

A soma térmica (STa) foi utilizada para identificar a influência da T nas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. A Tb resultou de associações lineares entre a “ MF vs STa ”. No cálculo da STd_i simulou-se valores de Tb de 0,0 °C até 23,0 °C, com intervalos de 0,5 °C. Selecionou-se a Tb que correspondeu ao melhor ajuste do modelo linear.

– Modelo Logístico

O modelo Logístico foi utilizado para verificar a tendência e ajuste da MF (g m⁻²) em função da temperatura média do ar acumulada (Ta ; °C), durante o ciclo da cana-de-açúcar.

$$MF = \frac{A}{1 + \exp\left(\frac{T_f - Ta}{E}\right)}$$

Sendo: MF – massa fresca de cana-de-açúcar (g m^{-2}); A – parâmetro numérico representando a assíntota da curva ajustada (g m^{-2}); T_f – parâmetro numérico que representa o valor T no ponto de inflexão da curva ($^{\circ}\text{C}$); Ta – temperatura média do ar acumulada ($^{\circ}\text{C}$); E – parâmetro de escala numérica no eixo de entrada ($^{\circ}\text{C}$).

3.4.4 Análises estatísticas

A avaliação dos ajustes dos modelos Lineares foi realizada mediante a magnitude dos erros estatísticos. Os erros estatísticos entre os valores observados (MF) e estimados (\widehat{MF}_i) foram quantificados com as seguintes expressões (Mangiafico, 2016):

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{MF}_i - MF_i)^2}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{MF}_i - MF_i)^2}{n}}$$

$$NRMSE_{média} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{MF}_i - MF_i)^2}{n}}}{\overline{MF}}$$

$$NRMSE_{mediana} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{MF}_i - MF_i)^2}{n}}}{MF_{mediana}}$$

Sendo: MSE – Erro quadrático médio ($\text{g}^2 \text{m}^{-4}$); $RMSE$ – Raiz quadrada do erro quadrado médio (g m^{-2}); $NRMSE_{média}$ – Raiz quadrada do erro médio quadrático normalizada pela média (adimensional); $NRMSE_{mediana}$ – Raiz quadrada do erro médio quadrático normalizada pela mediana (adimensional); \widehat{MF}_i – i -ésima MF estimada (g m^{-2}); MF_i – i -ésima MF observada (g m^{-2}); n – número de dados de MF observada (unidades); \overline{MF} – média da MF observada (g m^{-2}); $MF_{mediana}$ – mediana da MF observada (g m^{-2}).

Na interpretação dos erros MSE , $RMSE$, $NRMSE_{média}$ e $NRMSE_{mediana}$ valores iguais ou próximos a zero indicam um ajuste perfeito aos dados (Mangiafico, 2016).

O desempenho estatístico do modelo Logístico foi avaliado mediante análise da significância dos parâmetros do modelo a 5% de probabilidade, com o teste t , e considerando a magnitude dos erros estatísticos.

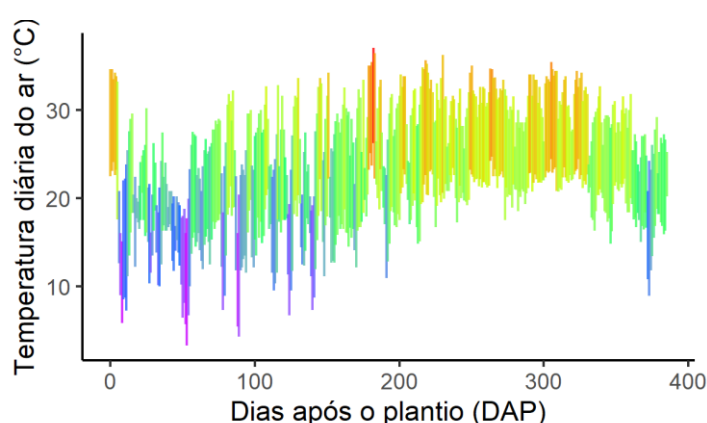
As análises estatísticas foram realizadas com o *software* R (versão 4.0.0; R Core Team, 2020), sendo utilizado os pacotes *fdth*, *rcompanion* e *hydroGOF* para realizar a distribuição de frequência e determinar os erros estatísticos (Zambrano-Bigiarini, 2017; Mangiafico, 2020; Faria et al., 2020).

3.5 RESULTADO E DISCUSSÃO

3.5.1 Temperatura e frequência de sua ocorrência nas fases da cana-de-açúcar

A tendência diária da temperatura do ar durante o período experimental está apresentada na FIGURA 3.2. As temperaturas máximas do ar apresentaram maiores variações durante a Primeira Fase de desenvolvimento (0 a 156 *DAP*) da cultura, oscilando entre 15,1 e 34,6 °C. Em relação a temperatura mínima, a maior variação foi observada também na Primeira Fase, entre 3,3 e 24,1 °C.

FIGURA 3.2 – TEMPERATURAS MÁXIMA, MÍNIMA E MÉDIA DIÁRIA DO AR (T , °C), DURANTE OS DIAS APÓS O PLANTIO (*DAP*) DA CANA-DE-AÇÚCAR, EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, SAFRA 2016/2017.



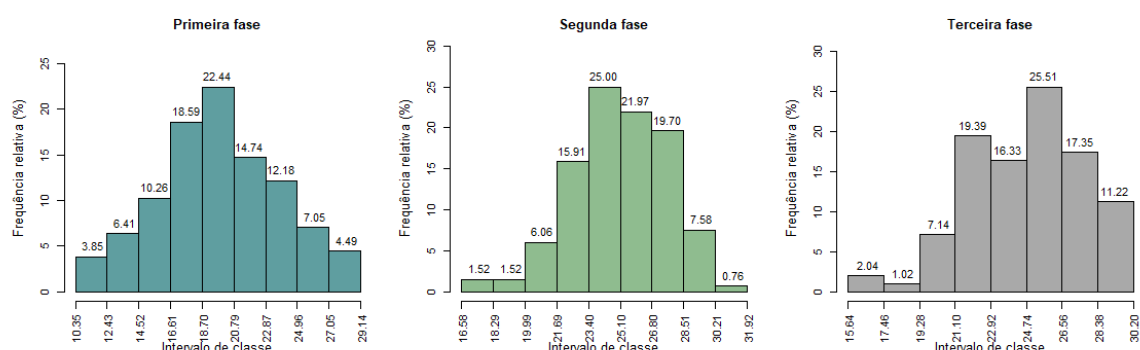
FONTE: a Autora (2022).

Na Segunda Fase de desenvolvimento da cultura, as temperaturas máximas do ar foram superiores a T_b de 35 °C aos 181, 182, 183, 218, 219 e 230 *DAP*, e

iguais a *T_b* aos 179, 180 e 250 *DAP*. Apenas no 305 *DAP* a temperatura máxima do ar foi maior que a *T_b* na Terceira Fase de desenvolvimento da cultura.

Na Primeira Fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar (FIGURA 3.3) observou-se frequência relativa de 55,77% entre $16,61 \leq T \leq 22,87$ °C. Verificou-se grande amplitude térmica (18,40 °C), que na Fase Inicial ocorreu a brotação, estabelecimento e perfilhamento da cana-de-açúcar.

FIGURA 3.3 – FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DA TEMPERATURA MÉDIA DO AR (*T*, °C), NAS FASES DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR, EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, SAFRA 2016/2017.



FONTE: a Autora (2022).

Na Segunda Fase de desenvolvimento (156 a 288 *DAP*) verificou-se aumento nas *T*, ocorrendo frequência relativa de 62,88% entre $21,69 \leq T \leq 26,80$ °C. As maiores variações de *T* ocorreram no início da fase, até 207 *DAP* (13/11/2016).

Observou-se frequência relativa de 61,23% entre $21,10 \leq T \leq 26,56$ °C na Terceira Fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar (288 a 385 *DAP*). A *T* reduziu depois dos 361 *DAP* (16/04/2017), condição térmica favorável para acúmulo de sacarose (Scarpari e Beauclair, 2009; Araújo, 2019).

3.5.2 Ajustes dos modelos Linear e Logístico

a) Ajustes com o modelo Linear

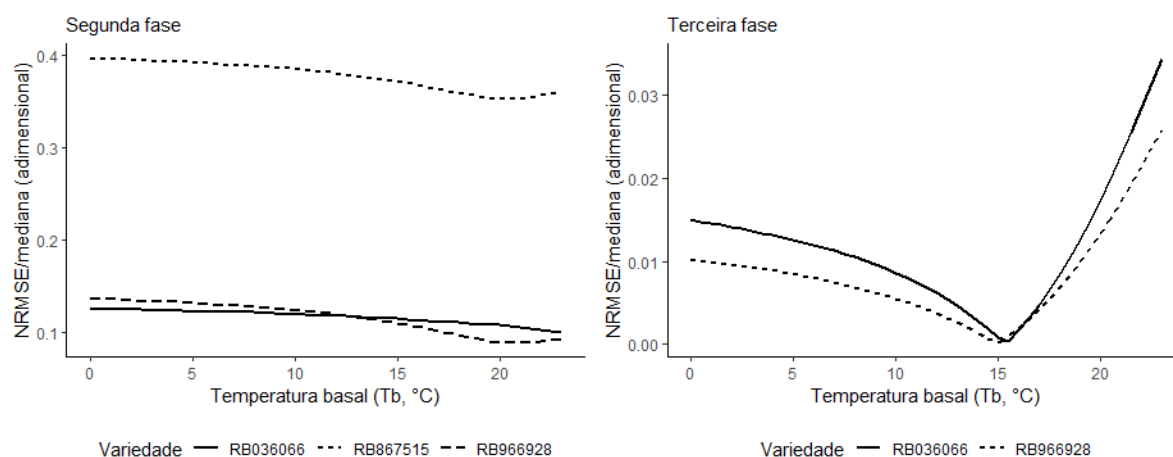
Os erros estatísticos, R^2 e *p*-valor dos ajustes dos modelos Lineares encontram-se no APÊNDICE 2.

Ajustando-se o modelo Linear à massa fresca (MF ; $g\ m^{-2}$) e soma térmica acumulada (STa ; $^{\circ}C$) verificou-se que a temperatura basal variou ($20,5 \leq T_b \leq 23,0$ $^{\circ}C$) entre as variedades de cana-de-açúcar analisadas, na Segunda Fase de desenvolvimento (TABELA 3.2; FIGURA 3.4). A cana-de-açúcar para expressar seu potencial de crescimento dos colmos na Segunda Fase tem como exigência a temperatura média diurna entre 22,0 e 30,0 $^{\circ}C$ (Doorenbos e Kassam, 1994). Nas análises observou-se frequência relativa de 90,16% entre $21,69 \leq T \leq 30,21$ $^{\circ}C$.

TABELA 3.2 – TEMPERATURA BASAL (T_b ; $^{\circ}C$) E AJUSTES COM O MODELO LINEAR (R^2 e p -valor), NA SEGUNDA E TERCEIRA FASE DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.

Descrição	Variedades	T_b $^{\circ}C$	R^2 (ad.)	p -valor (ad.)
Segunda Fase	RB036066	23,0	0,9860	0,0070
	RB867515	20,5	0,9259	0,0378
	RB966928	21,0	0,9914	0,0043
Terceira Fase	RB036066	15,5	1,0000	0,0012
	RB867515	—	—	—
	RB966928	15,0	1,0000	0,0007

FIGURA 3.4 – RAIZ QUADRADA DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO NORMALIZADA PELA MEDIANA ($NRMSE_{mediana}$) PARA ESTIMATIVA DA TEMPERATURA BASAL (T_b , $^{\circ}C$), NAS FASES DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, SAFRA 2016/2017.



FONTE: a Autora (2022).

A magnitude dos erros estatísticos possibilita verificar como o modelo ajustou-se aos dados observados. O $NRMSE_{mediana}$ com baixa magnitude indica melhor ajuste, sendo perfeito quando igual a zero (Mangiafico, 2016). Na estimativa da T_b com a variedade RB867515 observou-se maiores $NRMSE_{mediana}$ na Segunda Fase de desenvolvimento (FIGURA 3.4).

No ajuste com a *MF* das variedades RB036066 e RB966928 na Terceira Fase de desenvolvimento, estimou-se *Tb* de 15,5 e 15,0 °C, respectivamente, bem como verificou-se frequência relativa de 2,04% entre $15,64 \leq T \leq 17,46$ °C. Na Terceira Fase de desenvolvimento ocorre a maturação da cana-de-açúcar, e a faixa ideal de temperatura está entre 10 e 20° C (Scarpari e Beauclair, 2009). As principais variáveis envolvidas no processo são a umidade do solo e temperatura do ar (Cardozo e Sentelhas, 2013). Segundo Scarpari e Beauclair (2004; 2009) temperaturas menores que 20 °C diminuem o crescimento e aumentam o acúmulo de sacarose. No presente trabalho, constatou-se redução da *MF* na variedade RB867515, mas as condições meteorológicas favoreceram o acúmulo de toneladas de açúcar por hectare (*TAH*; t ha⁻¹; Araújo, 2019). O modelo Linear não apresentou ajuste significativo para a variedade RB867515.

Morais (2015) encontrou *Tb* entre 7,5 e 12,8 °C com o método do “Desenvolvimento Relativo” (*DeR*), durante o desenvolvimento foliar de oito genótipos de cana-de-açúcar em cultivo cana planta, plantada em setembro. A variedade RB867515 teve *Tb* estimada de 10,2 e 8,9 °C em Jaguari-RS e Santa Maria-RS, respectivamente. As variações entre as estimativas foram atribuídas à época de plantio, condições meteorológicas e método, distintos para mensurar a *Tb*. Os resultados indicaram a importância de determinar a *Tb* nas condições edafoclimáticas que a planta é cultivada, para permitir a seleção dos genótipos promissores para região com maior confiabilidade, confirmando com Morais (2015).

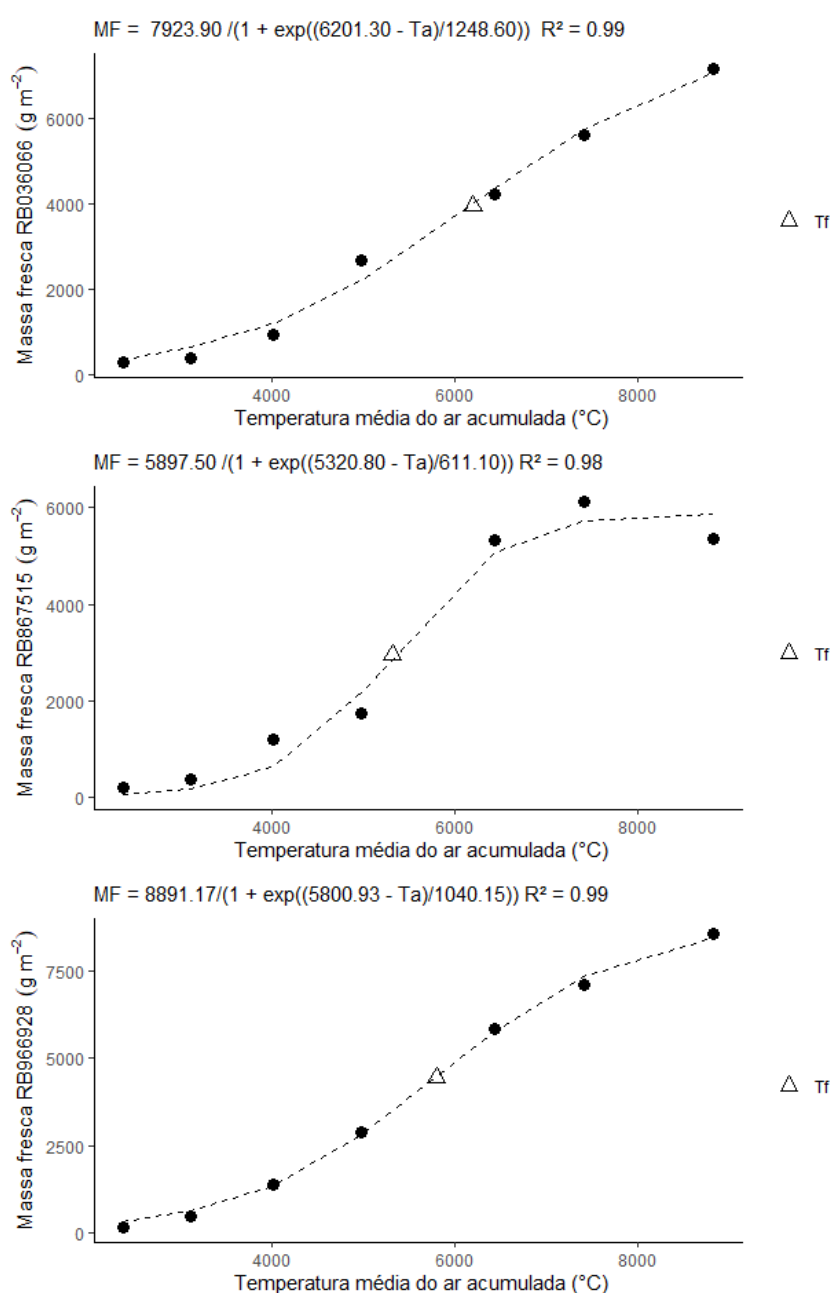
Souza e Martins (2014) encontraram diferenças entre as *Tb* estimadas para cultivares de oliveira, utilizando métodos distintos. O valor de *Tb* final foi obtido realizando-se a média aritmética das *Tb* encontradas com os métodos desvio padrão (*DP*; dias e graus-dia), coeficiente de variação (*CV*; dias e graus-dia), coeficiente de regressão (*CR*) e desenvolvimento relativo (*DeR*).

Os resultados obtidos no presente estudo indicam que é importante estimar a *Tb* nas condições de campo em que a cana-de-açúcar é cultivada. Os motivos são diversos, mas principalmente devido ao comportamento da planta às mudanças de temperatura, influenciando sua fisiologia e bioquímica.

b) Ajustes com o modelo Logístico

O modelo Logístico proporcionou ajustes estatísticos significativos ($p < 0,05$; FIGURA 3.5; APÊNDICE 3) e, de modo geral, apresentou elevados valores do coeficiente de determinação ($R^2 \geq 0,98$). Contudo, somente o R^2 não é indicado para avaliar ou selecionar modelos não-lineares.

FIGURA 3.5 – AJUSTE DO MODELO LOGÍSTICO PARA AS VARIEDADES RB036066, RB867515 E RB966928 DE CANA-DE-AÇÚCAR: “MASSA FRESCA (MF)” vs “TEMPERATURA MÉDIA DO AR ACUMULADA (T_a)”. SENDO: T_f – PARÂMETRO NUMÉRICO QUE REPRESENTA O VALOR T NO PONTO DE INFLEXÃO DA CURVA ($^{\circ}\text{C}$).



FONTE: a Autora (2022).

O conhecimento das curvas de crescimento da cana-de-açúcar (em MF ; considerando a Ta) permite realizar manejo mais adequado da cultura, bem como identificar o período de maior exigência térmica. Com o modelo Logístico, no intervalo de crescimento da cultura até o ponto de inflexão (T_f), verificou-se maior MF a cada grau Celsius adicional. Assim, a máxima taxa de crescimento (T_f) ocorreu durante a Segunda Fase de desenvolvimento (TABELA 3.3). Observou-se que os valores de DAP correspondente ao T_f coincidiram com o período de maiores T , nos meses de outubro a março (164 a 345 DAP ; FIGURA 3.3), bem como o maior acúmulo de MF (Araújo, 2019). Devido a maior exigência térmica da cultura na Segunda Fase, a Tb é maior que na Terceira Fase de desenvolvimento. Nas análises realizadas verificou-se que a temperatura média do ar teve efeito na duração do desenvolvimento da planta e relacionou-se diretamente com o processo de crescimento e maturação da cana-de-açúcar (Slafer e Rawson, 1995; Cardozo e Sentelhas, 2013).

TABELA 3.3 – PONTO DE INFLEXÃO (T_f) DO AJUSTE ENTRE OS VALORES CORRESPONDENTES DE MASSA FRESCA (MF) DA CANA-DE-AÇÚCAR E DIAS APÓS O PLANTIO (DAP), UTILIZANDO O MODELO LOGÍSTICO.

Variedades	----- Massa fresca (MF ; g m ⁻²) -----		
	T_f ⁽¹⁾ (°C)	DAP (dias)	Fase
RB036066	6201,30	279	Segunda
RB867515	5320,80	246	Segunda
RB966928	5800,93	264	Segunda

T_f – parâmetro numérico que representa o valor T no ponto de inflexão da curva (°C).

A variedade RB867515 obteve os maiores erros com o ajuste do modelo Logístico durante o ciclo da cana-de-açúcar (TABELA 3.4), confirmando o resultado da estimativa da Tb com o modelo Linear.

TABELA 3.4 – ERRO ESTATÍSTICO ENTRE O AJUSTE DA MASSA FRESCA (MF) DA CANA-DE-AÇÚCAR E DIAS APÓS O PLANTIO (DAP) CORRESPONDENTE, COM O MODELO LOGÍSTICO.

Variedades	$RMSE$ (g m ⁻²)	$NRMSE_{média}$ (adimensional)	$NRMSE_{mediana}$ (adimensional)
RB036066	245,41	0,0809	0,0919
RB867515	393,70	0,1360	0,2280
RB966928	137,57	0,0365	0,0477

3.6 CONCLUSÕES

- A temperatura basal (T_b) estimada com a MF variou entre $20,5 \leq T_b \leq 23,0$ °C para as variedades da cana-de-açúcar testadas, na Segunda Fase de desenvolvimento.
- Na Terceira Fase de desenvolvimento, a temperatura basal estimada com a MF foi de 15,5 e 15,0 °C para as variedades RB036066 e RB966928, respectivamente. O modelo linear não obteve ajuste significativo para a variedade RB867515.

3.7 REFERÊNCIAS

- AMARAL, M. A. C. M.; COELHO, R. D.; VIEIRA JOSÉ, J.; OLIVERIRA, A. S. Temperatura base e taxa de crescimento de oito variedades de cana-de-açúcar. **Revista GEAMA**, v.5, n.1, p.21-29, 2019.
- ARAÚJO, R. M. **Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar na região sul do Brasil**. 101 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – (Produção Vegetal), Curitiba, 2019.
- CARDOZO, N. P. **Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas**. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.
- CARDOZO, N. P., SENTELHAS, P. C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, v.70, n.6, p.449-456, 2013.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v.8, Safra 2021/22, n.1 – Primeiro levantamento, Brasília, p.1-56, 2021.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306 p. FAO. **Irrigação e Drenagem**, 33.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.
- FARIA, J. C.; JELIHOVSCHI, E. G.; ALLAMAN, I. B. **fdth: Frequency Distribution Tables, Histograms and Polygons**. UESC, Bahia, Brasil, 2020.
- Google Maps**. Google. 2019. “Estação Experimental da UFPR”. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.9762068,-52.4722051,971m/data=!3m1!1e3>>.

GUERRA, A.; BARBOSA, A. M.; GUIDORIZI, K. A.; SOUZA, G. M. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. **Revista Agrarian**, v.7, n.24, p.211-217, 2014.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha territoriais do Brasil, 2018.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>>.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v.36, n.1, p. 41-51, 1994.

MANGIAFICO, S. S. **rcompanion: Functions to Support Extension Education Program Evaluation.** R package version 2.3.25. <https://CRAN.R-project.org/package=rcompanion>, 2020.

MANGIAFICO, S. S. **Summary and Analysis of Extension Program Evaluation in R, version 1.18.1.** <https://rcompanion.org/handbook/>. 2016.

MANHÃES, C. M. C; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, p.163-181, 2015.

MARTINS, F. B.; FERREIRA, M. C.; SILVA, L. F. O.; RAMALHO, V. R. M.; GONÇALVES, E. D. Temperatura do ar no desenvolvimento reprodutivo de cultivares de Oliveira, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.34, n.2, p.179-190, 2019.

MORAIS, K. P. **Determinação da temperatura base, desempenho agrônômico e correlação de componentes de rendimento em genótipos de cana-de-açúcar.** 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2015.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná.** Londrina, PR: IAPAR, 2019.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

PEREIRA, J. A.; AGOSTINHO, E.; ISLER, P. R. Método de graus-dias para estimar o desenvolvimento da cana-de-açúcar. In: **Anais do I Simpósio Interdisciplinar de Tecnologias na Educação – IFSP Campus de Boituva**, p.217-224, 2015.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, 2020.

RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.4, 382-388, 2013.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, v.61, n.5, p.486-491, 2004.

SCHWERZ, F.; ELOY, E.; ELLI, E. F.; CARON, B. O.; PAULA, G. M. Temperatura e radiação solar na produção de mudas de cedro australiano. **Scientia Forestalis**, v.7, n.124, p.733-743, 2019.

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE JR., J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, p.171-178, 2004.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Base and optimum temperatures vary with genotype and stage of development in wheat. **Plant, Cell and Environment**, v.18, p.671-679, 1995.

SOUZA, P. M. B.; MARTINS, F. B. Estimativa da temperatura basal inferior para as cultivares de oliveira Grappolo e Maria da Fé. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.2, p.307-313, 2014.

STURGES, H. The choice of a class-interval. **Journal of the American Statistical Association**, v.21, p.65-66, 1926.

YANG, S.; LOGAN, J.; COFFEY, D. L. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.74, p.61-74, 1995.

ZAMBRANO-BIGIARINI, M. **hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series R package version 0.3-10**. <http://hzambran.github.io/hydrogof/>, 2017.

4 CAPÍTULO IV – MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DE PARANAÍ - PR

4.1 RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial da cana-de-açúcar e a modelagem do desenvolvimento radicular da cultura é fundamental para entender, prever mudanças e subsidiar a implantação e condução da lavoura, com o uso eficiente dos recursos ambientais disponíveis. Teve-se por objetivo na realização do presente trabalho parametrizar e ajustar modelos de estimativa da densidade de comprimento radicular e profundidade efetiva da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas da região Noroeste do Paraná. Os dados observados de desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar foram provenientes de experimentos realizados na área da Estação Experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar, da Universidade Federal do Paraná, integrante da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, e os tratamentos representados pelas variedades (RB72454, RB855536 e RB855113) em cana planta, em plantio realizado no dia 04/03/2002. Para a análise destrutiva das raízes da cana-de-açúcar, os tratamentos foram arranjados em parcelas subdivididas, sendo: três parcelas (variedades), três subparcelas (camadas de solo) e cinco repetições. O sistema radicular foi avaliado aos 84, 135, 182, 231, 279, 377 e 428 dias após plantio (*DAP*). A profundidade efetiva do sistema radicular das variedades RB036152 e RB867515 foram avaliadas aos 150, 263 e 385 *DAP* (plantio realizado 30/05/2011). Utilizou-se o modelo exponencial na parametrização da densidade de comprimento radicular em relação às camadas de solo. Os modelos de estimativa da profundidade efetiva basearam-se em dias após plantio (*DAP*), dias julianos (*J*) e graus-dia acumulado (*GDA*). Utilizou-se o modelo AquaCrop e logístico na parametrização e validação da profundidade efetiva radicular em relação aos *DAP*. Realizou-se análise de regressão linear múltipla (método *Stepwise*) entre a profundidade efetiva radicular e as variáveis meteorológicas e o armazenamento de água no solo. A densidade de comprimento radicular e o volume radicular da cana-de-açúcar são maiores na camada 0-0,20 m. As raízes finas estão distribuídas em profundidade. Os modelos ajustados à profundidade efetiva que consideram os dias após plantio (*DAP*), dias julianos (*J*) e graus-dia acumulado (*GDA*) não foram satisfatórios. O modelo logístico foi bom para estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar nos dias após o plantio (*DAP*). A regressão linear múltipla com as variáveis climáticas e o armazenamento de água no solo apresenta muito boa capacidade preditiva da profundidade efetiva radicular da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Densidade de comprimento radicular. Profundidade efetiva. Dias após plantio. Graus dia acumulado. Dias Julianos.

4.2 ABSTRACT

Brazil is the largest world producer of sugarcane and the modeling of the root development of the crop is essential to understand, predict changes and subsidize the implementation and conduction of the crop, with the efficient use of available environmental resources. The objective of the present work was to parameterize and adjust models for estimating the root length density and effective depth of sugarcane under the edaphoclimatic conditions of the Northwestern region of Paraná. The observed data on sugarcane root development came from experiments carried out in the Experimental Station of the Sugarcane Genetic Improvement Program of the Federal University of Paraná, a member of the Interuniversity Network for the Development of the Sugar and Energy Sector. The experimental design was randomized block, and the treatments represented the varieties (RB72454, RB855536 and RB855113) in plant cane, planted on March 4, 2002. For the destructive analysis of the sugarcane roots, the treatments were arranged in subdivided plots: three plots (varieties), three subplots (soil layers) and five repetitions. The root system was evaluated at 84, 135, 182, 231, 279, 377 and 428 days after planting (*DAP*). The effective depth of the root system of the varieties RB036152 and RB867515 were evaluated at 150, 263 and 385 *DAP* (planting performed May 30, 2011). The exponential model was used in the parameterization of the root length density in relation to the soil layers. The models for estimating the effective depth were based on days after planting (*DAP*), Julian days (*J*) and accumulated degree days (*GDA*). The model AquaCrop and logistic were used for parameterization and validation of effective root depth in relation to *DAP*. Multiple linear regression analysis (*Stepwise* method) was performed between root effective depth and meteorological variables and soil water storage. The root length density and root volume of sugarcane are highest in the 0-0.20 m layer. The fine roots are distributed in depth. The models fitted to the effective depth considering days after planting (*DAP*), Julian days (*J*) and accumulated degree days (*GDA*) were not satisfactory. The logistic model was good for estimating the effective depth of the sugarcane root system at days after planting (*DAP*). The multiple linear regression with the climatic variables and the soil water storage shows very good predictive capacity of the effective root depth of sugarcane.

Keywords: Root length density. Effective depth. Days after planting. Cumulative day degrees. Julian Days.

4.3 INTRODUÇÃO

O sistema radicular da cana-de-açúcar é importante para a regeneração das soqueiras depois da colheita, assim como influencia diretamente na eficiência de absorção dos nutrientes pela planta, resistência a seca e tolerância ao ataque de pragas do solo, afetando todo desenvolvimento das plantas (Aquino et al., 2015). A profundidade efetiva do sistema radicular (z) corresponde a 80% das raízes da planta e representa o volume de controle da água no sistema solo-planta, sendo fundamental para o manejo do solo e da cultura (Aquino et al., 2015; Gurski et al., 2016).

Buso et al. (2009), trabalhando com sistema de plantio em tolete na Estação Experimental de Paranavaí, encontraram maior concentração no crescimento das raízes em profundidade no final do ciclo, característica importante para tolerância em condições de restrição hídrica.

Ido et al. (2006) avaliando o crescimento e distribuição do sistema radicular da cana de primeira soca na Estação Experimental de Paranavaí, verificaram que o tipo de substrato (argiloso e arenoso) influenciou o crescimento radicular de três cultivares testados. Além das características do solo, o seu preparo também interferiu no desenvolvimento radicular. Moraes et al. (2019) encontraram maiores densidade de comprimento radicular (DR , cm raiz por cm^3 de solo) nos tratamentos que incluíram operações de aração e gradagem do solo.

A DR é um parâmetro padrão de distribuição e caracterização radicular (Chopart et al., 2008), utilizada para determinar a absorção de água pelas raízes em modelos de simulação de crescimento e produção da cana-de-açúcar (Marin e Jones, 2014; Inman-Bamber et al., 2016). A DR da cana-de-açúcar apresenta declínio exponencial com a camada de solo (Smith et al., 2005). Todavia, ainda não foi realizada a parametrização da DR da cana-de-açúcar durante o ciclo cana-planta nas condições edafoclimáticas da região de Paranavaí.

O desenvolvimento do sistema radicular da planta é influenciado por diversos fatores externos e internos, o que dificulta a sua avaliação. Assim, se faz necessário obter modelos matemáticos que consideram os fatores mais sensíveis para representar o fenômeno em estudo. A identificação desses fatores é imprescindível para simplificar o modelo. As estimativas obtidas com o modelo precisam aproximar-

se o máximo dos dados experimentais. Os modelos de estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular precisam considerar fatores variáveis ao longo do tempo, sem a necessidade de serem complexos (Gurski, 2014).

Os modelos do desenvolvimento do sistema radicular baseados nos dias após o plantio (*DAP*) ou dias julianos (*J*) apresentam aplicação mais local, e os que consideram os graus-dias acumulados (*GDA*) são universais, podendo ser utilizados em qualquer local ou região (Gurski et al., 2016).

A profundidade efetiva da raiz é um parâmetro em modelos hidrológicos e de produtividade (Yang et al., 2016; Raes et al., 2018). No modelo de produção água-cultura AquaCrop, a profundidade radicular é função da cultura e do tempo (dias ou graus-dia) em condição de solo bem irrigado (Raes et al., 2018). O crescimento e a distribuição das raízes são parâmetros relevantes para modelos de previsão de produção (Ohashi et al., 2015).

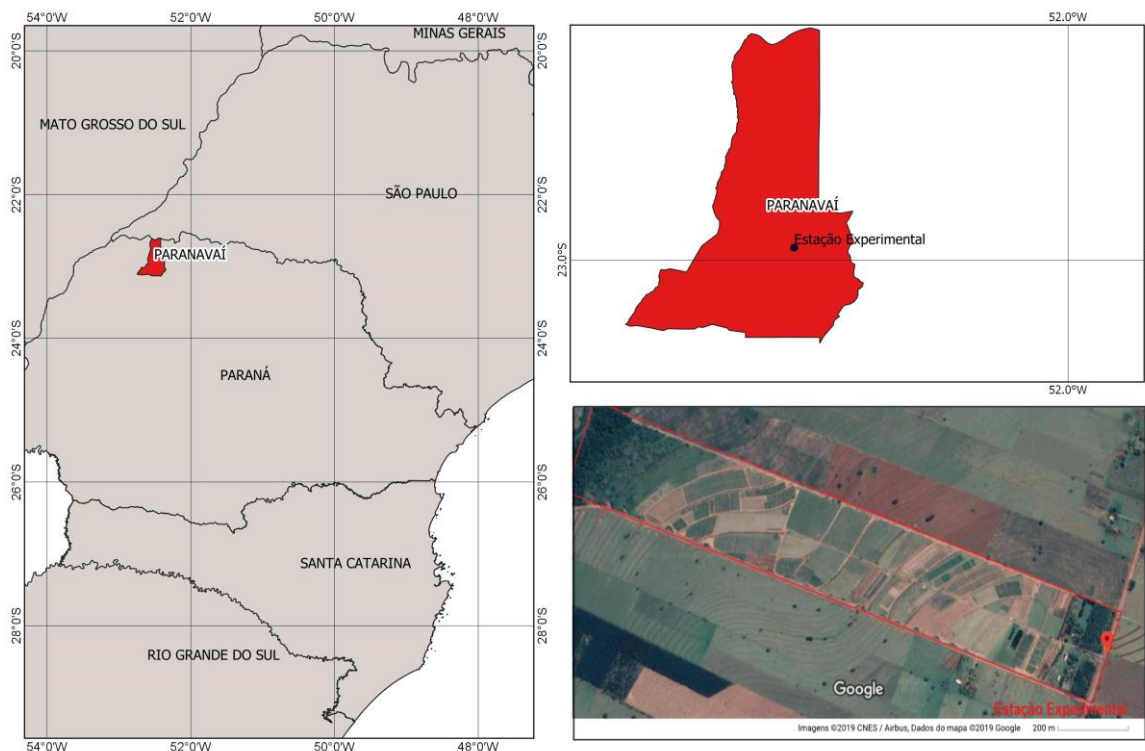
Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo na realização do presente trabalho parametrizar e ajustar modelos de estimativa da densidade de comprimento e profundidade efetiva radicular da cana-de-açúcar, nas condições edafoclimáticas da região Noroeste do Paraná.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Local de realização do trabalho

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/SCA/UFPR. As análises foram realizadas com os dados culturais de experimentos realizados na Estação Experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA), pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR) e integrante da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento Sucroenergético (RIDESA). A PMGCA está localizada à 22°58' Sul de latitude, 52°28' Oeste de longitude e 470 m de altitude média, no Município de Paranavaí, região Noroeste do Estado do Paraná (FIGURA 4.1). O clima da região segundo a classificação de Köppen é *Cfa* (clima subtropical), com temperatura média do ar anual entre 22,1 e 23,0 °C, e precipitação média anual entre 1400 e 1600 mm (Nitsche et al., 2019).

FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROGRAMA DE MELHORAMENTO GENÉTICO DE CANA-DE-AÇÚCAR (PMGCA), PERTENCENTE À UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR) E INTEGRANTE DA REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUCROENERGÉTICO (RIDESA).



FONTE: a Autora (2022), adaptado do IBGE (2018) e Google Maps (2019).

4.4.2 Dados agrometeorológicos

Os dados agrometeorológicos de radiação solar incidente (R_s , $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), precipitação pluvial (P , mm), temperatura média do ar (T_{med} , $^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (UR , %) e velocidade do vento (V , m s^{-1}) foram provenientes do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR), estação meteorológica de Paranavaí – PR, nos períodos entre 2002-2003 e 2011-2012. Os dados agrometeorológicos mensais foram comparados com as normais climatológicas de Paranavaí – PR (Nitsche et al., 2019).

4.4.3 Levantamento dos dados da cana-de-açúcar

Os valores observados do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, utilizados no ajuste dos modelos matemáticos testados (Item 4.4.6), foram obtidos

na área da Estação Experimental de Paranavaí, RIDESA, no período entre 2002 e 2003. Na parametrização e validação dos modelos AquaCrop e logístico e na análise de regressão linear múltipla (Itens 4.4.6.2; 4.4.6.3) foram utilizadas as profundidades efetivas do sistema radicular nos períodos 2002/2003 e 2011/2012.

As parcelas experimentais foram compostas por 12 linhas de 6 metros, com espaçamento de 1,40 metros entre linhas. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, e os tratamentos representados pelas variedades RB72454, RB855536 e RB855113 no ciclo cana planta, em plantio realizado no dia 04/03/2002 (Oliveira, 2004). Para a análise destrutiva das raízes da cana-de-açúcar, os tratamentos foram arranjados em parcelas subdividas, sendo: três parcelas (variedades), três subparcelas (camadas de solo) e cinco repetições.

O sistema radicular foi avaliado aos 84, 135, 182, 231, 279, 377 e 428 dias após plantio (*DAP*), sendo denominados DAP_{84} , DAP_{135} , DAP_{182} , DAP_{231} , DAP_{279} , DAP_{377} e DAP_{428} , respectivamente. As raízes foram coletadas em trincheiras (0,50 m de largura, 1,20 m de comprimento e 0,60 m de profundidade), em três camadas (0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m), sendo amostradas com cilindro volumétrico de 20 cm de altura, 4,5 cm de diâmetro interno e 0,5 cm de parede externa, tendo borda serrilhada e cortante em uma das extremidades (volume de 318 cm³). Posteriormente, as raízes foram lavadas e quantificadas no *software* analisador digital de imagens WinRHIZO (Regent Instruments, 2000), em que foram realizadas medidas da densidade de comprimento das raízes (*DR*, cm de raiz por cm³ de solo), diâmetro médio radicular (mm) e volume radicular (cm³). O diâmetro médio radicular foi classificado com análise de agrupamento utilizando a função *kmeans* do pacote *stats*, *software* R.

A profundidade efetiva do sistema radicular (*z*) das variedades RB036152 e RB867515 foram avaliadas nos DAP_{150} , DAP_{263} e DAP_{385} , com plantio realizado em 30/05/2011 (Civiero, 2014). O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com três repetições. As raízes foram coletadas em trincheiras, em três camadas (0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m), sendo amostradas com cilindro volumétrico de 6 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento, tendo borda serrilhada e cortante em uma das extremidades (volume de 565 cm³). As amostras contendo as raízes foram lavadas em água corrente, com auxílio de peneiras e acomodadas em potes plásticos com álcool a 50%, e encaminhadas ao Laboratório de Fitotecnia do

Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo da Universidade Federal do Paraná. Posteriormente, as raízes foram novamente lavadas e quantificadas no *software* analisador digital de imagens WinRHIZO (Civiero, 2014).

4.4.4 Características do solo

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura arenosa. O preparo do solo foi realizado com grade aradora e niveladora. Na TABELA 4.1 estão descritas as características químicas do solo do experimento 2002/2003, área de pousio por 10 anos. A adubação de base no sulco de plantio foi de 20 kg ha⁻¹ de N, 100 kg ha⁻¹ de K₂O e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Oliveira, 2004).

TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, 2002.

Camada (m)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ ----- (cmol _c dm ⁻³)	Ca ²⁺	K ⁺	T	P (mg dm ⁻³)	C (g dm ⁻³)	pH SMP	V (%)
0-0,20	4,70	0,20	2,70	0,90	0,65	0,07	3,67	6,80	7,50	6,80	26,43
0,20-0,40	4,70	0,50	2,40	1,03	0,83	0,02	3,45	7,60	6,30	7,00	30,43

Adaptado de Oliveira (2004).

O preparo do solo foi realizado com uma gradagem pesada e duas niveladoras, na área de pousio do experimento 2011/2012. A adubação foi equivalente a 0,075 kg do adubo mineral NPK (fórmula: 10-20-20), para cada metro (Civiero, 2014).

4.4.5 Modelo de estimativa da densidade de comprimento radicular

Os dados observados da densidade de comprimento radicular (*DR*) foram parametrizados com o modelo exponencial:

$$DR = A \cdot \exp(B \cdot Camada)$$

Sendo: *DR* – densidade de comprimento radicular (cm de raiz por cm³ de solo); *Camada* – camada do solo (m); *A* e *B* – parâmetros de ajuste do modelo exponencial (*A* em “cm de raiz por cm³ de solo”; e *B* em “m⁻¹”).

4.4.6 Modelos de estimativa da profundidade efetiva radicular

Os dados observados de profundidade efetiva do sistema radicular (z), safra 2002/2003, foram ajustados aos modelos:

– Modelo proposto por Schouwenars (1988):

$$z(DAP)_S = z_x \cdot \left(\frac{DAP_i}{DAP_T} \right)^{0,5}$$

– Modelo sigmoidal proposto por Dourado Neto e van Lier (1991):

$$z(GDA)_{DV} = z_0 + \left(\frac{z_x - z_0}{2} \right) \cdot \left[1 - \cos \left(\pi^{\frac{1}{f}} \frac{GDA_i}{0,7 \cdot GDA_T} \right)^f \right] \quad \text{para } GDA_i < 0,7 \cdot GDA_T$$

$$z(GDA)_{DV} = z_x \quad \text{para } GDA_i \geq 0,7 \cdot GDA_T$$

– Modelo proposto por Campbell e Diaz (1988):

$$z(J)_{CD} = z_0 + (z_x - z_0) \cdot \left(\frac{1}{1 + 44,2 \cdot \exp(-8,5 \cdot (J_i - J_0) / (J_f - J_0))} \right)$$

– Modelo utilizado no AquaCrop sem considerar efeito do estresse hídrico, conforme descrito por Raes et al. (2018):

$$z(DAP)_{AC} = z_0 + (z_x - z_0) \cdot \sqrt{\frac{\left(DAP_i - \frac{DAP_0}{2} \right)^f}{\left(DAP_x - \frac{DAP_0}{2} \right)^f}} \quad \text{para } z_n \leq z_i \leq z_x$$

Sendo: $z(DAP)_S$, $z(GDA)_{DV}$, $z(J)_{CD}$ e $z(DAP)_{AC}$ – profundidade efetiva do sistema radicular estimada com os modelos Schouwenars, Dourado Neto e van Lier, Campbell e Diaz e AquaCrop, respectivamente (m); z_x – profundidade efetiva máxima do sistema radicular (m); DAP_i – i -ésimo dia após o plantio (dia); DAP_T – total de dias após o plantio para completar o ciclo da cultura (dia); z_0 – profundidade inicial do sistema radicular (m); GDA_i – graus-dia acumulado até o i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); GDA_T – graus-dia acumulado total necessários para completar o ciclo da cultura ($^{\circ}\text{C}$); f – fator de forma (adimensional); z_n – profundidade efetiva mínima do sistema radicular (m); J_i – i -ésimo dia juliano (dia); J_0 – dia juliano de emergência da cultura (dia); J_f – dia juliano de maturação da cultura (dia); DAP_0 – tempo para atingir 90% da emergência da cultura (dias); DAP_x – tempo após o plantio, quando o z_x é atingida (dias).

4.4.6.1 Procedimentos para ajuste dos modelos

a) Profundidade inicial do sistema radicular (z_0)

Adotou-se a $z_0 = 0,20$ m, corresponde à profundidade de plantio dos toletes.

b) Fator de forma (f)

Utilizou-se $f = 2$ e $f = 1,3$ para os ajustes com os modelos de “Dourado Neto e van Lier” e AquaCrop, respectivamente (Dourado Neto e van Lier, 1991; Alencar, 2014).

c) Graus-dia acumulados

Para calcular os graus-dia acumulado (GDA ; °C dia), primeiro determinou-se a temperatura basal inferior (Tb ; °C) da cana-de-açúcar, com a regressão linear entre a massa seca total (MS ; g perfilho⁻¹) e GDA . Simulou-se valores de 0,0 até 23,5 °C, com intervalos de 0,5 °C. A Tb selecionada foi a que proporcionou o melhor ajuste da regressão linear, mediante análise de erros estatísticos (TABELA 4.2).

TABELA 4.2 – TEMPERATURA BASAL (Tb , °C) NAS FASES DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR, EM CICLO CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fase de desenvolvimento	DAP	----- Tb (°C) -----		
		RB72454	RB855536	RB855113
Primeira Fase	0-231	19,0	18,5	18,5
Segunda Fase	231-377	23,5	23,5	23,5
Terceira Fase	377-497	18,5	20,0	17,5

Os GDA foram obtidos fazendo-se o somatório dos graus-dia (GD) durante o ciclo da cultura, calculados conforme Villa Nova et al. (1972):

$$GD = (T_{ni} - Tb_i) + \frac{(T_{xi} - T_{ni})}{2} \quad \text{para } T_{ni} > Tb_i$$

$$GD = \frac{(T_{xi} - Tb_i)^2}{2 \cdot (T_{xi} - T_{ni})} \quad \text{para } T_{ni} < Tb_i$$

$$GD = 0 \quad \text{para } T_{xi} < Tb_i$$

Sendo: GD – graus-dia (°C); Tb_i – temperatura base inferior da cultura (°C); T_{xi} – temperatura máxima do i -ésimo dia (°C); T_{ni} – temperatura mínima do i -ésimo dia (°C).

4.4.6.2 Parametrização e validação dos modelos AquaCrop e Logístico

As parametrizações e validações dos modelos AquaCrop e Logístico foram realizadas com os dados observados de profundidade efetiva do sistema radicular (z) da cana-de-açúcar em função dos dias após plantio (DAP), das safras 2002/2003 e 2011/2012. Considerou-se 67% dos dados observados para parametrização e 33% para validação.

– Modelo Logístico:

$$z(DAP)_L = \frac{A}{\left(1 + \exp\left(\frac{DAP_{PI} - DAP}{E}\right)\right)}$$

Sendo: $z(DAP)_L$ – profundidade efetiva do sistema radicular (m); A – parâmetro numérico que representa a assíntota da curva ajustada (m); DAP_{PI} – parâmetro numérico que representa o valor DAP no ponto de inflexão da curva (dias); DAP – dia após o plantio (dias); E – parâmetro de escala numérica no eixo de entrada (dias).

4.4.6.3 Ajuste do modelo de Regressão Linear Múltipla

A análise de regressão linear múltipla (método *Stepwise*) foi realizada entre a profundidade efetiva radicular (z) e as variáveis: armazenamento de água no solo até 0,60 m de profundidade (Arm , cm); evapotranspiração de referência diária (ET , mm dia⁻¹); precipitação pluviométrica diária (P , mm); umidade relativa média diária do ar (UR , %); radiação líquida na superfície (Rn , MJ m⁻² dia⁻¹); temperatura média diária do ar (T_{med} , °C); e, graus-dia acumulado (GDA , °C). A análise foi realizada com o valor total (P e GDA) e mediana (z , Arm , ET , UR , Rn e T_{med}) no período de 49 ± 2 DAP até a z , nas safras 2002/2003 e 2011/2012. A mediana foi utilizada devido a algumas variáveis não apresentarem distribuição normal. As análises de normalidade encontram-se no APÊNDICE 4.

O Arm foi simulado com o *software* HYDRUS-1D, durante o ciclo cana-planta. O HYDRUS resolve numericamente a equação de Richards para o fluxo de água em meio saturado e insaturado (Simunek et al., 2009). Foi utilizado o modelo de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980), incorporado ao HYDRUS, para determinar a relação entre condutividade hidráulica, umidade volumétrica e potencial

matricial do solo. Os parâmetros meteorológicos de entrada no HYDRUS foram: precipitação pluvial; radiação solar; temperaturas máxima e mínima do ar; umidade relativa do ar; e, velocidade do vento. A evapotranspiração de referência foi calculada com a equação de Penman-Montheith (Allen et al., 1998) incorporada no programa.

4.4.7 Análises estatísticas

A estimativa da densidade de comprimento radicular (DR) da safra 2002/2003 foi avaliada em análise de variância. Na parametrização do modelo exponencial foram verificados os pressupostos de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (teste de Bartlett's), sendo realizada a modelagem da variância dos dados heterogêneos. As funções utilizadas e disponíveis no pacote *nlme* do software R encontram-se na TABELA 4.3 (Pinheiro e Bates, 2000).

TABELA 4.3 – FUNÇÕES UTILIZADAS PARA MODELAGEM DA VARIÂNCIA.

Função	Descrição	Variância
varPower	Potência de uma covariável	$Var(e_{ij}) = \sigma^2 \cdot v_{ij} ^{2 \cdot \delta}$
varExp	Exponencial de uma covariável	$Var(e_{ij}) = \sigma^2 \cdot \exp(2 \cdot \delta \cdot v_{ij})$

σ^2 – variância; v_{ij} – covariável; δ – coeficiente da função de variância; e, e_{ij} – erro aleatório.

Para avaliar e comparar os modelos foram utilizados os critérios da qualidade de ajuste:

– Critério de informação de Akaike (AIC)

$$AIC = -2 \cdot \log L(\hat{\theta}) + 2 \cdot p$$

– Critério de informação Bayesiano (BIC)

$$BIC = -2 \cdot \log L(\hat{\theta}) + p \cdot \log(n)$$

Sendo que: $L(\hat{\theta})$ – valor da função de verossimilhança maximizada; p – número de parâmetros do modelo; e, n – tamanho da amostra.

As associações entre os valores observados (Y) e estimados (\hat{Y}) da profundidade efetiva do sistema radicular (z) foram avaliadas com índices e erros (Willmott, 1982; Mangiafico, 2016) calculados no software R (Versão 4.0.0; R Core Team, 2020):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}}}{Dp_Y}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \right]$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})(Y_i - \bar{Y}))^2}{(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2)(\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}$$

Sendo: MAE – erro absoluto médio (m); \hat{Y}_i – i -ésimo valor da variável estimada (m); Y_i – i -ésimo valor da variável observada (m); n – número de dados da variável observada (unidades); $RMSE$ – raiz quadrada do erro quadrado médio (m); RSR – razão entre $RMSE$ e o desvio padrão (adimensional); Dp_Y – desvio padrão dos dados observados (m); d – índice de concordância de Willmott (adimensional); \bar{Y} – média dos valores da variável observada (m); e, R^2 – coeficiente de determinação (adimensional).

Na interpretação dos erros MAE , $RMSE$ e RSR valores iguais ou próximos a zero indicam ajuste perfeito aos dados. Para o RSR o desempenho foi verificado conforme a classificação: muito bom ($0,00 \leq RSR < 0,50$); bom ($0,50 \leq RSR < 0,60$); satisfatório ($0,60 \leq RSR < 0,70$); e insatisfatório ($RSR \geq 0,70$). O índice d igual a 1 indica concordância perfeita (Moriasi et al., 2007; Mangiafico, 2016).

No modelo de Regressão Linear Múltipla foi realizado a análise de variância, teste de normalidade (Shapiro-Wilk), multicolinearidade (VIF – *Variance Inflation Factor*) e homoscedasticidade (Breusch-Pagan). O desempenho estatístico da regressão linear múltipla foi avaliado mediante análise da significância dos coeficientes de regressão a 5% de probabilidade, com o teste t , considerando a magnitude dos erros e índice estatísticos entre os valores observados e estimados com o modelo.

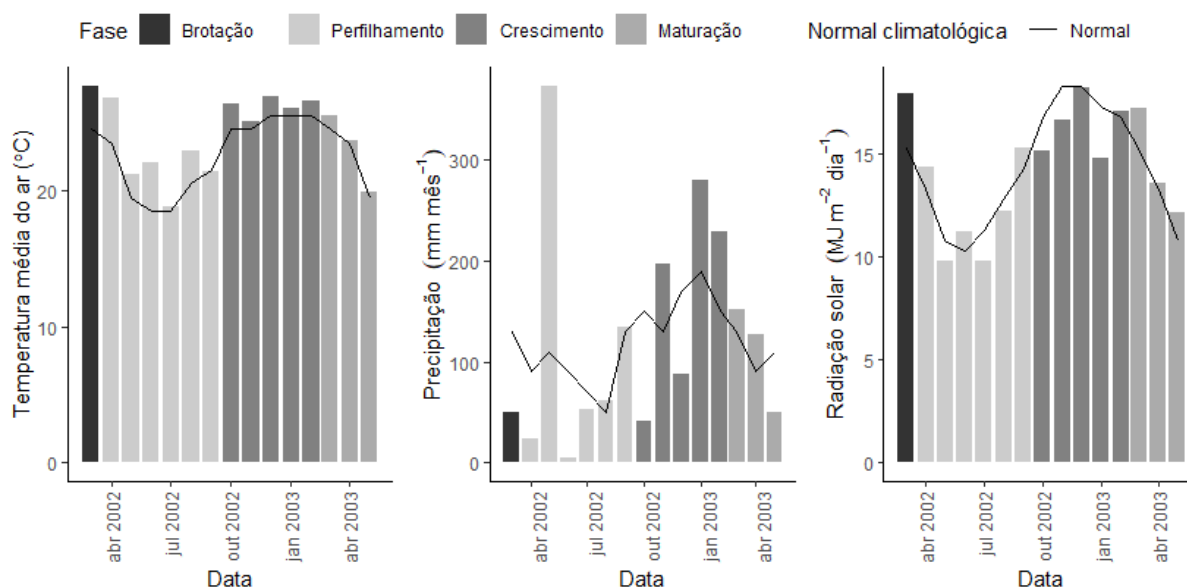
4.5 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.5.1 Dados agrometeorológicos

A tendência mensal da temperatura média do ar (T_{med} ; °C), radiação solar incidente (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹), precipitação pluviométrica (P ; mm mês⁻¹) e normais climatológicas durante o período experimental estão apresentadas nas FIGURAS 4.2 e 4.3.

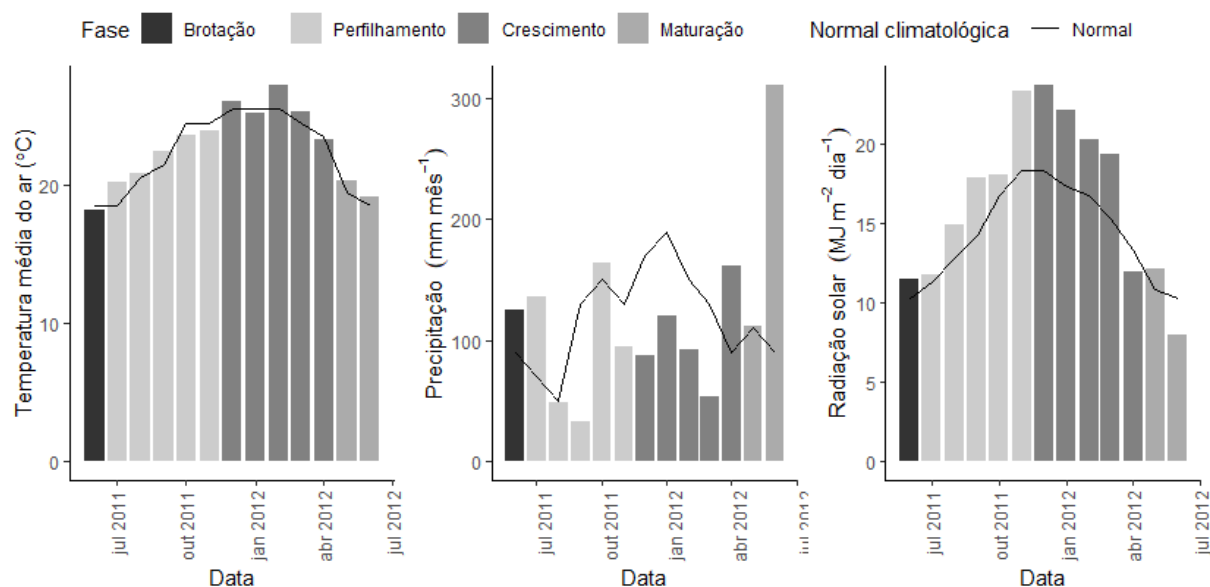
As T_{med} nas fases de crescimento e maturação apresentaram valores próximos às temperaturas médias normais, na safra 2002/2003 (FIGURA 4.3). Na brotação da fase de perfilhamento (abril, junho e agosto) as T_{med} foram superiores às normais. As P apresentaram maiores variações em relação às precipitações pluviométricas normais. Na brotação, perfilhamento e crescimento ocorreram P muito inferiores às normais, bem como P muito superior à normal em maio de 2002. As R_s apresentaram valores inferiores às radiações solares normais em alguns meses das fases de perfilhamento e crescimento.

FIGURA 4.2 – TEMPERATURA MÉDIA DO AR (T_{med} ; °C), PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA (P ; mm mês⁻¹), RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹) E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (linha contínua) DO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003, NOS ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.



FONTE: a Autora (2022).

FIGURA 4.3 – TEMPERATURA MÉDIA DO AR (T_{med} , °C), PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA (P , mm mês⁻¹), RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (R_s , MJ m⁻² dia⁻¹) E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (linha contínua) DO MUNICÍPIO DE PARANAVÁI, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2011/2012, NOS ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.



FONTE: a Autora (2022).

As T_{med} nas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar apresentaram valores próximos às temperaturas médias normais, na safra 2011/2012 (FIGURA 4.3). As P apresentaram maiores variações em relação às precipitações pluviométricas normais. No perfilamento e crescimento ocorreram P muito inferiores às normais, mas nos meses de julho/2002, outubro/2002 e abril/2002 foram superiores. As R_s apresentaram valores inferiores às radiações solares normais em abril e junho no crescimento e maturação.

Civiero (2014) verificou que no perfilamento e crescimento a deficiência hídrica influenciou na redução do número e massa dos colmos e, conseqüentemente, no rendimento. Os maiores rendimentos da cana-de-açúcar estão associados a altas temperaturas médias e precipitação elevada e uniforme na fase de crescimento vegetativo pleno (Araújo, 2019).

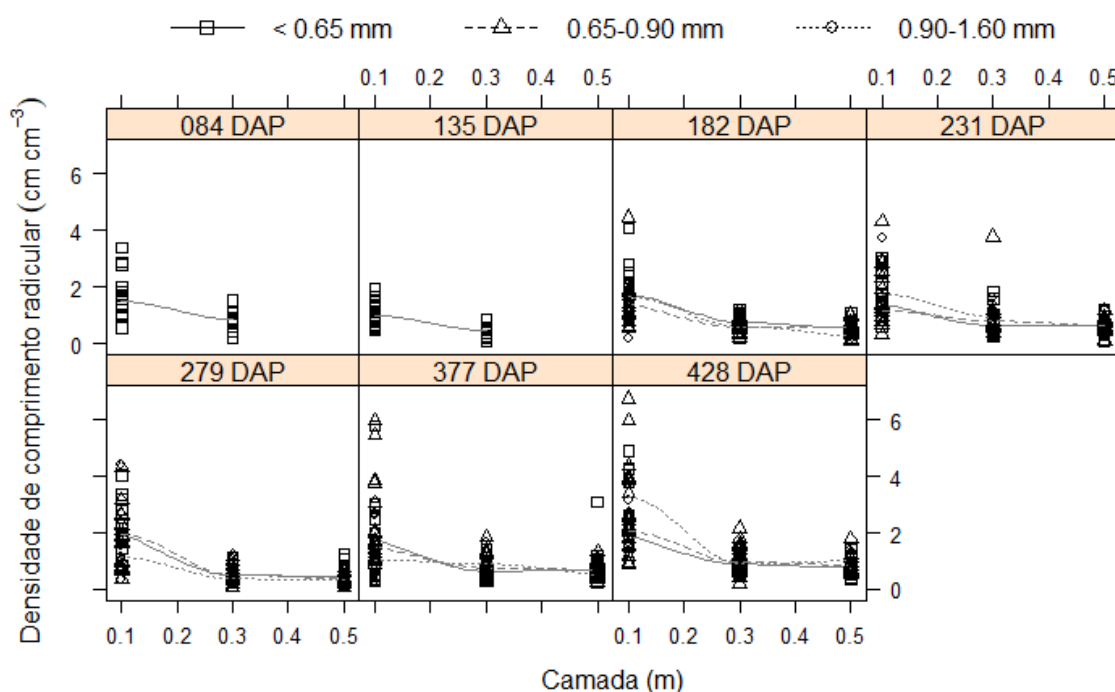
4.5.2 Diâmetro médio radicular e volume radicular

A distribuição das classes de diâmetro em relação à densidade de comprimento radicular nas camadas do solo é fundamental para entender e prever o comportamento do sistema radicular.

As raízes finas (< 0,65 mm), médias (0,65-0,90 mm) e grossas (0,90-1,60 mm) contribuíram com 47,33%, 38,99% e 13,68% do total da densidade de comprimento radicular (DR , cm cm^{-3}), respectivamente (FIGURA 4.4). As maiores densidades de comprimentos radiculares ($DR > 4,0 \text{ cm cm}^{-3}$) foram encontradas com diâmetros médios radiculares menores que 0,90 mm, sendo exceção a $DR = 4,40 \text{ cm cm}^{-3}$ aos 279 DAP , na camada 0,0-0,20 m.

As classes de DR nas camadas 0,0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m apresentaram as seguintes distribuições (FIGURA 4.4): i) raízes grossas – entre 0,18-4,40 cm cm^{-3} (48%), 0,21-1,67 cm cm^{-3} (32%) e 0,10-1,37 cm cm^{-3} (20%), respectivamente; ii) raízes médias – entre 0,31-6,74 cm cm^{-3} (34,74%), 0,09-3,77 cm cm^{-3} (35,44%) e 0,07-1,80 cm cm^{-3} (29,82%), respectivamente; iii) raízes finas – entre 0,32-5,78 cm cm^{-3} (30,92%), 0,09-1,85 cm cm^{-3} (34,68%) e 0,07-1,44 cm cm^{-3} (34,39%), respectivamente. A DR de 3,09 cm cm^{-3} aos 377 DAP foi discrepante na camada 0,40-0,60 m.

FIGURA 4.4 – CLASSES DE DIÂMETRO MÉDIO RADICULAR (FINAS < 0,65 mm; 0,65 ≤ MÉDIAS < 0,90 mm; 0,90 ≤ GROSSAS < 1,60 mm), EM RELAÇÃO À DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (cm cm^{-3}) NAS CAMADAS (m) E DIAS APÓS O PLANTIO (DAP), EM CICLO CANA-PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.



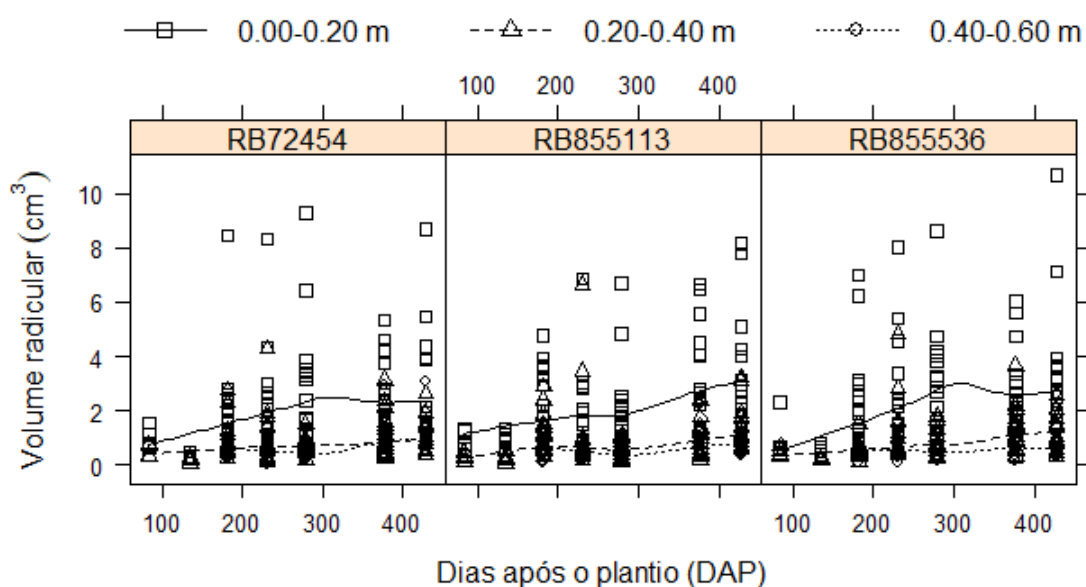
FONTE: a Autora (2022).

A maior magnitude da *DR* de raízes finas na camada superficial e a distribuição bem uniforme em profundidade influencia na absorção de água e nutrientes. As raízes mais finas apresentam maior área superficial e conseqüentemente aumentam a capacidade de absorção de água e nutrientes do solo, pois é mais rápida e maior a absorção de água na região com maior incidência de pelos absorventes (Pimenta, 2004).

Costa (2005) verificou que o diâmetro médio radicular nas soqueiras das variedades RB835486 e RB835089 aumentam a partir da profundidade de 0,20 m, o que pode ser atribuído à compressão do solo de textura arenosa. Nas condições edafoclimáticas analisadas no presente trabalho não foi evidenciado essa tendência para as variedades, pois a magnitude da *DR* de raízes grossas e sua distribuição reduziu em profundidade.

O volume radicular foi maior na camada 0,00-0,20 m do solo e reduziu em profundidade ($p < 0,05$; FIGURA 4.5), apresentando comportamento igual ao observado nas variedades RB867515 e RB036152 (Civiero, 2014). O volume e a distribuição radicular são relevantes em solos arenosos, devido ao maior déficit hídrico ao longo do ciclo em comparação com o solo argiloso (Rossi Neto et al., 2018).

FIGURA 4.5 – VOLUME RADICULAR (cm^3), EM CICLO CANA-PLANTA, DAS VARIEDADES RB72454, RB855113 E RB855536, EM RELAÇÃO AOS DIAS APÓS O PLANTIO (*DAP*), NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.



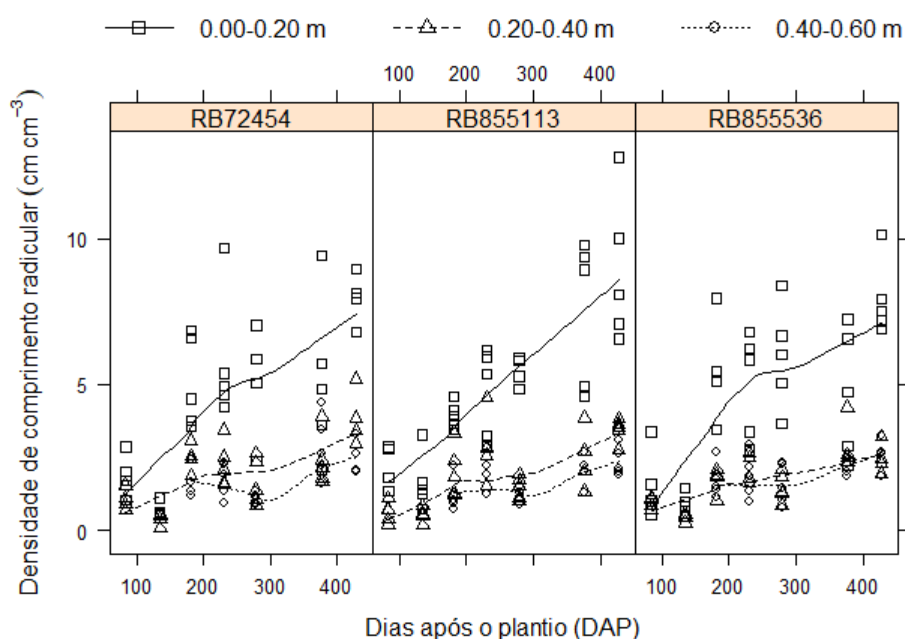
FONTE: a Autora (2022).

4.5.3 Densidade de comprimento radicular

A densidade de comprimento radicular (DR ; cm de raiz por cm^3 de solo) das variedades analisadas foi semelhante no mesmo DAP e camada de solo amostrados (FIGURA 4.6), na safra 2002/2003. As análises de variância e os gráficos com os valores médios e desvios padrão encontram-se nos APÊNDICES 5 e 6.

Houve diferença da densidade de comprimento radicular (DR ; cm de raiz por cm^3 de solo) em relação aos DAP analisados e camadas de solo, sendo os maiores valores de DR observados no DAP_{428} , na camada 0-0,20 m, com exceção do valor discrepante DAP_{231} (variedade RB72454). Com relação aos valores médios em cada DAP , observou-se valor máximo de DR ($8,28 \text{ cm cm}^{-3}$) para DAP_{428} , na camada superficial. Buso et al. (2009) também verificaram maior comprimento de raízes na camada 0-0,20 m, em experimento com a variedade RB855536, aos 378 dias após o corte da cana-de-açúcar, na Estação Experimental de Paranaíba. O maior desenvolvimento de raízes na camada 0-0,20 m é uma característica da cana-de-açúcar (Smith et al. 2005; Aquino et al., 2015).

FIGURA 4.6 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR ; cm cm^{-3}), EM CICLO CANA-PLANTA, DAS VARIEDADES RB72454, RB855113 E RB855536, EM RELAÇÃO AOS DIAS APÓS O PLANTIO (DAP), NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.



FONTE: a Autora (2022).

A *DR* da cana-de-açúcar apresenta declínio exponencial com a camada de solo (Smith et al. 2005). Nas análises realizadas, a *DR* e o volume radicular foram maiores na camada 0-0,20 m, influenciando na capacidade de absorção de água e nutrientes pela planta e, conseqüentemente, na produtividade. A tendência exponencial deve ser considerada no manejo do solo e da cultura.

O predomínio das raízes na camada superficial do solo deve-se ao sistema radicular fasciculado da cana-de-açúcar, tendo maior disponibilidade de água e temperatura mais alta na superfície do solo (sem limitação ao crescimento), que aceleram as taxas de mineralização de nutrientes e maior teor de matéria orgânica (Pregitzer e King, 2005; Smith et al., 2005; Costa et al., 2013). Contudo, a cana-de-açúcar é mais suscetível ao estresse hídrico em períodos de estiagem, devido às características do sistema radicular e do solo, como: sistema radicular superficial, baixa retenção de água do solo e alta condutividade hidráulica na camada superficial (Capítulo II).

No solo da área experimental, desenvolvido no Arenito Caiuá, a saturação por alumínio (m; %) foram classificadas como baixa (< 18%) e alta (30 a 45%) toxidez (Sobral e Guimarães, 1992) nas camadas 0-0,20 m (17,09%) e 0,20-0,40 m (32,26%), respectivamente. O alumínio pode diminuir o crescimento radicular de mudas de cana-de-açúcar em até 60% (Borges et al., 2020). Bem como, o estresse devido a elevada acidez do solo e concentrações de alumínio e manganês, associado à baixa disponibilidade de nutrientes, pode reduzir mais de 70% da biomassa da raiz na maioria dos genótipos de cana-de-açúcar (Sousa, 2018). O aumento do diâmetro das raízes e a diminuição das ramificações são efeitos da toxidez do alumínio em concentrações elevadas no sistema radicular, prejudicando a absorção de nutrientes e água (Sousa et al., 2007). O aumento do diâmetro radicular em profundidade não foi constatado nas análises.

Civiero (2014) verificou, na mesma área da Estação Experimental do presente estudo, que o tratamento considerando adubação elevada com aplicação de calcário, NPK (10-20-20), torta de filtro e biofertilizante (composto principalmente por substâncias húmicas) corrigiu a acidez do solo, reduziu os teores de alumínio e aumentou os teores de macro e micronutrientes no solo. O autor observou que o número de raízes da cana-de-açúcar aumentou 26,1% (0,0-0,20 m), 42,6% (0,20-0,40 m) e 50,0% (0,40-0,60 m) com aplicação de adubação elevada em comparação

com a tradicional, aos 385 *DAP*, para a variedade RB867515, no espaçamento simples de 1,50 m. O comprimento e o volume radicular também foram maiores com a utilização de adubação elevada. O maior crescimento radicular influenciou o incremento no rendimento da cana-de-açúcar (80,3 ton ha⁻¹ para 99,0 ton ha⁻¹).

Rocha et al. (2008) considerou que a fertilidade do solo influenciou no desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. A aplicação de gesso mineral eleva os teores de cálcio em profundidade e proporciona maior distribuição percentual de raízes de cana-de-açúcar em camadas abaixo de 0,40 m, em que os teores e a saturação por alumínio foram elevados. O aumento de Ca²⁺ no complexo de troca promove a redução da saturação por alumínio (Sousa et al., 2007).

Outro fator importante é o aporte contínuo de resíduos orgânicos em solos arenosos. Solos arenosos geralmente são pobres em matéria orgânica, e sabe-se que entre 32 a 84% (média 52%) da capacidade de troca catiônica (CTC) deve-se a sua presença no solo (Costa et al., 2020). A formação de complexos de alumínio com os ácidos orgânicos presentes na matéria orgânica do solo também pode reduzir a toxidez do alumínio (Silva et al., 2017), bem como beneficiar a retenção e disponibilidade de água no solo (Costa et al., 2013).

Os parâmetros morfológicos observados no sistema radicular são limiares nas condições analisadas. Na área experimental em estudo, recomenda-se a aplicação de calcário dolomítico e gesso agrícola, bem como monitorar a acidez do solo das áreas de cana soca a cada dois anos (NEPAR-SBCS, 2019), com intuito de aumentar a magnitude da *DR* nas camadas subsuperficiais do solo.

4.5.4 Modelagem da densidade de comprimento radicular

A parametrização do modelo exponencial entre a densidade de comprimento radicular (*DR*; cm cm⁻³) e camada de solo (*Camada*; m) estão apresentadas na TABELA 4.4, para a safra 2002/2003. A *DR* é um parâmetro padrão de distribuição e caracterização radicular (Chopart et al., 2008), sendo fundamental a parametrização do modelo exponencial que descreve a *DR* em função da camada do solo para realizar o manejo da planta durante todo o ciclo.

TABELA 4.4 – PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO EXPONENCIAL ENTRE A DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (cm cm^{-3}) E CAMADA DE SOLO (m), EM CICLO CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

DAP	Variância		Estimado	Erro padrão	t	Pr(> t)	AIC	BIC	log veross ⁽¹⁾
----- RB72454 -----									
	Constante	A	9,531	1,798	5,301	<0,001	45,611	47,735	-19,806
		B	-3,241	0,658	-4,923	<0,001			
			Shapiro-Wilk =	0,552	Bartlett =	0,037			
182	Potência	A	8,343	1,742	4,788	<0,001	40,333	43,165	-16,167
		B	-2,873	0,481	-5,970	<0,001			
	Exponencial	A	8,500	1,689	5,032	<0,001	40,913	43,745	-16,456
		B	-2,888	0,460	-6,282	<0,001			
----- RB855113 -----									
182	Constante	A	7,289	1,137	6,412	<0,001			
		B	-3,105	0,536	-5,794	<0,001			
			Shapiro-Wilk =	0,415	Bartlett =	0,403			
----- RB855536 -----									
182	Constante	A	11,963	2,882	4,151	0,001			
		B	-4,016	0,932	-4,308	0,001			
			Shapiro-Wilk =	0,538	Bartlett =	0,065			
----- RB72454 -----									
231	Constante	A	8,423	1,235	6,820	<0,001			
		B	-2,940	0,473	-6,214	<0,001			
			Shapiro-Wilk =	0,226	Bartlett =	0,753			
----- RB855113 -----									
231	Constante	A	7,269	1,561	4,658	0,001			
		B	-2,211	0,678	-3,259	0,007			
			Shapiro-Wilk =	0,527	Bartlett =	0,374			
----- RB855536 -----									
231	Constante	A	8,904	2,105	4,229	0,001			
		B	-3,003	0,819	-3,669	0,003			
			Shapiro-Wilk =	0,985	Bartlett =	0,076			
----- RB72454 -----									
	Constante	A	12,999	3,781	3,438	0,005			
		B	-4,767	1,135	-4,199	0,001	47,079	48,996	-20,540
			Shapiro-Wilk =	0,196	Bartlett =	0,002			
279	Potência	A	5,296	2,246	2,358	0,036	35,962	38,518	-13,981
		B	-2,639	0,780	-3,385	0,005			
	Exponencial	A	6,431	2,533	2,539	0,026	34,457	37,014	-13,229
		B	-2,958	0,706	-4,190	0,001			
----- RB855113 -----									
279	Constante	A	15,212	2,342	6,495	<0,001			
		B	-5,209	0,623	-8,368	<0,001			
			Shapiro-Wilk =	0,496	Bartlett =	0,563			

Continuação: TABELA 4.4 – PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO EXPONENCIAL ENTRE A DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (cm cm^{-3}) E CAMADA DE SOLO (m), EM CICLO CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

DAP	Variância		Estimado	Erro padrão	t	Pr(> t)	AIC	BIC	log veross ⁽¹⁾
----- RB855536 -----									
279	Constante	A	16,587	4,739	3,500	0,004			
		B	-5,207	1,192	-4,369	0,001	53,566	55,690	-23,783
			Shapiro-Wilk =	0,985	Bartlett =	0,040			
	Potência	A	13,542	3,739	3,622	0,003	53,803	56,635	-22,901
		B	-4,435	0,906	-4,893	<0,001			
	Exponencial	A	12,932	3,450	3,748	0,002	53,963	56,795	-22,981
B		-4,216	0,853	-4,939	<0,001				
----- RB72454 -----									
377	Constante	A	7,132	2,265	3,148	0,008			
		B	-1,951	0,944	-2,067	0,059			
			Shapiro-Wilk =	0,345	Bartlett =	0,067			
----- RB855113 -----									
377	Constante	A	16,933	4,415	3,836	0,002			
		B	-4,149	1,022	-4,060	0,002	58,472	60,389	-26,236
			Shapiro-Wilk =	0,422	Bartlett =	0,020			
	Potência	A	10,006	3,370	2,969	0,012	53,212	55,768	-22,606
		B	-2,751	0,680	-4,045	0,002			
	Exponencial	A	11,162	3,338	3,344	0,006	52,460	55,016	-22,230
B		-2,904	0,598	-4,859	<0,001				
----- RB855536 -----									
377	Constante	A	7,064	1,666	4,241	0,001			
		B	-2,086	0,713	-2,924	0,012	54,600	56,724	-24,300
			Shapiro-Wilk =	0,717	Bartlett =	0,002			
	Potência	A	5,553	1,372	4,046	0,001	40,003	42,835	-16,002
		B	-1,566	0,454	-3,449	0,004			
	Exponencial	A	5,784	1,451	3,985	0,002	39,261	42,093	-15,630
B		-1,631	0,447	-3,651	0,003				
----- RB72454 -----									
428	Constante	A	14,944	1,562	9,564	<0,001			
		B	-3,201	0,355	-9,016	<0,001			
			Shapiro-Wilk =	0,399	Bartlett =	0,580			
----- RB855113 -----									
428	Constante	A	19,453	3,647	5,334	<0,001			
		B	-3,977	0,707	-5,625	<0,001	59,191	61,315	-26,596
			Shapiro-Wilk =	0,193	Bartlett =	0,001			
	Potência	A	13,219	2,897	4,564	0,001	49,785	52,617	-20,893
		B	-2,970	0,449	-6,612	<0,001			
	Exponencial	A	14,661	2,911	5,037	<0,001	50,514	53,346	-21,257
B		-3,135	0,412	-7,618	<0,001				
----- RB855536 -----									
428	Constante	A	17,288	2,961	5,839	<0,001			
		B	-4,034	0,650	-6,211	<0,001			
			Shapiro-Wilk =	0,452	Bartlett =	0,083			

(1) log veross. – valor do logaritmo da verossimilhança.

No APÊNDICE 7 encontram-se apresentados os resultados da modelagem da variância dos dados heterogêneos e bandas de confiança. A modelagem da variância (Potência e Exponencial) foi realizada quando não foi atendido o pressuposto de homogeneidade das variâncias (teste de Bartlett's).

A modelagem da variância foi realizada em 40% das parametrizações da *DR*. Analisando os avaliadores da qualidade de ajuste, o modelo potencial apresentou os menores valores de AIC e BIC em 67% das modelagens.

4.5.5 Modelagem da profundidade efetiva radicular

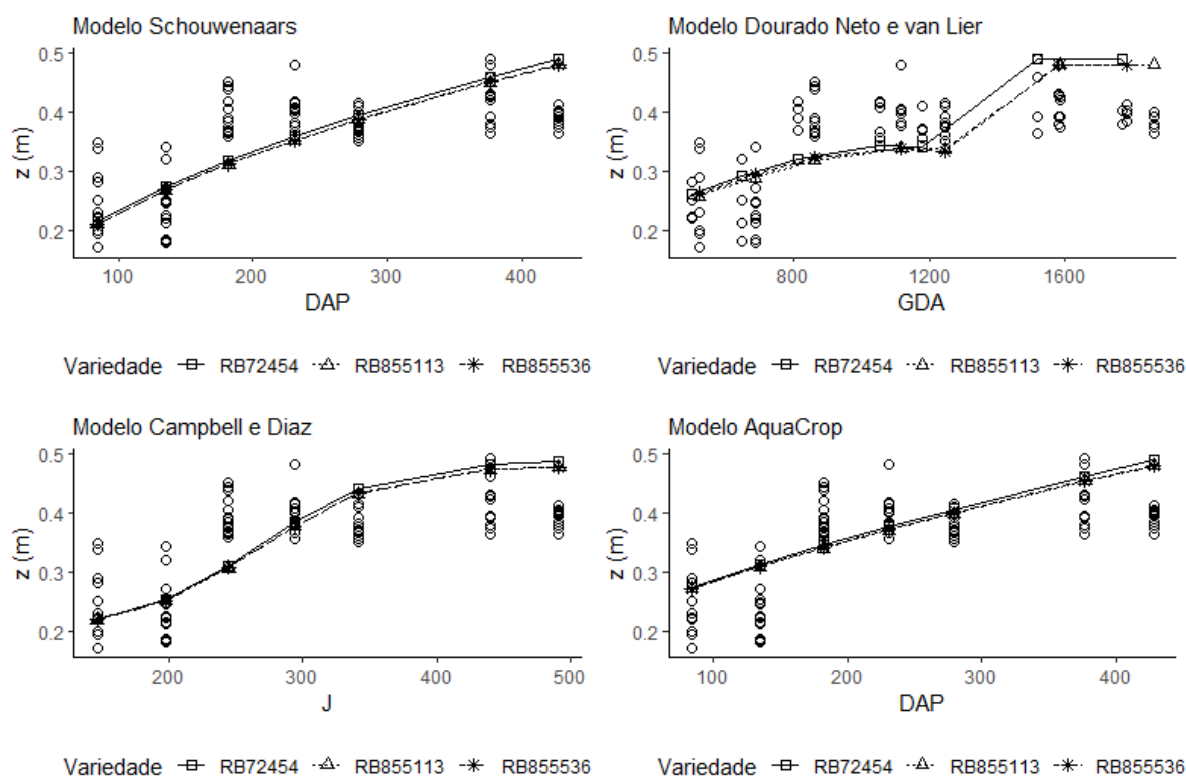
A profundidade efetiva do sistema radicular equivale a 80% das raízes da planta (Aquino et al., 2015; Ohashi et al., 2015). No período analisado no presente trabalho, na safra 2002/2003, o percentual do sistema radicular da cana-de-açúcar foi encontrado até a profundidade máxima de 0,49 m (FIGURA 4.7). Civiero (2014) verificou que a distribuição radicular da cana-de-açúcar em solo arenoso, até a profundidade de 0,40 m, foi superior a 80% na área da Estação Experimental, aos 385 *DAP*. Rossi Neto et al. (2018) verificaram que a distribuição radicular variou entre 64 e 92% na área comercial de cana em Teodoro Sampaio – SP, durante dois anos, em solo arenoso.

O modelo $z(DAP)_s$, que considera os dias após o plantio (*DAP*) com tendência linear, explicou a tendência da z apresentando $d \geq 0,82$ para as três variedades analisadas (TABELA 4.5). Contudo, o modelo subestimou z até DAP_{182} . Gurski et al. (2016) encontraram bom desempenho do modelo para estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-soca em Paranavaí, para experimentos realizados entre junho de 2000 e julho de 2001, em dois tipos de substratos (argiloso e arenoso), em condições de rizotron.

O crescimento observado da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar não foi explicado pela tendência sigmoideal do modelo $z(GDA)_{DV}$ (TABELA 4.4). A relação entre o acúmulo térmico e a variação da profundidade efetiva radicular do modelo $z(GDA)_{DV}$ apresentou os menores R^2 e d para as variedades estudadas. A variedade RB72454 atingiu a profundidade efetiva máxima ($z_x = 0,49$ m) com 1521,61 *GDA*, em torno de 64 *GDA* menor que as cultivares RB855536 e RB855113, para $z_x = 0,48$ m. Nos intervalos “861,50 \geq *GDA* \geq 1245,13”

(RB855536 e RB855113) e “ $811,47 \geq GDA \geq 1180,91$ ” (RB72454) o modelo $z(GDA)_{DV}$ subestimou os valores de z .

FIGURA 4.7 – AJUSTE DOS MODELOS TESTADOS ÀS PROFUNDIDADES EFETIVAS DO SISTEMA RADICULAR OBSERVADAS, PARA AS VARIEDADES RB72454, RB855113 E RB855536, SAFRA 2002/2003: $z(DAP)_S$ – Schouwenars (1988); $z(GDA)_{DV}$ – Dourado Neto e van Lier (1991); $z(J)_{CD}$ – Campbell e Diaz (1988); $z(DAP)_{AC}$ – AquaCrop, em Raes et al. (2018).



FONTE: a Autora (2022).

A tendência exponencial do modelo $z(J)_{CD}$, que considera os dias Julianos, subestimou z aos 245 J . Gurski et al. (2016) encontraram ótimo desempenho do modelo de Campbell e Diaz (1988) para cana-soca, com $d = 0,9523$ e $R^2 = 0,8119$, superiores aos observados no presente trabalho (TABELA 4.5). Os resultados evidenciaram a influência dos fatores inerentes ao ciclo cana-planta e cana-soca, bem como fatores do solo e clima no desenvolvimento radicular da cultura. De acordo com Borg e Grimes (1986), a curva de crescimento radicular é peculiar para as condições experimentais, assim como das interações entre solo, planta, manejo e clima.

O modelo $z(DAP)_{AC}$, que considera os dias após o plantio, subestimou a z aos DAP_{182} para todas as variedades, sem considerar o efeito do estresse hídrico.

No modelo AquaCrop, quando a depleção de água no solo excede o limite superior para o fechamento estomático, a redução na expansão da profundidade efetiva da raiz é determinada com a magnitude do coeficiente de estresse hídrico para fechamento estomático ($K_{s_{sto}}$) e o fator de forma (Raes et al., 2018). Considerando a deficiência hídrica na fase de crescimento vegetativo (Gurski et al., 2020), o modelo reduz a magnitude da profundidade efetiva estimada e subestima a z aos DAP_{231} .

TABELA 4.5 – ERROS E ÍNDICE ESTATÍSTICOS ENTRE AS PROFUNDIDADES EFETIVAS OBSERVADAS (z ; m) E ESTIMADAS NOS MODELOS (m) TESTADOS, EM FUNÇÃO DE DAP , J E GDA , PARA CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003: $z(DAP)_S$ – Schouwenars (1988); $z(GDA)_{DV}$ – Dourado Neto e van Lier (1991); $z(J)_{CD}$ – Campbell e Diaz (1988); $z(DAP)_{AC}$ – AquaCrop, em Raes et al. (2018).

Erros e índice	----- Modelos -----			
	$z(DAP)_S$	$z(GDA)_{DV}$	$z(J)_{CD}$	$z(DAP)_{AC}$
----- RB72454 -----				
<i>MAE</i>	0,05	0,05	0,05	0,05
<i>RSR</i>	0,73	0,82	0,80	0,73
<i>RMSE</i>	0,06	0,06	0,06	0,06
<i>d</i>	0,86	0,80	0,86	0,82
R^2	0,56	0,42	0,57	0,53
----- RB855113 -----				
<i>MAE</i>	0,06	0,07	0,06	0,06
<i>RSR</i>	0,79	0,90	0,82	0,83
<i>RMSE</i>	0,07	0,08	0,07	0,07
<i>d</i>	0,82	0,74	0,83	0,75
R^2	0,48	0,34	0,52	0,45
----- RB855536 -----				
<i>MAE</i>	0,05	0,06	0,05	0,05
<i>RSR</i>	0,91	0,96	0,94	0,82
<i>RMSE</i>	0,07	0,07	0,07	0,06
<i>d</i>	0,82	0,77	0,82	0,80
R^2	0,48	0,36	0,52	0,46

DAP – Dias após o plantio (dias); J – Dias Julianos (dias); GDA – Graus dias acumulado (graus dias).

Analisando o *RSR* entre a profundidade efetiva radicular observada (z) e estimadas (TABELA 4.5), os modelos ajustados não foram satisfatórios ($RSR > 0,70$; Moriasi et al., 2007). Assim, considerou-se necessária a parametrização de modelos de estimativa da z nas condições edafoclimáticas da região Noroeste do Paraná.

4.5.5.1 Parametrização e validação do modelo AquaCrop

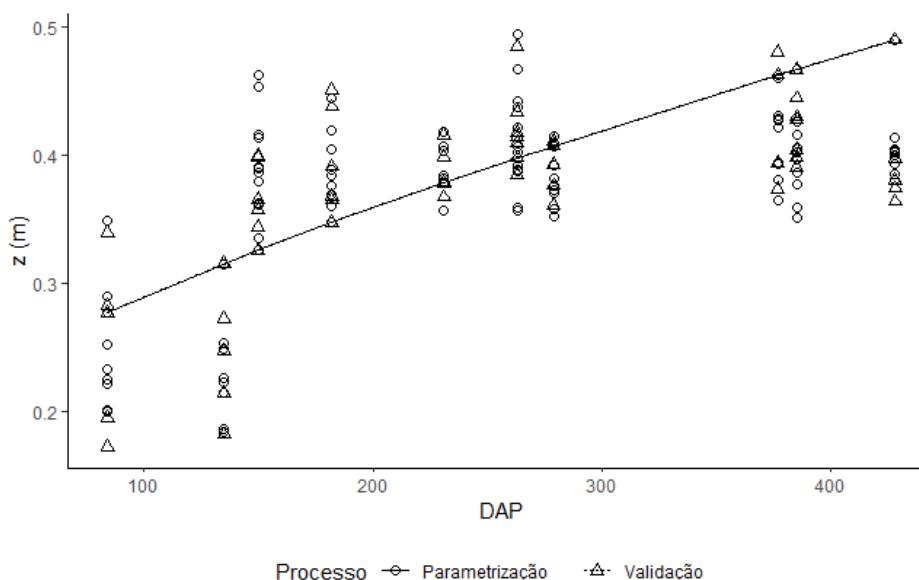
Com a parametrização do modelo AquaCrop nas safras 2002/2003 e 2011/2012 obteve-se $f = 1,323$ (TABELA 4.6; FIGURA 4.8). O f obtido nos ajustes ficou próximo ao encontrado por Alencar (2014) ($f = 1,3$), que já foi utilizado por Ribeiro (2020) e no presente trabalho, no ajuste do modelo para cada variedade. Contudo, o modelo AquaCrop não foi satisfatório na parametrização, apresentando $RSR = 0,95$ (Moriasi et al., 2007).

TABELA 4.6 – PARÂMETRO f OBTIDO DA ASSOCIAÇÃO ENTRE A PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR (z) DA CANA-DE-AÇÚCAR E OS DIAS APÓS O PLANTIO (DAP), COM O MODELO AQUACROP, SAFRAS 2002/2003 E 2011/2012, BEM COMO INTERVALO DE CONFIANÇA, ERROS E ÍNDICE ESTATÍSTICOS ENTRE OS VALORES ESTIMADOS E OBSERVADOS.

Parâmetro	Estimado	Erro padrão	t	Pr(> t)	IC _{95%}	MAE	RMSE	RSR	d	R ²
f (ad.)	1,323	0,116	11,410	< 0,01*	[1,116; 1,581]	0,06	0,07	0,95	0,73	0,32

f – parâmetro fator de forma (adimensional). * Significativo à 5% de probabilidade.

FIGURA 4.8 – PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA ESTIMAR A PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR, NAS SAFRAS 2002/2003 E 2011/2012.



FONTE: a Autora (2022).

Na validação, a magnitude dos erros e índice estatísticos ($MAE = 0,05$ m; $RMSE = 0,06$ m; $RSR = 0,88$; $d = 0,74$; e, $R^2 = 0,35$) entre a profundidade efetiva radicular observada (z , m) e estimada (\hat{z} , m) indicaram que o modelo AquaCrop não foi satisfatório. As especificidades do solo arenoso interferem no desenvolvimento

radicular, e o modelo AquaCrop não foi satisfatório para expressar seu comportamento durante o ciclo produtivo. Os erros *MAE*, *RMSE* e *RSR* com baixa magnitude indicaram bons ajustes, sendo perfeito quando igual à zero. Quanto maior a magnitude do *d*, melhor o ajuste do modelo, sendo perfeito quando for igual a 1 (Willmott, 1982; Mangiafico, 2016).

4.5.5.2 Parametrização e validação do modelo Logístico

Os parâmetros do modelo Logístico (*A*, DAP_{PI} e *E*) foram significativos ($p < 0,05$) para representar a profundidade efetiva radicular da cana-de-açúcar em relação aos dias após o plantio (TABELA 4.7; FIGURA 4.9), nas safras 2002/2003 e 2011/2012. O *RSR* = 0,65 indicou que o modelo Logístico foi satisfatório na parametrização ($0,60 < RSR \leq 0,70$; Moriasi et al., 2007).

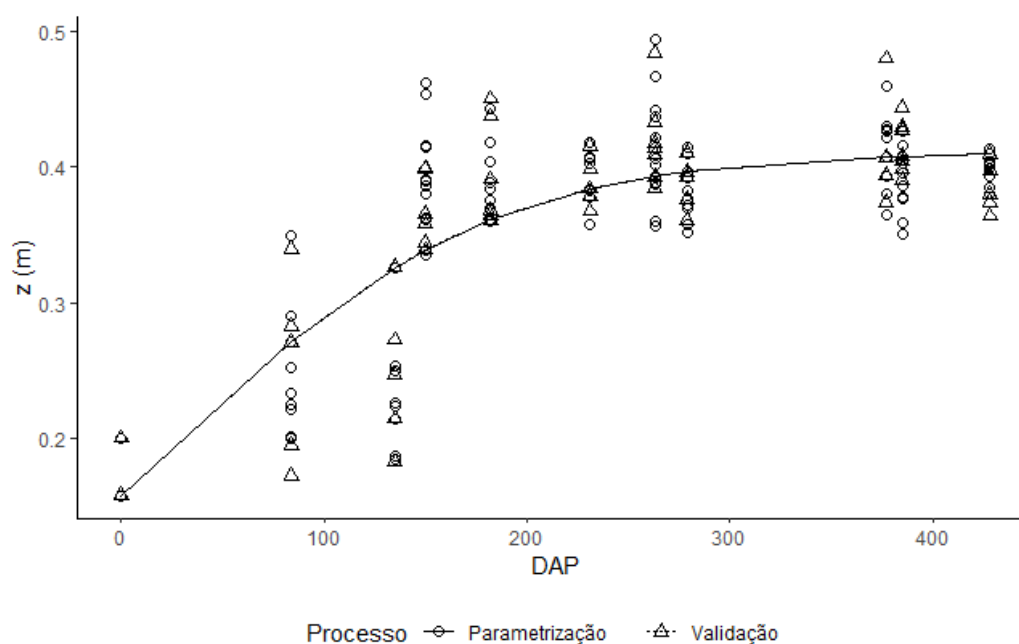
TABELA 4.7 – PARÂMETROS OBTIDOS DA PARAMETRIZAÇÃO ENTRE A PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR (*z*) DA CANA-DE-AÇÚCAR E OS DIAS APÓS O PLANTIO (*DAP*), COM O MODELO LOGÍSTICO, NAS SAFRAS 2002/2003 E 2011/2012, BEM COMO INTERVALO DE CONFIANÇA, ERROS E ÍNDICE ESTATÍSTICOS ENTRE OS VALORES ESTIMADOS E OBSERVADOS.

Par.	Estimado	Erro padrão	<i>t</i>	Pr(> <i>t</i>)	IC _{95%}	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>RSR</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²
<i>A</i>	0,412	0,0097	42,066	< 0,01*	[0,395; 0,432]	0,04	0,05	0,65	0,85	0,58
DAP_{PI}	35,687	11,8993	2,999	0,0035*	[5,938; 58,046]	—	—	—	—	—
<i>E</i>	74,356	12,0834	6,154	< 0,01*	[56,522; 102,651]	—	—	—	—	—

Par. – parâmetros do modelo: *A* – parâmetro numérico representando a assíntota da curva ajustada (m); DAP_{PI} – parâmetro numérico que representa o valor *DAP* no ponto de inflexão da curva (dias); *E* – parâmetro de escala numérica no eixo de entrada (m). * Significativo a 5% de probabilidade.

Na validação, a magnitude dos erros e índice estatísticos (*MAE* = 0,04 m; *RMSE* = 0,05 m; *RSR* = 0,59; *d* = 0,89; e, $R^2 = 0,65$) entre a profundidade efetiva radicular observada (*z*, m) e estimada (\hat{z} , m) indicaram que o modelo Logístico foi bom (FIGURA 4.9). Os erros *MAE*, *RMSE* e *RSR* com baixa magnitude indicaram bons ajustes, sendo perfeito quando igual à zero. Quanto maior a magnitude do *d*, melhor o ajuste do modelo, sendo perfeito quando for igual a 1 (Willmott, 1982; Mangiafico, 2016).

FIGURA 4.9 – PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO LOGÍSTICO PARA ESTIMAR A PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR, NAS SAFRAS 2002/2003 E 2011/2012.



FONTE: a Autora (2022).

4.5.5.3 Regressão linear múltipla

O modelo de Regressão Linear Múltipla ajustado para realizar a estimativa da profundidade efetiva radicular da cana planta (z) foi significativo, apresentando valor $p = 0,0177$ da estatística F , nas safras 2002/2003 e 2011/2012:

$$z = -2,7030 + 0,5182 \cdot Arm + 0,0001 \cdot GDA - 0,0004 \cdot P - 0,0096 \cdot UR$$

Sendo: z – profundidade efetiva do sistema radicular (m); Arm – armazenamento de água no solo até 60 cm (cm período^{-1}); GDA – graus dias acumulado (dias período^{-1}); P – somatório da precipitação pluviométrica no período (mm período^{-1}); UR – umidade relativa média do período ($\%\text{período}^{-1}$). Período de 49 ± 2 DAP até a z , nas safras 2002/2003 e 2011/2012.

As variáveis evapotranspiração de referência diária, radiação líquida na superfície e temperatura média diária do ar não apresentaram significância estatística ($p > 0,05$), e foram excluídas do modelo conforme método Stepwise (TABELA 4.8).

TABELA 4.8 – COEFICIENTES DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA AJUSTADOS À PROFUNDIDADE RADICULAR MEDIANA ($z_{mediana}$, m), PARA CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, NAS SAFRAS 2002/2003 e 2011/2012.

Coeficiente ⁽¹⁾	Estimado	Estimado padronizado	Erro ⁽²⁾	t ⁽³⁾	$Pr(> t)$ ⁽⁴⁾	$R_{ajust.}^2$ ⁽⁵⁾
α	-2,7030	0,0000	0,83520	-3,2360	0,0230*	
<i>Arm</i>	0,5182	1,4420	0,13190	3,9290	0,0111*	
<i>GDA</i>	0,0001	0,6996	0,00004	2,8440	0,0361*	0,7748
<i>P</i>	-0,0004	-0,7065	0,00015	-2,5320	0,0524	
<i>UR</i>	-0,0096	-1,0760	0,00260	-3,6760	0,0144*	

⁽¹⁾ α – coeficiente de regressão, que representa o intercepto; *ARM* – Armazenamento de água no solo até 60 cm (cm); *GDA* – Graus-dia acumulado (°C); *P* – Precipitação pluviométrica acumulada (mm); *UR* – Umidade relativa média do ar (%); ⁽²⁾ Erro – erro padrão (unidade da variável); ⁽³⁾ t – valores do teste t de Student (adimensional);

⁽⁴⁾ $Pr(> |t|)$ – probabilidade de significância; * Significativo à 5% de probabilidade; ⁽⁵⁾ $R_{ajust.}^2$ – Coeficiente de determinação ajustado (adimensional).

Os erros e índice estatísticos ($MAE = 0,02$; $RMSE = 0,02$; $RSR = 0,34$; $e, d = 0,97$) entre a profundidade efetiva radicular observada e estimada com o modelo indicaram capacidade preditiva da regressão linear múltipla.

As variáveis *Arm*, *GDA*, *P* e *UR* apresentam efeito significativo na profundidade efetiva radicular da cana planta. A variável *Arm* apresentou o maior coeficiente de regressão padronizado em modulo. Otto et al. (2009) verificaram que a massa de matéria seca de raízes no ciclo da cana planta relacionou-se com a quantidade de água armazenada até 60 cm, reafirmando que a disponibilidade de água no solo influencia no desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.

É na solução do solo que ocorre a maioria das reações químicas e transporte de nutrientes. A temperatura do solo afeta todo esse sistema e interfere diretamente na absorção dos nutrientes pelas plantas (Pregitzer e King, 2005). O manejo do solo pode proporcionar redução da amplitude térmica do solo e aumentar o teor de água e matéria orgânica, conforme constatado por Vasconcelos (2002), que alterou o sistema de colheita da cana queimada manual para cana crua mecanizada.

O movimento de água do solo para planta e atmosfera ocorre devido às forças físicas, com o sol como fonte relevante de energia. A radiação solar e a disponibilidade de água no solo são fatores que influenciam nos processos da planta, como a transpiração e fotossíntese, e conseqüentemente no crescimento e reprodução (Taiz et al., 2017). A umidade relativa do ar e a temperatura podem modificar a magnitude do gradiente de concentração de vapor de água entre a folha

e a atmosfera, interferindo na taxa de transpiração (Kerbaudy, 2004). As raízes respiram muito e intensamente, e o substrato utilizado no processo é constituído por carboidratos vindos da parte aérea pelo floema, a partir das folhas, que são órgãos responsáveis pela fotossíntese (Kerbaudy, 2004). As raízes detectam o déficit hídrico e enviam sinal (ácido abscísico) para as folhas de que o fechamento estomático é necessário para conservação da água (Wilkinson, 1999) e as partes foliares são mais diretamente afetadas pela seca que as raízes (Farooq et al., 2009). A disponibilidade de água no solo é um fator que interfere na condutância estomática, mas o seu controle depende da interação complexa de fatores intrínsecos e extrínsecos (Farooq et al., 2009). O sistema radicular depende dos fatores e interação solo-planta-manejo-atmosfera durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

4.6 CONCLUSÕES

- A densidade de comprimento radicular e o volume radicular da cana-de-açúcar foram maiores na camada 0,00-0,20 m. As raízes finas (< 0,65 mm), médias (0,65-0,90 mm) e grossas (0,90-1,60 mm) tiveram maiores magnitudes da densidade de comprimento radicular na camada superficial, com redução em profundidade. As raízes finas estão distribuídas em profundidade;
- Os modelos testados, que consideram os dias após plantio (*DAP*), dias julianos (*J*) e graus-dia acumulado (*GDA*) na estimativa da profundidade efetiva, não foram satisfatórios (*RSR* > 0,70). O modelo Logístico estimou bem (*RSR* = 0,59) a profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, tendo os dias após o plantio (*DAP*) como variável explicativa. A regressão linear múltipla contendo variáveis climáticas e armazenamento de água no solo estimou muito bem (*RSR* = 0,34) e apresenta capacidade preditiva da profundidade efetiva radicular da cana-de-açúcar nas condições de solo e clima de Paranavaí.

4.7 REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P. **Parametrização e validação do modelo Aquacrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 117 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa, 2014.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome: FAO, 297p. 1998.
- AQUINO, G. S.; MEDINA, C. C.; PORTEIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O.; SANTOS JUNIOR, J. H.; ALMEIDA, L. F.; SANTIAGO, A. D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.12, p.1150-1159, 2015.
- ARAÚJO, R. M. **Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar na região sul do Brasil**. 101 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – (Produção Vegetal), Curitiba, 2019.
- BORG, H.; GRIMES, D. W. Depths development of roots with time: an empirical description. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v.29, p.194-197, 1986.
- BORGES, C. E.; CAZETTA, J. O.; SOUSA, F. B. F.; OLIVEIRA, K. S. Aluminum toxicity reduces the nutritional efficiency of macronutrients and micronutrients in sugarcane seedlings. **Ciência e Agrotecnologia**, v.44, p.1-18, 2020.
- BUSO, P. H. M.; KOEHLER, H. S.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; IDO, O. T.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; WEBER, H.; OLIVEIRA, R. A.; ZENI NETO, H. O sistema radicular da variedade RB855536 de cana-de-açúcar no plantio em minitolete e tolete. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, n.5, p.343-349, 2009.
- CAMPBELL, G. S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDDINGER, F. R.; JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru: ICRISAT, p.15-26, 1988.
- CHOPART, J.-L.; RODRIGUES, S. R.; AZEVEDO, M. C.; MEDINA, C. C. Estimating sugarcane root length density through root mapping and orientation modelling. **Plant Soil**, v.313, p.101-112, 2008.
- CIVIERO, J. C. **Espaçamento de plantio da cana-de-açúcar, em Latossolo Vermelho Amarelo, no Estado do Paraná**. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – (Produção Vegetal), Curitiba, 2014.
- COSTA, A. C. S.; SOUZA JUNIOR, I. G.; CANTON, L. C.; GIL, L. G.; FIGUEIREDO, R. Contribution of the chemical and mineralogical properties of sandy-loam tropical soils to the cation exchange capacity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.44, 2020.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; PÉRTILE, P.; SILVA, F. R. Water retention and availability in soils of the state of Santa Catarina-Brazil: effect of textural classes, soil classes and lithology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1535-1548, 2013.

COSTA, M. C. G. **Distribuição e crescimento radicular em soqueiras de cana-de-açúcar: dois cultivares em solos com características distintas**. 88 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. J. **Programa para elaboração do balanço hídrico para culturas anuais e perenes**. Piracicaba: ESALQ/USP. Departamento de Agricultura, 1991. 58p.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, p.185-212, 2009.

Google Maps. Google. 2019. “Estação Experimental da UFPR”. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.9762068,-52.4722051,971m/data=!3m1!1e3>>.

GURSKI, B. C. **Funções destinadas ao estudo e estimativa das relações hídricas para o aprimoramento do balanço hídrico agrícola**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, A. W. P.; JERSZURKI, D.; ARMINDO, R. A. Modelos para estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho. **Irriga**, Edição Especial, p.155-167, 2016.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERG, E.; OLIVEIRA, R. A. Water requirements and restrictions to sugarcane in cane plants and ratoon cane cycles in Southern Brazil. **Acta Agronómica**, v.69, n.2, p.135-143, 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha territoriais do Brasil**, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>>.

IDO, O. T.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; BUSO, P. H. M.; OLIVEIRA, R. A. Crescimento e distribuição radicular de três variedades cultivares de cana-de-açúcar, em cana-soca, em dois tipos de solo, em Rizotron, i. uso do Winrhizo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.7, p.21-26, 2006.

INMAN-BAMBER, N. G.; JACKSON, P. A.; STOKES, C. J.; VERRALL, S.; LAKSHMANAN, P.; BASNAYAKE, J. Sugarcane for water-limited environments: Enhanced capability of the APSIM sugarcane model for assessing traits for transpiration efficiency and root water supply. **Field Crops Research**, v.196, p.112-123, 2016.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 452p.

MANGIAFICO, S. S. **Summary and Analysis of Extension Program Evaluation in R**, version 1.18.1. <https://rcompanion.org/handbook/>. 2016.

MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, v.71, n.1, p.1-16, 2014.

MORAES, E. R.; MAGESTE, J. G.; LANA, R. M. Q.; TORRES, J. L. R.; DOMINGUES, L. A. S.; LEMES, E. M.; LIMA, L. C. Sugarcane Root Development and Yield under Different Soil Tillage Practices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, p.1-10, 2019.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers. v. 50, n.3, p.885-900, 2007.

NEPAR-SBCS – NÚCLEO ESTADUAL PARANÁ-SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná**. 2 ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2019.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

OHASHI, A. Y. P.; PIRES, R. C. M.; RIBEIRO, R. V.; SILVA, A. L. B. O. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, v.74, n.2, p.131-138, 2015.

OLIVEIRA, R. A. **Análise de crescimento da cana-de-açúcar, na região Noroeste do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Programa de Pós-graduação em Agronomia – Produção Vegetal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.4, p.398-405, 2009.

PIMENTA, J. A. Relações hídricas. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p.1-39, 2004.

PINHEIRO, J.; BATES, D. M. **Mixed effects models in S and S-PLUS**. Statistical and computing. New York: Springer-Verlag, 528p. 2000.

PREGITZER, K. S.; KING, J. S. Effects of Soil Temperature on Nutrient Uptake. In: BassiriRad, H. (Ed.). **Nutrient Acquisition by Plants**. An Ecological Perspective. Ecological Studies. v.181, p.277-310, 2005.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, 2020.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Chapter 3 Calculation procedures, **Reference Manual: AquaCrop Version 6.0-6.1.** Roma, FAO, 2018, 151p.

REGENT INSTRUMENTS. **WinRHIZO Analysis of Washed Roots and Arabidopsis Seedlings.** Regent Instruments Inc., Québec, Canada, 2000.

RIBEIRO, N. L. **Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo AquaCrop (FAO) para variedades de cana-de-açúcar.** 98 f. Tese (Doutorado) – USP / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Engenharia de Sistemas Agrícola. Piracicaba, 2020.

ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, A. C.; RODRIGUES, A. N.; LIRA JÚNIOR, M. A.; FREIRE, F. J. Emprego do gesso do Araripe na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.4, p.307-312, 2008.

ROSSI NETO, J.; SOUZA, Z. M.; KOLLN, O. T.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, D. A.; CASTIONI, G. A. F.; BARBOSA, L. C.; CASTRO, S. G. Q.; BRAUNBECK, O. A.; GARSIDE, A. L.; FRANCO, H. C. J. The Arrangement and Spacing of Sugarcane Planting Influence Root Distribution and Crop Yield. **BioEnergy Research**, v.11, p.291-304, 2018.

SCHOUWENAARS, J. M. Rainfall irrigation and sowing strategies in southern Mozambique. **Agriculture Water Management**, v.13, p.49-64, 1988.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de Química do Solo.** 6ª ed. Porto Alegre, 2017. p.61-85.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAIATO, H.; SAKAI, M.; van GENUCHTEN, M. T. **The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Version 4.08.** University of California Riverside, Riverside, 2009. 330p.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, p.169-183, 2005.

SOBRAL, A. F.; GUIMARÃES, V. O. S. Relação entre a toxidez do alumínio e a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, n.2, p.287-292, 1992.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVERIRA, S. A. V – Acidez do solo e sua correção. In: **Fertilidade do solo.** Editores Roberto Ferreira Novais et al., Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

SOUSA, F. B. F. **Tolerância de genótipos de cana-de-açúcar a toxidez por alumínio, manganês e baixa disponibilidade de nutrientes.** 56 f. Dissertação –

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Jaboticabal, 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VASCONCELOS, A. C. M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 140p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2002.

VILLA NOVA, N. A.; PEDRO JUNIOR, M. J.; PEREIRA, A. R.; OMETTO, J. C. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base em função das temperaturas máxima e mínima. **Ciência da Terra**, n.30, p.1-8, 1972.

WILKINSON, S. pH as a stress signal. **Plant Growth Regulation**, v.29, p.87-99, 1999.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.63, n.11, p.1309-1313, 1982.

YANG, Y.; DONOHUE, R. J.; McVICAR, T. R. Global estimation of effective plant rooting depth: Implications for hydrological modeling. **Water Resources Research**, v.52, p.8260-8276, 2016.

5 CAPÍTULO V – MODELO MULTIVARIADO DE ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CLIMA SUBTROPICAL CONSIDERANDO VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E O ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO

5.1 RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial da cana-de-açúcar e entender a resposta da cultura em relação ao clima e armazenamento da água do solo (Arm) é fundamental para estabelecer a melhor forma de manejo, indicar alternativas para o melhoramento genético e alcançar incrementos no rendimento. Teve-se por objetivo no presente estudo constituir um modelo multivariado de estimativa do rendimento da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas subtropical da região Noroeste do Paraná, considerando variáveis climáticas e o armazenamento da água no solo (Arm). Os dados observados de produtividade foram provenientes de experimentos realizados na área da Estação Experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar, da Universidade Federal do Paraná, integrante da Rede Interuniversitária para Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. As variedades RB72454, RB867515, RB966928 e RB036066 em cana soca foram analisadas nas safras 1998-2006, 2008, 2018 e 2019. A análise de regressão linear múltipla (método *Stepwise*) com validação cruzada repetida foi realizada entre o rendimento da cana-de-açúcar e as variáveis climáticas e o armazenamento de água no solo, nas fases fenológicas. Os graus dia acumulado nas Fases I e II e o armazenamento de água no solo na Fase II de desenvolvimento exercem efeito significativo no rendimento da cana-de-açúcar. O modelo de regressão linear múltipla, com os graus dia acumulado (GDA_I) e o armazenamento de água no solo (Arm_{II}), nas Fases I e II de desenvolvimento, apresenta capacidade preditiva do rendimento da cana-de-açúcar das variedades analisadas.

Palavras-chave: Modelo estatístico, modelagem agrometeorológica, predição do rendimento, regressão linear múltipla, cana soca.

5.2 ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of sugarcane and understanding the response of the crop in relation to climate and soil water storage (*Arm*) is essential to establish the best form of management, indicate alternatives for genetic improvement and achieve yield increases. The objective of this study was to build a multivariate model to estimate the sugarcane yield under subtropical edaphoclimatic conditions in the northwestern Paraná region, considering climatic variables and soil water storage (*Arm*). The observed yield data came from experiments conducted in the Experimental Station of the Sugarcane Genetic Improvement Program of the Federal University of Paraná, a member of the Inter-University Network for the Development of the Sugar and Energy Sector. The varieties RB72454, RB867515, RB966928 and RB036066 in ratoon cane were analyzed in the 1998-2006, 2008, 2018 and 2019 harvests. Multiple linear regression analysis (*Stepwise* method) with repeated cross-validation was performed between sugarcane yield and climate variables and soil water storage in phenological phases. The accumulated degree days in Phases I and II and soil water storage in Phase II of development exert significant effect on sugarcane yield. The multiple linear regression model with the accumulated degree days (GDA_I) and the water storage in the soil (Arm_{II}) in Phases I and II of development presents predictive capacity of the sugarcane yield of the varieties analyzed.

Keywords: Statistical modeling, agrometeorological modeling, yield prediction, multiple linear regression, ratoon cane.

5.3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. A estimativa da produção da cultura para a safra 2021/22 é de 592 milhões de toneladas e volume de matéria-prima 9,5% menor em relação à safra 2020/21, em decorrência da estiagem durante o ciclo produtivo e baixas temperaturas em junho e julho, inclusive ocorrência de geadas em algumas áreas de produção. A estimativa de produção da cultura na região Sul é de 31,9 milhões de toneladas, com redução de 6,7% em comparação com a safra anterior (CONAB, 2021). As condições climáticas durante o ciclo da cana-de-açúcar interferem na produção. A identificação dos fatores do clima e solo que exercem efeito significativo no rendimento da cana-de-açúcar em diversas safras é fundamental para prever a produção, realizar o manejo, selecionar variedades e indicar alternativas de melhoramento genético da cultura.

Para cana-de-açúcar expressar seu potencial produtivo é fundamental a disponibilidade de água no solo na fase de crescimento vegetativo, período em que ocorre a maior demanda hídrica da cultura (Andrade Júnior et al., 2017; Araújo, 2019). Oliveira et al. (2011) verificaram produtividades de colmos superiores a 140% para cana planta cultivada com irrigação plena em comparação às de sequeiro, devido a disponibilidade hídrica adequada durante todo o período de crescimento, disponibilizando nutrientes para as raízes.

Temperaturas extremas do ar, déficit ou excedente hídrico e deficiência de nitrogênio interferem na eficiência do uso de radiação solar e expansão do dossel da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, na produção de colmos (Dias et al., 2019). Logo, a disponibilidade de água no solo e a combinação com fatores climáticos, como a radiação solar, influenciam os processos fisiológicos da cana-de-açúcar.

Neste contexto, o desenvolvimento e utilização de modelos de predição é uma alternativa interessante para ajudar no entendimento das respostas das mais variadas culturas às diferentes condições ambientes nas quais são cultivadas, bem como na estimativa sua produtividade (Scarpate et al., 2012).

A obtenção de modelos de regressão linear múltipla permite identificar as variáveis que mais interferem no rendimento da cultura e realizar sua estimativa. Modelos agrometeorológicos, tendo como entrada dados mensais de temperatura do ar, precipitação, deficiência e excedente hídrico, evapotranspiração potencial e real,

armazenamento de água no solo e irradiação solar incidente (global) do ano anterior foram utilizados por Marcari et al. (2015), para realizar a estimativa do rendimento (TCH, toneladas de colmo por hectare) e qualidade (ATR; açúcar total recuperável) da cana-de-açúcar para o próximo ano. Os modelos de regressão linear múltipla com quatro variáveis apresentaram bom desempenho. Scarpari (2002) utilizou a precipitação, graus dia e graus dia negativo dos cinco meses anteriores à colheita na análise de regressão linear múltipla para previsão do rendimento da cana-de-açúcar. Andretta (2012) verificou influência das variáveis climáticas e água disponível no solo na produtividade da cana-de-açúcar, em eventos de El Niño e La Niña no Estado do Paraná. A associação foi verificada mediante análise de regressão linear múltipla das variáveis testadas no verão, outono, inverno e primavera.

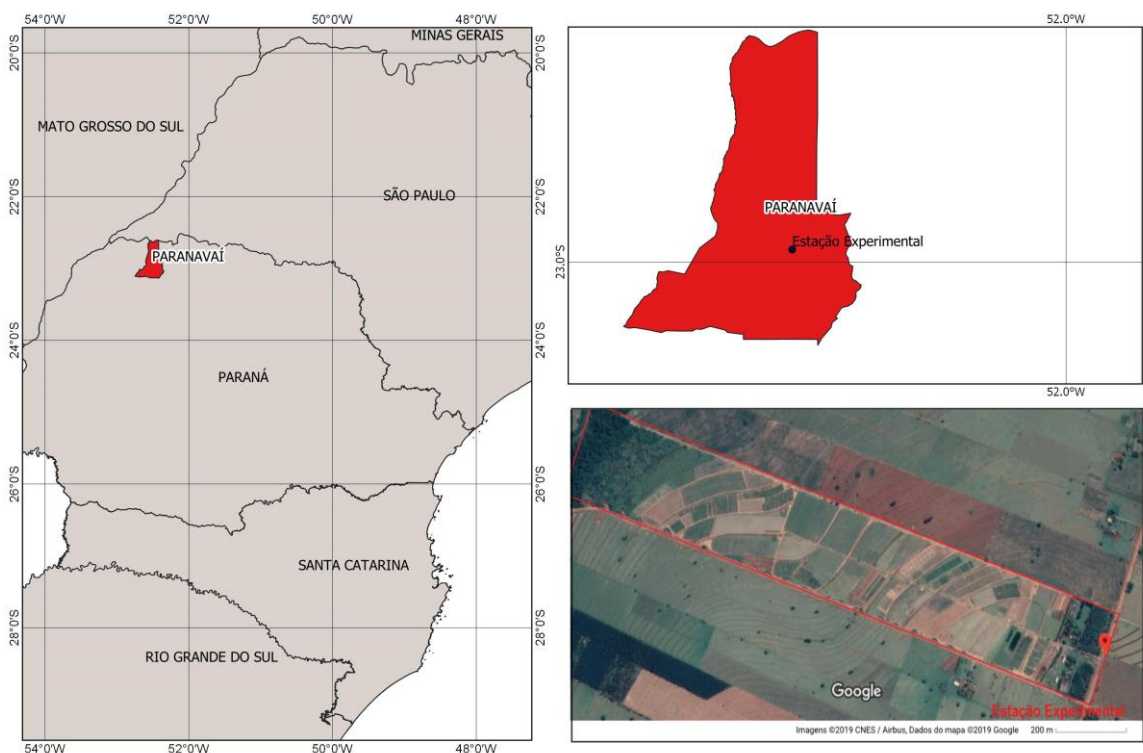
Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente estudo constituir um modelo multivariado de estimativa do rendimento da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas subtropical da região Noroeste do Paraná, considerando variáveis climáticas e o armazenamento da água no solo (*Arm*).

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Local de realização do trabalho

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/SCA/UFPR. As análises foram realizadas com os dados culturais de experimentos realizados na Estação Experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA), pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR) e integrante da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento Sucroenergético (RIDESA). A PMGCA está localizada à 22°58' Sul de latitude, 52°28' Oeste de longitude e 470 m de altitude média, no Município de Paranaíba, região Noroeste do Estado do Paraná (FIGURA 5.1). O clima da região segundo a classificação de Köppen é *Cfa* (clima subtropical), com temperatura média do ar anual entre 22,1 e 23,0 °C, e precipitação média anual entre 1400 e 1600 mm (Nitsche et al., 2019).

FIGURA 5.1 – LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROGRAMA DE MELHORAMENTO GENÉTICO DE CANA-DE-AÇÚCAR (PMGCA), PERTENCENTE À UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR) E INTEGRANTE DA REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUCROENERGÉTICO (RIDESA).



FONTE: a Autora (2022), adaptado do IBGE (2018) e Google Maps (2019).

5.4.2 Dados agrometeorológicos

Os dados agrometeorológicos de radiação solar incidente (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹), precipitação pluvial (P ; mm), temperaturas máxima (T_{max} ; °C), mínima (T_{min} ; °C) e média (T_{med} ; °C) do ar, umidade relativa do ar (UR ; %) e velocidade do vento (v ; m s⁻¹) são do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR), estação meteorológica de Paranavaí – PR, no período de 1997-2019.

5.4.3 Dados da cana-de-açúcar

Os rendimentos observados de cana-de-açúcar (TCH ; toneladas de colmo por hectare) foram obtidos em experimentos conduzido na área da Estação Experimental de Paranavaí, RIDESA, nas safras cana primeira soca (TABELA 5.1) de 1998-2006, 2008, 2018 e 2019.

TABELA 5.1 – RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR (*TCH*; toneladas de colmo por hectare), CICLO CANA SOCA, DAS VARIEDADES RB72454, RB867515, RB966928 E RB036066 DA RIDESA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ.

Observações	Ano	Variedade	<i>TCH</i> (t ha ⁻¹)
1	1998	RB72454	130,604
2	1999	RB72454	130,163
3	2000	RB72454	98,988
4	2001	RB72454	140,830
5	2002	RB72454	127,940
6	2003	RB72454	115,794
7	2004	RB72454	141,600
8	2005	RB72454	65,997
9	2006	RB72454	154,190
10	2006	RB72454	174,190
11	2008	RB72454	67,917
12	2004	RB867515	99,304
13	2005	RB867515	98,910
14	2006	RB867515	134,173
15	2018	RB867515	80,715
16	2019	RB867515	91,468
17	2004	RB966928	113,417
18	2005	RB966928	107,333
19	2018	RB966928	152,570
20	2019	RB966928	112,845
21	2019	RB966928	98,738
22	2018	RB036066	101,533
23	2019	RB036066	85,608

Fonte: PMGCA/UFPR/RIDESA (2019).

5.4.4 Ajuste do modelo de regressão linear múltipla

A análise de regressão linear múltipla (método *Stepwise*) foi realizada entre o rendimento da cana-de-açúcar (*TCH*; toneladas de colmo por hectare) e as variáveis: armazenamento de água no solo até 0,60 m de profundidade (*Arm*; cm); evapotranspiração de referência diária (*ET*; mm dia⁻¹); precipitação pluviométrica diária (*P*; mm); umidade relativa média diária do ar (*UR*; %); radiação solar incidente (*Rs*; MJ m⁻² dia⁻¹); saldo de radiação na superfície (*Rn*; MJ m⁻² dia⁻¹); temperaturas máxima (*Tmax*; °C), mínima (*Tmin*; °C) e média (*Tmed*; °C) diária do ar; e, graus-dia acumulado (*GDA*; °C). A análise foi realizada com o valor total (*P* e *GDA*) e mediana (*Arm*, *ET*, *UR*, *Rn*, *Rs*, *Tmax*, *Tmin* e *Tmed*) nas fases fenológicas da cana soca (Gurski et al., 2020), sendo: Fase I (julho-outubro; 93 dias), em que ocorre a brotação e intenso perfilhamento; Fase II (outubro-março; 160 dias), com o crescimento em estatura; e, Fase III (março-julho; 112 dias), com a diminuição do crescimento e acúmulo de sacarose. A mediana foi utilizada devido algumas variáveis não apresentarem distribuição normal, conforme análise de normalidade nas fases e anos do APÊNDICE 8.

O *Arm* foi simulado com o *software* HYDRUS-1D, durante as safras analisadas. O HYDRUS resolve numericamente a equação de Richards para o fluxo de água em meio saturado e insaturado (Simunek et al., 2009). O modelo de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980), incorporado ao HYDRUS, foi utilizado para determinar a relação entre condutividade hidráulica, umidade volumétrica e potencial matricial do solo. As variáveis meteorológicas de entrada no HYDRUS foram: precipitação pluvial; radiação solar incidente; temperatura máxima e mínima do ar; umidade relativa do ar; e, velocidade do vento. A evapotranspiração de referência foi calculada com a equação de Penman-Montheith (Allen et al., 1998), incorporada no programa.

Os graus-dia acumulados (*GDA*; °C dia) foram obtidos fazendo-se o somatório dos graus-dia (*GD*) durante o ciclo da cultura, calculados conforme Villa Nova et al. (1972). As temperaturas basais foram consideradas iguais à 19,0 °C, 23,5 °C e 18,5 °C nas Fases de desenvolvimento I, II e III da cana-de-açúcar, respectivamente.

$$GD = (T_{ni} - Tb_i) + \frac{(T_{xi} - T_{ni})}{2} \quad \text{para } T_{ni} > Tb_i$$

$$GD = \frac{(T_{xi} - Tb_i)^2}{2 \cdot (T_{xi} - T_{ni})} \quad \text{para } T_{ni} < Tb_i$$

$$GD = 0 \quad \text{para } T_{xi} < Tb_i$$

Sendo: *GD* – graus-dia (°C); *Tb_i* – temperatura base inferior da cultura (°C); *T_{xi}* – temperatura máxima do *i*-ésimo dia (°C); *T_{ni}* – temperatura mínima do *i*-ésimo dia (°C).

5.4.5 Análises estatísticas

As associações entre os valores observados (*Y*) e estimados (\hat{Y}) do rendimento da cana-de-açúcar (*TCH*) foram avaliadas com o erro e os coeficientes de determinação, calculados no *software* R (Versão 4.1.0; R Core Team, 2020):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}}$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})(Y_i - \bar{Y}))^2}{(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2) (\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}$$

Sendo: *MAE* – Erro absoluto médio (*TCH*; t ha⁻¹); \hat{Y}_i – *i*-ésimo valor da variável estimada (*TCH*; t ha⁻¹); Y_i – *i*-ésimo valor da variável observada (*TCH*; t ha⁻¹); *n* – número de dados da variável observada (unidades); *RMSE* – raiz quadrada do erro quadrado médio (*TCH*; t ha⁻¹); \bar{Y} – média dos valores da variável observada (*TCH*; t ha⁻¹); e, R^2 – coeficiente de determinação (adimensional). Na interpretação dos erros *MAE* e *RMSE* valores iguais ou próximos a zero indicam ajuste perfeito aos dados (Mangiafico, 2016).

A análise de regressão linear múltipla foi realizada com o método *Stepwise* e validação cruzada repetida (3 repetições) com *k-fold* = 5. As amostras foram divididas em 70% para parametrização e 30% para validação, utilizando os pacotes *caret* e *leaps* do R (Lumley e Miller, 2020; Kuhn, 2021). No modelo de regressão linear múltipla foi realizado a análise de variância, teste de normalidade (Shapiro-Wilk), multicolinearidade (VIF – *Variance Inflation Factor*) e homoscedasticidade (Breusch-Pagan). O desempenho estatístico da regressão linear múltipla foi avaliado mediante análise da significância dos coeficientes de regressão ($t < 0,05$) e dos modelos de regressão ($F < 0,05$), considerando a magnitude dos erros entre os valores observados e estimados com o modelo.

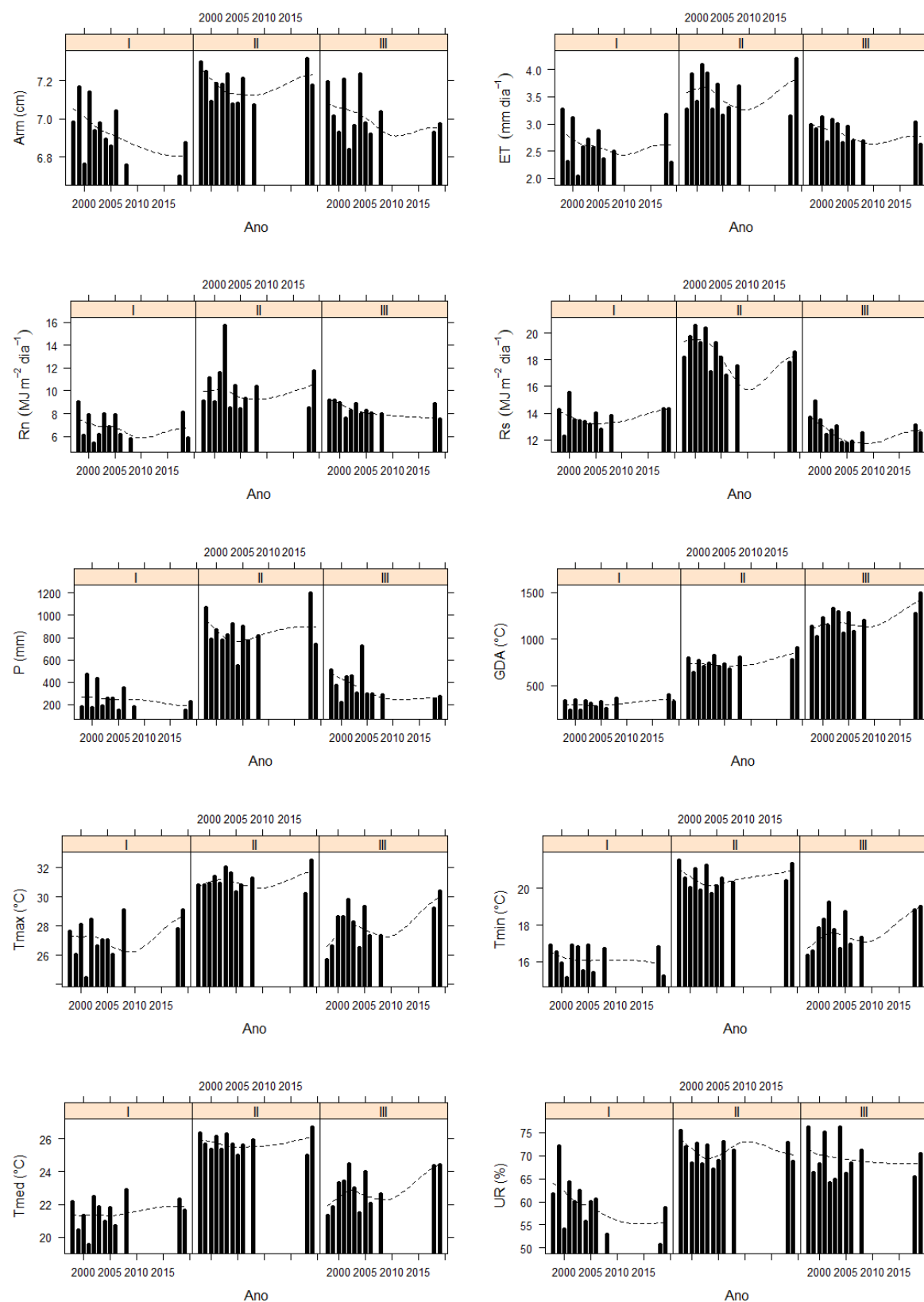
5.5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.5.1 Dados agrometeorológicos

A tendência das variáveis climáticas e do armazenamento de água no solo (*Arm*) nas fases fenológicas da cana soca e anos utilizados na análise de regressão linear múltipla encontra-se na FIGURA 5.2. As variáveis *Arm*, *ET*, *Rn*, *Rs*, *P*, *Tmax*, *Tmin* e *Tmed* apresentaram maiores magnitudes na Fase II de desenvolvimento da cana soca.

Araújo (2019) considerou que os maiores rendimentos da cana-de-açúcar estão associados à altas temperaturas médias, precipitação elevadas e uniformes na fase de crescimento vegetativo pleno.

FIGURA 5.2 – VARIÁVEIS CLIMÁTICAS (ET , R_n , R_s , P , GDA , T_{max} , T_{min} , T_{med} e UR) E ARMAZENAMENTO DA ÁGUA NO SOLO (Arm) NAS FASES DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR (MEDIANA E ACUMULADO), CICLO CANA SOCA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ (Linha tracejada corresponde a tendência).



FONTE: a Autora (2022).

No presente estudo, as maiores temperaturas médias do ar e precipitações pluviométricas coincidiram com a Fase II de crescimento dos colmos da cana-de-açúcar, com exceção da P_{II} que foi inferior a P_{III} no ano de 2004. Araújo (2019) considera que o ciclo da cultura deve coincidir com as melhores condições meteorológicas.

Andrade Júnior et al. (2017) encontraram evapotranspiração de referência diária de $5,24 \pm 1,27$ mm dia⁻¹ na fase de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, período em que ocorreu a maior demanda hídrica da cana-soca da variedade RB867515, na microrregião de Teresina, Piauí. Nas condições climáticas de Paranaíba-PR, também foi observado maior evapotranspiração de referência (ET), na Fase II de desenvolvimento da cana soca.

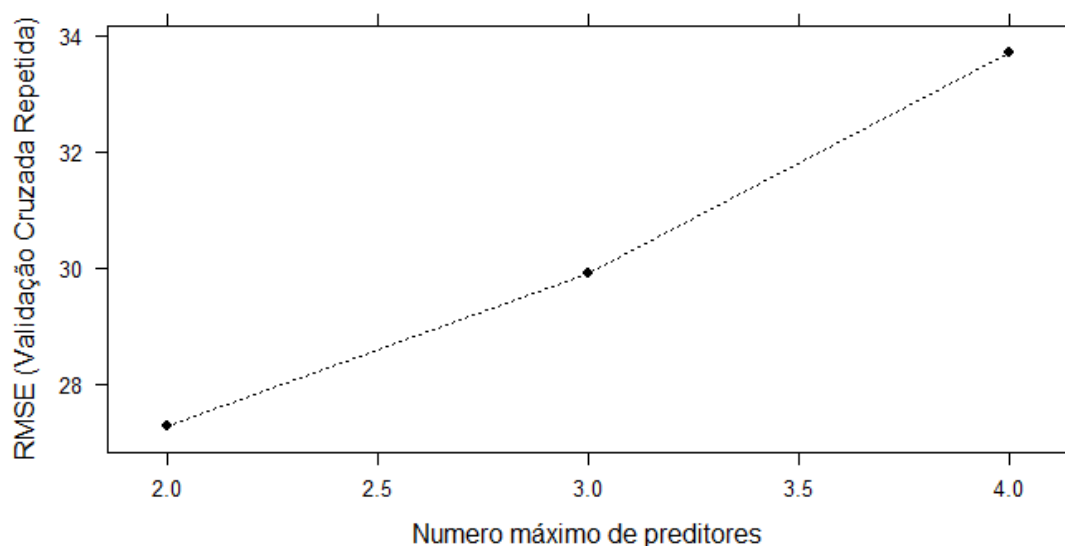
Abreu et al. (2013) verificaram que irregularidades das precipitações pluviométricas em clima tropical proporcionaram respostas distintas no desenvolvimento e na produtividade de variedades de cana-de-açúcar, em ciclos de cultivo. As variedades RB93509 e RB931003 foram identificadas pelos autores para o manejo varietal da região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. Nas condições experimentais, as precipitações também foram irregulares durante o ciclo cana soca, em clima subtropical.

5.5.2 Regressão linear múltipla

O $RMSE$ foi usado para selecionar o modelo ideal na análise de regressão linear múltipla com validação cruzada repetida. O menor $RMSE$ correspondeu ao modelo com dois preditores (FIGURA 5.3).

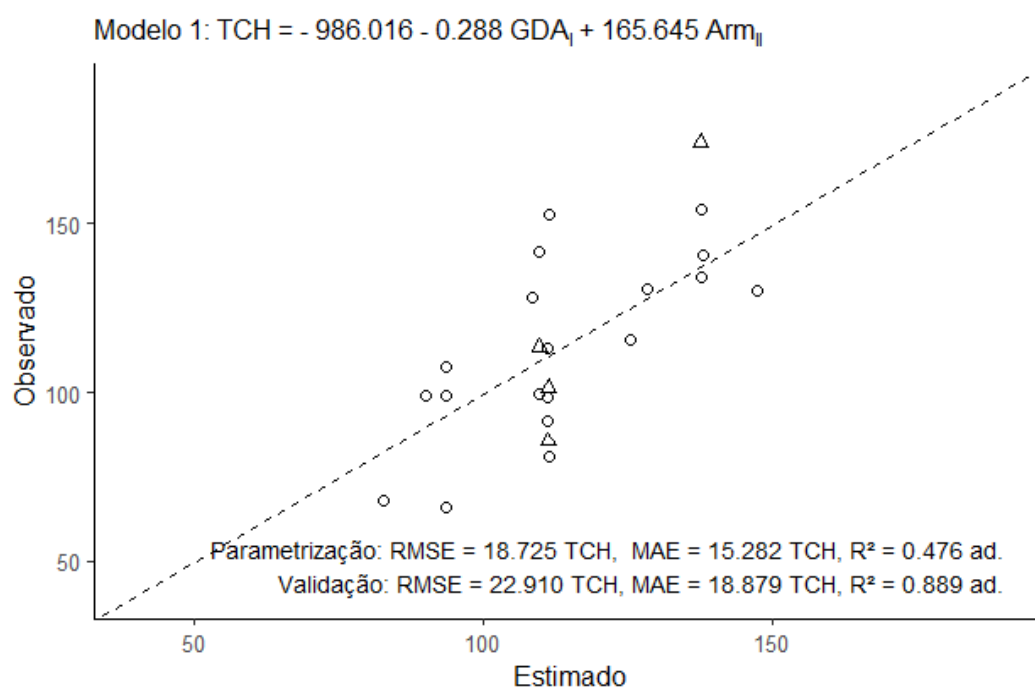
Os graus dia acumulado (GDA_I , °C) e armazenamento de água no solo (ARM_{II} , cm) nas Fases I e II de desenvolvimento da cana-de-açúcar foram selecionadas na análise e constituiu o melhor modelo com dois preditores (FIGURA 5.4). Os coeficientes de regressão das variáveis GDA_I e ARM_{II} apresentaram significância estatística ($p < 0,05$) no modelo de regressão linear múltipla (TABELA 5.2).

FIGURA 5.3 – RMSE DA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA PARA SELECIONAR O NÚMERO MÁXIMO DE PREDITORES DOS MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DE ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR (*TCH*, toneladas de colmo por hectare), DA CANA SOCA, VARIEDADES RB72454, RB867515, RB966928 E RB036066.



FONTE: a Autora (2022).

FIGURA 5.4 – PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DE ESTIMATIVA DO RENDIMENTO (*TCH*, toneladas de colmo por hectare) DA CANA SOCA, VARIEDADES RB72454, RB867515, RB966928 E RB036066 (o: Parametrização e Δ : Validação).



FONTE: a Autora (2022).

TABELA 5.2 – COEFICIENTES DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA AJUSTADOS AO RENDIMENTO (*TCH*, toneladas de colmo por hectare) DA CANA SOCA, VARIEDADES RB72454, RB867515, RB966928 E RB036066, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ.

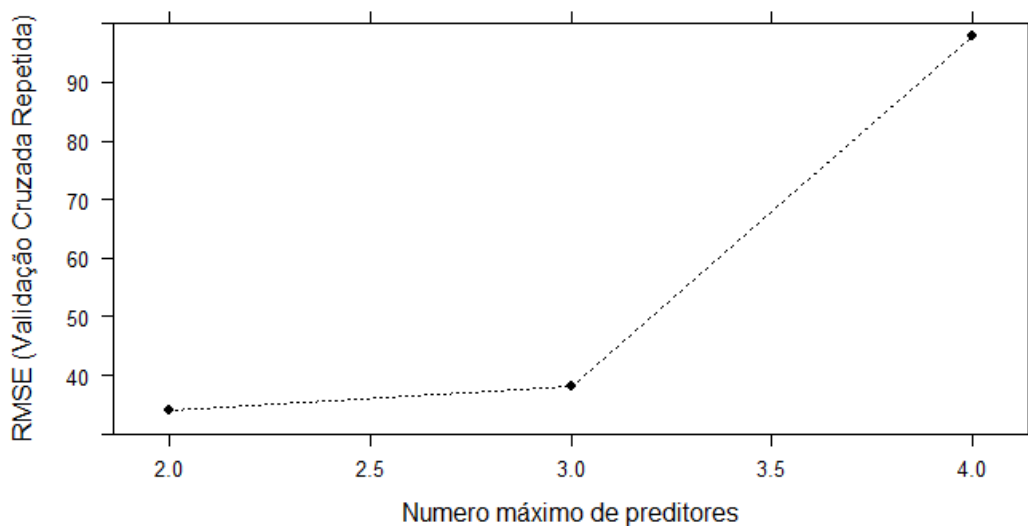
Coeficiente ⁽¹⁾	Estimado	Estimado padronizado	Erro ⁽²⁾	<i>t</i> ⁽³⁾	<i>Pr</i> (> <i>t</i>) ⁽⁴⁾	<i>R</i> ² _{ajust.} ⁽⁶⁾
α	-986,016	0,000	412,180	-2,392	0,029*	
<i>GDA_I</i>	-0,288	-0,536	0,098	-2,928	0,010*	0,410
<i>Arm_{II}</i>	165,645	0,524	57,961	2,858	0,011*	

⁽¹⁾ α – coeficiente de regressão, que representa o intercepto; *GDA_I* – Graus-dia acumulado na Fase I (°C); *Arm_{II}* – Armazenamento de água no solo até 60 cm (cm), na Fase II; ⁽²⁾ Erro – erro padrão (unidade da variável); ⁽³⁾ *t* – valores do teste *t* de Student (adimensional); ⁽⁴⁾ *Pr*(> |*t*) – probabilidade de significância; * Significativo à 5% de probabilidade; ⁽⁵⁾ *R*²_{ajust.} – Coeficiente de determinação ajustado (adimensional). *p*-valor = 0,00572 da estatística *F*.

O coeficiente de determinação (*R*²) explicou 48% e 89% da variação do rendimento da cana-de-açúcar na parametrização e validação do modelo, respectivamente. A diferença varietal também interferiu nas análises, sendo (Daros et al., 2015): RB72454 – boa produtividade agrícola em qualquer tipo de solo, maturação média, alto teor de sacarose; RB867515 – alto teor de sacarose e alta produtividade agrícola, recomendada em áreas com solos de baixa fertilidade, arenosos e com restrições hídricas; RB966928 – produção agrícola alta, maturação precoce a média, médio teor de sacarose, elevada sanidade às principais doenças; e, RB036066 – alta produção agrícola, maturação média, ampla adaptabilidade e estabilidade da produção. Na análise de regressão linear múltipla com validação cruzada repetida para variedade RB72454, o menor *RMSE* também correspondeu ao modelo com dois preditores (FIGURA 5.5). A análise de regressão linear múltipla foi realizada apenas para variedade RB72454, devido ao número de observações do rendimento da cana-de-açúcar (11 observações no total) para permitir a realização dos processos de parametrização e validação (TABELA 5.1).

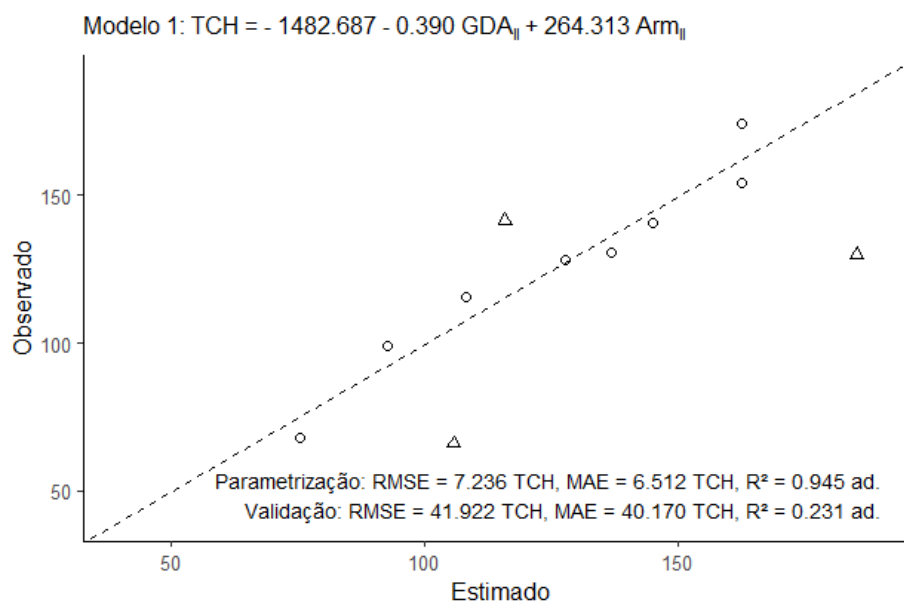
As variáveis graus dia acumulado (*GDA_{II}*, °C) e armazenamento de água no solo (*ARM_{II}*, cm) na Fase fenológica II da cana soca foram selecionadas na análise e constituíram o melhor modelo com dois preditores para variedade RB72454 (FIGURA 5.6). Os coeficientes de regressão das variáveis *GDA_{II}* e *ARM_{II}* apresentaram significância estatística (*p* < 0,05) no modelo de regressão linear múltipla (TABELA 5.3).

FIGURA 5.5 – *RMSE* DA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA, PARA SELECIONAR O NÚMERO MÁXIMO DE PREDITORES DOS MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PARA ESTIMATIVA DO RENDIMENTO (*TCH*, toneladas de colmo por hectare) DA CANA SOCA, VARIEDADE RB72454.



FONTE: a Autora (2022).

FIGURA 5.6 – PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PARA ESTIMATIVA DO RENDIMENTO (*TCH*, toneladas de colmo por hectare) DA CANA SOCA, PARA A VARIEDADE RB72454 (○: Parametrização e Δ: Validação).



FONTE: a Autora (2022).

TABELA 5.3 – COEFICIENTES DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA AJUSTADOS AO RENDIMENTO (*TCH*, toneladas de colmo por hectare) DA CANA SOCA, VARIEDADE RB72454, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ.

Coeficiente ⁽¹⁾	Estimado	Estimado padronizado	Erro ⁽²⁾	<i>t</i> ⁽³⁾	<i>Pr</i> (> <i>t</i>) ⁽⁴⁾	$R^2_{ajust.}$ ⁽⁶⁾
α	-1482,687	0,000	345,400	-4,292	0,008*	
GDA_{II}	-0,390	-0,713	0,058	-6,746	0,001*	0,922
Arm_{II}	264,313	0,593	47,120	5,610	0,002*	

⁽¹⁾ α – coeficiente de regressão, que representa o intercepto; GDA_{II} – Graus-dia acumulado (°C), na Fase II; Arm_{II} – Armazenamento de água no solo até 60 cm (cm), na Fase II; ⁽²⁾ Erro – erro padrão (unidade da variável); ⁽³⁾ *t* – valores do teste *t* de Student (adimensional); ⁽⁴⁾ *Pr*(> |*t*) – probabilidade de significância; * Significativo à 5% de probabilidade; ⁽⁵⁾ $R^2_{ajust.}$ – Coeficiente de determinação ajustado (adimensional). *p*-valor = 0,0007204 da estatística *F*.

O coeficiente de determinação (R^2) explicou 95% e 23% da variação do rendimento da variedade RB72454 na parametrização e validação do modelo, respectivamente. O modelo ajustado para a variedade RB72454 na validação, apresentou os maiores *RMSE* e *MAE* e menor variação explicada. No entanto, o efeito das variáveis selecionadas deve ser considerado devido a significância estatística (Scarpari, 2002). As variações climáticas durante os anos analisados é um fator que interferiu na variação explicada do modelo para variedade RB72454 ($Pr(>F) < 0,01$; FIGURA 5.2), bem como outros fatores que não foram considerados como doenças e pragas.

Os graus dia acumulado (GDA_{II}) e o armazenamento de água no solo (Arm_{II}) na Fase II de desenvolvimento exerceram influência no rendimento da cana soca da variedade RB72454. Os graus dia acumulado na Fase I (GDA_I) e o armazenamento de água no solo na Fase II (Arm_{II}) apresentaram efeito significativo no rendimento das variedades RB72454, RB867515, RB966928 e RB036066 em cana de primeira soca, nas condições edafoclimáticas de Paranaíba-PR. A identificação das variáveis do clima e solo que influenciam no rendimento da cana-de-açúcar é indispensável para modelos complexos e grande número de parâmetros. Os modelos de crescimento de cultura (Scarpari et al., 2012) são fundamentais para o melhoramento genético e incrementos no rendimento da cultura. Os resultados obtidos nos experimentos desenvolvidos na Estação Experimental PMGCA/UFPR e RIDESA são referência para o planejamento agrícola da cana-de-açúcar.

Scarpari (2002) verificou que as variáveis selecionadas na modelagem indicaram que a precipitação do primeiro, segundo, quarto e quinto mês e os graus dia no quarto mês anterior a colheita exerceram efeito significativo no rendimento da

cana-de-açúcar nas safras 1999/2000, 2000/2001 e 2001/2002, no município de Pontal, São Paulo. A precipitação foi a variável com maior peso nos modelos de previsão do rendimento da cana-de-açúcar, confirmando a importância da umidade do solo na produção de colmos.

O estresse hídrico durante o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar restringe os processos fisiológicos, como a sua divisão celular e alongação, reduzindo conseqüentemente a massa seca da parte aérea (Inman-Bamber, 2004). Em condições de estresse hídrico severo ($-1500 < \psi < -1100$ kPa) a taxa de transpiração diária da cana-de-açúcar reduziu aproximadamente 73% em comparação com as plantas cultivadas sob plena disponibilidade de água. Com o estresse hídrico severo e valores elevados de radiação solar global, a temperatura foliar atingiu até 6,6 °C acima da temperatura do ar (Trentin et al., 2011).

Resultados de pesquisas reafirmam a importância da temperatura do ar e disponibilidade de água no solo para o rendimento da cana-de-açúcar. Andretta (2012) verificou que a média da temperatura mínima na primavera, soma da precipitação no inverno, soma do excesso de água no solo no outono e verão e a soma da deficiência de água no solo no verão constituíram o modelo de estimativa da produtividade média anual de Paranaíba-PR, que explicou 98% da variação (R^2 ajustado = 0,982). Os graus dia acumulado é um parâmetro utilizado em modelo de simulação de crescimento e produção da cana-de-açúcar (Marin e Jones, 2014) e variação do acúmulo de matéria seca da parte aérea (Batista et al., 2013). O modelo estabelecido no presente estudo, com os graus dia acumulado e o armazenamento de água no solo, confirmou a importância das duas variáveis no rendimento da cana soca, devido à influência no crescimento e desenvolvimento da cultura.

As variáveis climáticas e o armazenamento de água no solo nas fases de desenvolvimento apresentam capacidade para prever o rendimento da cana-de-açúcar, sendo relevante analisar e constituir modelos para cada variedade, pois respondem diferente as condições climáticas e do solo que são submetidas, como o déficit hídrico (Holanda et al., 2014), irrigação plena (Oliveira et al., 2011) e radiação fotossintética interceptada (Ferreira Junior et al., 2012).

O número de observações também é um fator importante na proposição de modelos que explicam o rendimento da cana-de-açúcar. Como verificado no

presente estudo, o número reduzido de observações das variedades RB867515, RB966928 e RB036066 limitou a parametrização e validação de cada variedade.

A magnitude das variáveis explicativas utilizadas para constituir modelos também influencia na capacidade de prever o rendimento da cana-de-açúcar. Scarpari (2002) não conseguiu estabelecer um modelo preditivo considerando a precipitação pluviométrica, graus dia e graus dia negativo dos cinco meses anterior a colheita. No entanto, com essas variáveis foram estabelecidos dois modelos de previsão da maturação da cana-de-açúcar. Cardozo e Sentelhas (2013) consideraram que na fase de maturação da cana-de-açúcar as variáveis mais relevantes foram a umidade do solo e a temperatura do ar, sendo que a combinação estimula a intensidade do processo. Temperaturas menores que 20 °C diminuíram o crescimento e aumentam o acúmulo de sacarose (Scarpari; Beauclair, 2004 e 2009).

Considera-se que pesquisas futuras de modelagem das variáveis morfológicas (massa seca da parte aérea e das raízes, altura da planta, diâmetro, área foliar) em relação as variáveis do clima e solo durante as fases fenológicas da cultura são relevantes para identificar as variáveis que mais interferem no desenvolvimento e, conseqüentemente, no rendimento da cana-de-açúcar.

5.6 CONCLUSÕES

- Os graus dia acumulado nas Fases I e II e o armazenamento de água no solo na Fase II de desenvolvimento exercem efeito significativo no rendimento da cana-de-açúcar.
- O modelo de regressão linear múltipla com os graus dia acumulado (GDA_I) e o armazenamento de água no solo (Arm_{II}) nas Fases I e II de desenvolvimento apresenta capacidade preditiva do rendimento da cana-de-açúcar das variedades analisadas.

5.7 REFERÊNCIAS

- ABREU, M. L.; SILVA, M. A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L. A.; SAMPAIO NETO, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v.72, n.3, p.262-270, 2013.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome: FAO, 297p. 1998.
- ANDRADE JUNIOR, A. S.; NOLETO, D. H.; BASTOS, E. A.; MOURA, M. S. B.; ANJOS, J. C. R. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.217-226, 2017.
- ANDRETTA, R. L. **Influência de variáveis climáticas, da água disponível no solo, e dos eventos El Niño e La Niña na produtividade da cana-de-açúcar no Estado do Paraná**. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, Curitiba, 2012.
- ARAÚJO, R. M. **Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar na região sul do Brasil**. 101 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, Curitiba, 2019.
- BATISTA, E. L. S.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; LYRA, G. B.; SILVA, T. G. F.; BOEHRINGER, D. Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.10, p.1080-1087, 2013.
- CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agrícola**, v.70, n.6, 2013.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v.8, Safra 2021/22, n.2 – Segundo levantamento, Brasília, p.1-63, 2021.
- DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A.; BARBOSA, G. V. S. (organizadores). 45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa. 1. ed., Curitiba: Graciosa, 2015. 156 p.
- DIAS, H. B.; INMAN-BAMBER, G.; BERMEJO, R.; SENTELHAS, P. C.; CHRISTODOULOU, D. New APSIM-Sugar features and parameters required to account for high sugarcane yields in tropical environments. **Field Crops Research**, v.235, p.38-53, 2019.
- FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; SANTOS, M. A.; PORFIRIO, A. C. S. Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1229-1236, 2012.

Google Maps. Google. 2019. “Estação Experimental da UFPR”. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.9762068,-52.4722051,971m/data=!3m1!1e3>>.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERG, E.; OLIVEIRA, R. A. Water requirements and restrictions to sugarcane in cane plants and ratoon cane cycles in Southern Brazil. **Acta Agronômica**, v.69, n.2, p.135-143, 2020.

HOLANDA, L. A.; SANTOS, C. M.; SAMPAIO NETO, G. D.; SOUSA, A. P.; SILVA, M. A. Variáveis morfológicas da cana-de-açúcar em função do regime hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Irriga**, Botucatu, v.19, n.4, p.573-584, 2014.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha territorialis do Brasil**, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>>.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p.107-122, 2004.

KUHN, M. **caret: Classification and Regression Training**. R package version 6.0-90. <https://CRAN.R-project.org/package=caret>. 2021.

LUMLEY, T. based on Fortran code by MILLER, A. (2020). **leaps: Regression Subset Selection**. R package version 3.1. <https://CRAN.R-project.org/package=leaps>, 2020.

MANGIAFICO, S. S. **Summary and Analysis of Extension Program Evaluation in R, version 1.18.1**. <https://rcompanion.org/handbook/>. 2016.

MARCARI, M. A.; ROLIM, G. S.; APARECIDO, L. E. O. Agrometeorological models for forecasting yield and quality of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**. v.9, n.11, p.1049-1056, 2015.

MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, v.71, n.1, p.1-16, 2014.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C.; SIMÕES NETO, D. E.; ROCHA, A. T.; CARVALHO, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.6, p.617-625, 2011.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, 2020.

SCARPARE, F. V.; VAN LIER, Q. J.; CORRÊA, S. T. R.; BARROS, A. H. C.; MARIN, F. R.; NASSIF, D. S. P. Modelos de crescimento da cana-de-açúcar e sua parametrização – revisão. **Revista de Agricultura**, v.87, n.1, p.66-80, 2012.

SCARPARI, M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos.** Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, v.61, n.5, p.486-491, 2004.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAIATO, H.; SAKAI, M.; van GENUCHTEN, M. T. **The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Version 4.08.** University of California Riverside, Riverside, 2009. 330p.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1085-1095, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VILLA NOVA, N. A.; PEDRO JUNIOR, M. J.; PEREIRA, A. R.; OMETTO, J. C. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base em função das temperaturas máxima e mínima. **Ciência da Terra**, n.30, p.1-8, 1972.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Nos solos arenosos analisados, as frações areia grossa e fina precisam ser mensuradas para melhorar a avaliação dos atributos físico-hídrico do solo. Os maiores teores de areia grossa interferem no aumento da condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado, diâmetro máximo dos poros e macroporosidade, bem como na redução da microporosidade. Os teores de areia fina reduzem a condutividade e aumentam a retenção de água no solo, nas camadas subsuperficiais.

A temperatura basal inferior (Tb) das três variedades de cana-de-açúcar analisadas variou entre $20,5 \leq Tb \leq 23,0$ °C na Segunda Fase de desenvolvimento. Na Terceira Fase de desenvolvimento, a Tb foi de 15,5 e 15,0 °C para as variedades RB036066 e RB966928, respectivamente. O modelo linear não foi significativo para a variedade RB867515.

A densidade de comprimento radicular e o volume radicular da cana-de-açúcar são maiores na camada de 0-0,20 m. As raízes finas estão distribuídas em profundidade. Os modelos ajustados à profundidade efetiva que consideram os dias após plantio (DAP), dias julianos (J) e graus-dia acumulado (GDA) não são satisfatórios. O modelo logístico é bom para estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar nos dias após o plantio (DAP). A regressão linear múltipla, com as variáveis climáticas e o armazenamento de água no solo, apresenta capacidade preditiva da profundidade efetiva radicular da cana-de-açúcar.

Os graus dia acumulado nas Fases I e II e o armazenamento de água no solo na Fase II de desenvolvimento exercem efeito significativo no rendimento da cana-de-açúcar. O modelo de regressão linear múltipla, com os graus dia acumulado (GDA_I) e o armazenamento de água no solo (Arm_{II}) nas Fases I e II de desenvolvimento, apresenta capacidade preditiva do rendimento da cana-de-açúcar das variedades analisadas.

7 REFERÊNCIAS GERAIS

ABREU, M. L.; SILVA, M. A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L. A.; SAMPAIO NETO, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v.72, n.3, p.262-270, 2013.

ALENCAR, L. P. **Parametrização e validação do modelo Aquacrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 117 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa, 2014.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome: FAO, 297p. 1998.

AMARAL, M. A. C. M.; COELHO, R. D.; VIEIRA JOSÉ, J.; OLIVERIRA, A. S. Temperatura base e taxa de crescimento de oito variedades de cana-de-açúcar. **Revista GEAMA**, v.5, n.1, p.21-29, 2019.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; NOLETO, D. H.; BASTOS, E. A.; MOURA, M. S. B.; ANJOS, J. C. R. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.217-226, 2017.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.111-116, 2011.

ANDRETTA, R. L. **Influência de variáveis climáticas, da água disponível no solo, e dos eventos El Niño e La Niña na produtividade da cana-de-açúcar no Estado do Paraná**. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, Curitiba, 2012.

AQUINO, G. S.; MEDINA, C. C.; PORTEIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O.; SANTOS JUNIOR, J.; ALMEIDA, L. F.; SANTIAGO, A. D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.12, p.1150-1159, 2015.

ARAÚJO, R. M. **Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar na região sul do Brasil**. 101 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – (Produção Vegetal), Curitiba, 2019.

ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A.; SUAREZ, A. H. T.; COLMAN, B. A.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.6, n.1, p.41-47, 2019.

AULER, A. C.; ROMANIW, J.; SÁ, J. C. M.; PIRES, L. F.; HARTMAN, D. C.; INAGAKI, T. M.; ROSA, J. A. Improvement on soil structure and water retention after application of industrial organic waste as a crop fertilizer. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p.2771-2783, 2020.

BARBOSA, L. C. **Atributos físicos do solo e desenvolvimento radicular à cana-planta em diferentes sistemas de manejo**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, 2015.

BATISTA, E. L. S.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; LYRA, G. B.; SILVA, T. G. F.; BOEHRINGER, D. Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.10, p.1080-1087, 2013.

BERTON, G. S.; OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BRASILEIRO, B. P.; IDO, O. T.; RUARO, L.; WEBER, H. RB036091 - an early-maturing sugarcane cultivar for the Central South of Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.20, n.2, 2020.

BORG, H.; GRIMES, D. W. Depths development of roots with time: an empirical description. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v.29, p.194-197, 1986.

BORGES, C. E.; CAZETTA, J. O.; SOUSA, F. B. F.; OLIVEIRA, K. S. Aluminum toxicity reduces the nutritional efficiency of macronutrients and micronutrients in sugarcane seedlings. **Ciência e Agrotecnologia**, v.44, p.1-18, 2020.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **American Institute Mining and Metallurgy Engineering**, v.198, 1953.

BUSO, P. H. M.; KOEHLER, H. S.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; IDO, O. T.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; WEBER, H.; OLIVEIRA, R. A.; ZENI NETO, H. O sistema radicular da variedade RB855536 de cana-de-açúcar no plantio em minitolete e tolete. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, n.5, p.343-349, 2009.

CABRAL, M. C. M; CARVALHO, L. A.; NOVAK, E.; SCHICARELLI, C. D. S. Sistema de preparo de solo em área de reforma de canavial e as alterações físicas do solo. **Revista Agrarian**, v.8, n.30, p.376-386, 2015.

CAETANO, J. M. **Modelagem agrometeorológica da cana-de-açúcar nas condições edafoclimáticas do Centro-Oeste Goiano**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos (EAEA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia, 2017.

CAMPBELL, G. S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F. R.; JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru: ICRISAT, p.15-26, 1988.

CARDOZO, N. P. **Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas**. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.

CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, v.70, n.6, p.449-456, 2013.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1541-1549, 2011.

CHAUDHARI, P. R.; AHIRE, D. V.; AHIRE, V. D.; CHKRAVARTY, M.; MAITY, S. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 3, 2013.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v.267, p.156-168, 2016.

CHOPART, J.-L.; RODRIGUES, S. R.; AZEVEDO, M. C.; MEDINA, C. C. Estimating sugarcane root length density through root mapping and orientation modelling. **Plant Soil**, v.313, p.101-112, 2008.

CIVIERO, J. C. **Espaçamento de plantio da cana-de-açúcar, em Latossolo Vermelho Amarelo, no Estado do Paraná**. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – (Produção Vegetal), Curitiba, 2014.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v.8, Safra 2021/22, n.3 – Terceiro levantamento, Brasília, p.1-63, 2021.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v.8, Safra 2021/22, n.2 – Segundo levantamento, Brasília, p.1-63, 2021.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v.8, Safra 2021/22, n.1 – Primeiro levantamento, Brasília, p.1-56, 2021.

COSTA, A. C. S.; SOUZA JUNIOR, I. G.; CANTON, L. C.; GIL, L. G.; FIGUEIREDO, R. Contribution of the chemical and mineralogical properties of sandy-loam tropical soils to the cation exchange capacity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.44, 2020.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; PÉRTILE, P.; SILVA, F. R. Water retention and availability in soils of the state of Santa Catarina-Brazil: effect of textural classes, soil classes and lithology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p.1535-1548, 2013.

COSTA, M. C. G. **Distribuição e crescimento radicular em soqueiras de cana-de-açúcar: dois cultivares em solos com características distintas**. 88 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R. Influence of soil type on the wilting of plants. **International Agrophysics**, v. 27, p.385-390, 2013.

DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A.; BARBOSA, G. V. S. (organizadores). 45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa. 1. ed., Curitiba: Graciosa, 2015. 156 p.

DAROS, E.; OLIVERIA, R. A.; ZAMBON, J. L. C.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BRASILEIRO, B. P.; IDO, O. T.; RUARO, L.; WEBER, H. RB036066 - a sugarcane cultivar with high adaptability and yield stability to Brazilian South-Central region. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.18, n.3, 2018.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil & Tillage Research**, v.57, 2001.

DIAS, H. B.; INMAN-BAMBER, G.; BERMEJO, R.; SENTELHAS, P. C.; CHRISTODOULOU, D. New APSIM-Sugar features and parameters required to account for high sugarcane yields in tropical environments. **Field Crops Research**, v.235, p.38-53, 2019.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. de; BALIEIRO, F. de C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAUJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1003-1020, 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306 p. FAO. **Irrigação e Drenagem**, 33.

DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. J. **Programa para elaboração do balanço hídrico para culturas anuais e perenes**. Piracicaba: ESALQ/USP. Departamento de Agricultura, 1991. 58p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

FARIA, J. C.; JELIHOVSCHI, E. G.; ALLAMAN, I. B. **fdth: Frequency Distribution Tables, Histograms and Polygons**. UESC, Bahia, Brasil, 2020.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, p.185-212, 2009.

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; SANTOS, M. A.; PORFIRIO, A. C. S. Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de

variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1229-1236, 2012.

FERREIRA, M. Caracterização física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed.). **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., 2010, p. 1-27.

FIDALSKI, J. Disponibilidade de água e comportamento físico dos solos da Formação Arenito Caiuá. In: **V Reunião Paranaense de Ciência do Solo e II Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos**. 2017, Maringá. Livro eletrônico. Curitiba: SBCS/NEPAR; Londrina: IAPAR.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; AULER, P. A. M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos das Formações Caiuá e Paranavaí. **Revista Brasileira Ciência de Solo**, v.37, p.613-621, 2013.

GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, H. V.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, v. 337, p.1126-1135, 2019.

GIASSON, E. Introdução ao estudo dos solos. In: Meurer E. J.; Editor. **Fundamentos de Química do Solo**. 6ª. Ed. Porto Alegre: 2017. p.11-28.

Google Maps. Google. 2019. "Estação Experimental da UFPR". Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.9762068,-52.4722051,971m/data=!3m1!1e3>>.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v.36, p.664-668, 2006.

GUERRA, A.; BARBOSA, A. M.; GUIDORIZI, K. A.; SOUZA, G. M. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. **Revista Agrarian**, v.7, n.24, p.211-217, 2014.

GURSKI, B. C. **Funções destinadas ao estudo e estimativa das relações hídricas para o aprimoramento do balanço hídrico agrícola**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, A. W. P.; JERSZURKI, D.; ARMINDO, R. A. Modelos para estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho. **Irriga**, Edição Especial, p.155-167, 2016.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERG, E.; OLIVEIRA, R. A. Water requirements and restrictions to sugarcane in cane plants and ratoon cane cycles in Southern Brazil. **Acta Agronómica**, v.69, n.2, p.135-143, 2020.

HELBEL JUNIOR, C.; FIDALSKI, J. Parâmetros técnicos sobre o armazenamento de água no solo na Região Noroeste do Paraná. In: **V Reunião Paranaense de**

Ciência do Solo e II Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos. 2017, Maringá. Livro eletrônico. Curitiba: SBCS/NEPAR; Londrina: IAPAR.

HOLANDA, L. A.; SANTOS, C. M.; SAMPAIO NETO, G. D.; SOUSA, A. P.; SILVA, M. A. Variáveis morfológicas da cana-de-açúcar em função do regime hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Irriga**, Botucatu, v.19, n.4, p.573-584, 2014.

HORIKOSHI, M; TANG, Y. **ggfortify: Data Visualization Tools for Statistical Analysis Results.** <https://CRAN.R-project.org/package=ggfortify>, 2016.

HSIAO, T. C.; FERERES, E.; STEDUTO, P.; RAES, D. 3.3 AquaCrop parameterization, calibration, and validation guide. In: **Crop yield response to water.** Irrigation and Drainage Paper Nr. 66, FAO, Rome, Italy. 2012, 500p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malha territoriais do Brasil, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>>.

IDO, O. T.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; BUSO, P. H. M.; OLIVEIRA, R. A. Crescimento e distribuição radicial de três variedades cultivares de cana-de-açúcar, em cana-soca, em dois tipos de solo, em Rizotron, i. uso do Winrhizo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.7, p.21-26, 2006.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p.107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v.36, n.1, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N. G.; JACKSON, P. A.; STOKES, C. J.; VERRALL, S.; LAKSHMANAN, P.; BASNAYAKE, J. Sugarcane for water-limited environments: Enhanced capability of the APSIM sugarcane model for assessing traits for transpiration efficiency and root water supply. **Field Crops Research**, v.196, p.112-123, 2016.

JADCZYSZYN, J.; NIEDZWIECKI, J. Relation of Saturated Hydraulic Conductivity to Soil Losses. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 14, n. 4, p.431-435, 2005.

JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. **An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R.** Second Edition, Springer, 2014.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal.** 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 452p.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações Solo Planta.** 1 ed., São Paulo, Agronomia Ceres, 262p., 1979.

KUHN, M. **caret: Classification and Regression Training.** R package version 6.0-90. <https://CRAN.R-project.org/package=caret>. 2021.

LIBARDI, P. L. Água no solo. In: JONG VAN LIER, Q. (Ed.). **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., 2010, p. 101-152.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

LOPES, I. M.; ZIVIANI, M. M.; PINTO, L. A. S.; PINHEIRO, E. F. M.; WEBER, H.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E.; CAMPOS, D. V. B. Agregação e distribuição do carbono nos agregados de Latossolo Vermelho sob diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar em Paranavaí (PR). **Revista Virtual de Química**, n.9, v.5, 2017.

LUMLEY, T. based on Fortran code by MILLER, A. (2020). **leaps: Regression Subset Selection**. R package version 3.1. <https://CRAN.R-project.org/package=leaps>, 2020.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.495-502, 2008.

MANGIAFICO, S. S. **rcompanion: Functions to Support Extension Education Program Evaluation**. R package version 2.3.25. <https://CRAN.R-project.org/package=rcompanion>, 2020.

MANGIAFICO, S. S. **Summary and Analysis of Extension Program Evaluation in R, version 1.18.1**. <https://rcompanion.org/handbook/>. 2016.

MANHÃES, C. M. C.; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, p.163-181, 2015.

MARCARI, M. A.; ROLIM, G. S.; APARECIDO, L. E. O. Agrometeorological models for forecasting yield and quality of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v.9, n.11, p.1049-1056, 2015.

MARIN, F. R.; CARVALHO, G. L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.2, 2012.

MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, v.71, n.1, p.1-16, 2014.

MARIN, F. R.; MARTHA JUNIOR, G. B.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P. Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil. **BioScience**, v.66, n.4, p.307-316, 2016.

MARTINS, F. B.; FERREIRA, M. C.; SILVA, L. F. O.; RAMALHO, V. R. M.; GONÇALVES, E. D. Temperatura do ar no desenvolvimento reprodutivo de cultivares de Oliveira, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.34, n.2, p.179-190, 2019.

MORAES, E. R.; MAGESTE, J. G.; LANA, R. M. Q.; TORRES, J. L. R.; DOMINGUES, L. A. S.; LEMES, E. M.; LIMA, L. C. Sugarcane Root Development and Yield under Different Soil Tillage Practices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, p.1-10, 2019.

MORAIS, K. P. **Determinação da temperatura base, desempenho agrônomo e correlação de componentes de rendimento em genótipos de cana-de-açúcar**. 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2015.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the Asabe**, v. 50, p.885-900, 2007.

NEPAR-SBCS - NÚCLEO ESTADUAL PARANÁ-SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná**. 2 ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2019.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

OHASHI, A. Y. P.; PIRES, R. C. M.; RIBEIRO, R. V.; SILVA, A. L. B. O. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, v.74, n.2, p.131-138, 2015.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C.; SIMÕES NETO, D. E.; ROCHA, A. T.; CARVALHO, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.6, p.617-625, 2011.

OLIVEIRA, R. A. **Análise de crescimento da cana-de-açúcar, na região Noroeste do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Programa de Pós-graduação em Agronomia – Produção Vegetal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

ORTIZ, P. F. S.; ROLIM, M. M.; LIMA, J. L. P.; PEDROSA, E. M. R.; DANTAS, M. S. M.; TAVARES, U. E. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. **Geoderma Regional**, v.11, p.62-70, 2017.

OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.4, p.398-405, 2009.

PARAHYBA, R. B. V.; ALMEIDA, B. G.; ROLIM NETO, F. C.; ARAÚJO, M. S. B. Condutividade hidráulica dos solos arenosos da região semiárida da Bacia sedimentar do Tucano no município de Glória, Bahia, Brasil. **III Reunião Nordestina de Ciência do Solo: Integração e uso do conhecimento para uma agricultura sustentável no Nordeste**. 12 a 15 de setembro de 2016 – Aracajú/SE.

PARAHYBA, R. B. V.; ARAÚJO, M. S. B.; ALMEIDA, B. G.; ROLIM NETO, F. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CALDAS, A. M. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.91, n.4, 2019.

PEREIRA, J. A.; AGOSTINHO, E.; ISLER, P. R. Método de graus-dias para estimar o desenvolvimento da cana-de-açúcar. In: **Anais do I Simpósio Interdisciplinar de Tecnologias na Educação – IFSP Campus de Boituva**, p.217-224, 2015.

PIMENTA, J. A. Relações hídricas. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p.1-39, 2004.

PINHEIRO, J.; BATES, D. M. **Mixed effects models in S and S-PLUS**. Statistical and computing. New York: Springer-Verlag, 528p. 2000.

PREGITZER, K. S.; KING, J. S. Effects of Soil Temperature on Nutrient Uptake. In: BassiriRad, H. (Ed.). **Nutrient Acquisition by Plants**. An Ecological Perspective. Ecological Studies. v.181, p.277-310, 2005.

PRELA, A.; RIBEIRO, A. M. A. Determinação de graus-dia acumulados e sua aplicação no planejamento do cultivo de feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) para Londrina-PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.83-86, 2002.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.4, n.3, p.23-28, 1999.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos**. 2.ed. rev. e amp. – Curitiba: C. L. Prevedello, 2015. 474 p.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2021.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, 2020.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Chapter 3 Calculation procedures, Reference Manual: AquaCrop Version 6.0-6.1**. Roma, FAO, 2018, 151p.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, v. 116, p.61-76, 2003.

REGENT INSTRUMENTS. **WinRHIZO Analysis of Washed Roots and Arabidopsis Seedlings**. Regent Instruments Inc., Québec, Canadá, 2000.

RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para

as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.4, 382-388, 2013.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência agrotécnica**, v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.

RIBEIRO, N. L. **Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo AquaCrop (FAO) para variedades de cana-de-açúcar**. 98 f. Tese (Doutorado) – USP / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Engenharia de Sistemas Agrícola. Piracicaba, 2020.

RIDESA – REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. **Censo Varietal de Cana-de-açúcar - Safra 2017/18**. Disponível em: <<https://www.ridesa.com.br/censo-varietal>>. Acesso em: 12/01/2022.

ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, A. C.; RODRIGUES, A. N.; LIRA JÚNIOR, M. A.; FREIRE, F. J. Emprego do gesso do Araripe na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.4, p.307-312, 2008.

ROSSI NETO, J.; SOUZA, Z. M.; KOLLN, O. T.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, D. A.; CASTIONI, G. A. F.; BARBOSA, L. C.; CASTRO, S. G. Q.; BRAUNBECK, O. A.; GARSIDE, A. L.; FRANCO, H. C. J. The Arrangement and Spacing of Sugarcane Planting Influence Root Distribution and Crop Yield. **BioEnergy Research**, v.11, p.291-304, 2018.

SCARPARE, F. V.; VAN LIER, Q. J.; CORRÊA, S. T. R.; BARROS, A. H. C.; MARIN, F. R.; NASSIF, D. S. P. Modelos de crescimento da cana-de-açúcar e sua parametrização – revisão. **Revista de Agricultura**, v.87, n.1, p.66-80, 2012.

SCARPARI, M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, v.61, n.5, p.486-491, 2004.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

SCHOUWENAARS, J. M. Rainfall irrigation and sowing strategies in southern Mozambique. **Agriculture Water Management**, v.13, p.49-64, 1988.

SCHWERZ, F.; ELOY, E.; ELLI, E. F.; CARON, B. O.; PAULA, G. M. Temperatura e radiação solar na produção de mudas de cedro australiano. **Scientia Forestalis**, v.7, n.124, p.733-743, 2019.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. de (Ed.). **Física do**

solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. 1. ed., 2010, p. 241-281.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de Química do Solo**. 6ª ed. Porto Alegre, 2017. p.61-85.

SILVA, M. L. N.; LIBARDI, P. L.; GIMENES, F. H. S. Soil water retention curve as affected by sample height. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.42, p.1-13, 2018.

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; BORBA, J. O. M.; TAVARES, D. D.; AMARAL, A. J.; MARTINS, A. F. Solos arenosos para Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n.5, p.581-589, 2018.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAIATO, H.; SAKAI, M.; van GENUCHTEN, M. T. **The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Version 4.08**. University of California Riverside, Riverside, 2009. 330p.

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE JR., J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, p.171-178, 2004.

SISSON, J. B.; FERGUSSON, A. H.; van GENUCHTEN, M. Th. Simple method for predicting drainage from field plots. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.1147-1152, 1980.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Base and optimum temperatures vary with genotype and stage of development in wheat. **Plant, Cell and Environment**, v.18, p.671-679, 1995.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, p.169-183, 2005.

SOBRAL, A. F.; GUIMARÃES, V. O. S. Relação entre a toxidez do alumínio e a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, n.2, p.287-292, 1992.

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. 2017. **Soil survey manual**. C. DITZLER; K. SCHEFFE; H.C. MONGER (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVERIRA, S. A. V – Acidez do solo e sua correção. In: **Fertilidade do solo**. Editores Roberto Ferreira Novais et al., Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

SOUSA, F. B. F. **Tolerância de genótipos de cana-de-açúcar a toxidez por alumínio, manganês e baixa disponibilidade de nutrientes**. 56 f. Dissertação – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Jaboticabal, 2018.

SOUZA, J. L. M.; FEZER, K. F.; GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; PACHECHENIK, P. E.; EVANGELISTA, A. W. P. Atributos físicos e balanço hídrico do solo com Floresta Ombrófila Mista, em Latossolo Vermelho-Amarelo, em Telêmaco Borba - PR. **Ciência Florestal**, v.28, n.1, p.90-101, 2018.

SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERGER, E.; GURSKI, B. C.; OLIVEIRA, R. A. Adjustment of water-crop production models for ratoon sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, n.4, p.426-433, 2015.

SOUZA, P. M. B.; MARTINS, F. B. Estimativa da temperatura basal inferior para as cultivares de oliveira Grappolo e Maria da Fé. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.2, p.307-313, 2014.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.12, p.1301-1309, 2013.

STURGES, H. The choice of a class-interval. **Journal of the American Statistical Association**, v.21, p.65-66, 1926.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TORRES, L. C.; KELLER, T.; LIMA, R. P.; TORMENA, C. A.; LIMA, H. V.; GIAROLA, N. F. B. Impacts of soil type and crop species on permanent wilting of plants. **Geoderma**, v. 384, 2021.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1085-1095, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VASCONCELOS, A. C. M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 140p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2002.

VILLA NOVA, N. A.; PEDRO JUNIOR, M. J.; PEREIRA, A. R.; OMETTO, J. C. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base em função das temperaturas máxima e mínima. **Ciência da Terra**, n.30, p.1-8, 1972.

WIECHETECK, L. H.; GIAROLA, N. F. B.; LIMA, R. P.; TORMENA, C. A.; TORRES, L. C.; PAULA, A. L. Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (-15,000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures. **Agricultural Water Management**, v. 230, 2020.

WILKINSON, S. pH as a stress signal. **Plant Growth Regulation**, v.29, p.87-99, 1999.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.63, n.11, p.1309-1313, 1982.

YANG, S.; LOGAN, J.; COFFEY, D. L. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.74, p.61-74, 1995.

YANG, Y.; DONOHUE, R. J.; McVICAR, T. R. Global estimation of effective plant rooting depth: Implications for hydrological modeling. **Water Resources Research**, v.52, p.8260-8276, 2016.

YOUNGS, E. G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. cap. 4, p.161-207.

ZAMBRANO-BIGIARINI, M. **hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series R package version 0.3-10**. <http://hzambran.github.io/hydrogof/>, 2017.

APÊNDICE 1 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

TABELA A1.1 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR, NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL PMGCA/UFPR E RIDESA.

Camada (m)	K_s (cm h ⁻¹)	ρ_s (kg m ⁻³)	θ_{PMP} (m ³ m ⁻³)	TP (m ³ m ⁻³)	$Micro$ (m ³ m ⁻³)	$Macro$ (m ³ m ⁻³)	ρ_p (kg m ⁻³)
0,10	157,6677	1569,5390	0,0614	0,3340	0,1606	0,1734	2702,7027
0,10	155,0594	1611,6119	0,0741	0,3597	0,1691	0,1906	2777,7778
0,10	105,8807	1655,1258	0,0667	0,3220	0,1851	0,1369	2666,6667
0,10	132,1340	1585,3543	0,0660	0,2989	0,1702	0,1287	2777,7778
0,10	105,7296	1580,3936	0,0748	0,3391	0,1910	0,1481	2666,6667
0,10	142,8984	1491,6548	0,0470	0,3309	0,1619	0,1690	2666,6667
0,30	21,9173	1847,8085	0,1357	0,3149	0,2386	0,0763	2702,7027
0,30	39,9575	1752,8232	0,1243	0,3090	0,2522	0,0568	2777,7778
0,30	43,8308	1508,2715	0,0850	0,3681	0,2265	0,1416	2702,7027
0,30	12,4418	1774,1827	0,1233	0,3074	0,2238	0,0835	2816,9014
0,30	33,9289	1749,9061	0,0972	0,2855	0,2142	0,0713	2666,6667
0,30	48,5113	1509,3901	0,1057	0,3115	0,1973	0,1142	2666,6667
0,50	11,3213	1686,1550	0,1247	0,3260	0,2329	0,0931	2702,7027
0,50	28,9591	1685,0353	0,1053	0,3336	0,2367	0,0969	2702,7027
0,50	30,6537	1597,4130	0,0932	0,3352	0,2377	0,0974	2666,6667
0,50	18,8134	1759,0055	0,1322	0,3084	0,2587	0,0496	2702,7027
0,50	21,7440	1573,5139	0,1285	0,3391	0,2341	0,1050	2739,7260
0,50	23,2759	1617,6890	0,1251	0,3305	0,2429	0,0875	2702,7027

TABELA A1.2 – UMIDADE VOLUMÉTRICA (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR, NAS CAMADAS DE 0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL PMGCA/UFPR E RIDESA.

Potencial matricial (kPa)	Umidade volumétrica (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		
	0-0,20 m	0,20-0,40 m	0,40-0,60 m
0	0,3340	0,3149	0,3260
0	0,3597	0,3090	0,3336
0	0,3220	0,3681	0,3352
0	0,2989	0,3074	0,3084
0	0,3391	0,2855	0,3391
0	0,3309	0,3115	0,3305
6	0,1606	0,2386	0,2329
6	0,1691	0,2522	0,2367
6	0,1851	0,2265	0,2377
6	0,1702	0,2238	0,2587
6	0,1910	0,2142	0,2341
6	0,1619	0,1973	0,2429
10	0,1053	0,1842	0,1732
10	0,1224	0,1726	0,1588
10	0,1102	0,1428	0,1547
10	0,1122	0,1706	0,1892
10	0,1189	0,1433	0,1740
10	0,0905	0,1497	0,1783
33	0,0795	0,1550	0,1456
33	0,0940	0,1467	0,1304
33	0,0865	0,1111	0,1264
33	0,0872	0,1464	0,1585
33	0,0949	0,1172	0,1458
33	0,0708	0,1265	0,1507
100	0,0705	0,1433	0,1334
100	0,0834	0,1336	0,1153
100	0,0759	0,0979	0,1077
100	0,0773	0,1347	0,1426
100	0,0877	0,1066	0,1366
100	0,0631	0,1139	0,1340
500	0,0664	0,1395	0,1308
500	0,0829	0,1296	0,1108
500	0,0752	0,0917	0,1020
500	0,0721	0,1326	0,1362
500	0,0875	0,1063	0,1358
500	0,0628	0,1131	0,1302
1500	0,0614	0,1357	0,1247
1500	0,0741	0,1243	0,1053
1500	0,0667	0,0850	0,0932
1500	0,0660	0,1233	0,1322
1500	0,0748	0,0972	0,1285
1500	0,0470	0,1057	0,1251

APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS AJUSTES REALIZADOS COM O MODELO LINEAR, TENDO COMO VARIÁVEIS:

- TABELAS A2.1 a A.2.3: Massa fresca (MF , g m^{-2}) vs Soma térmica acumulada (STa , $^{\circ}\text{C}$), na Segunda Fase de desenvolvimento; e
- TABELAS A2.4 e A.2.5: Massa fresca (MF , g m^{-2}) vs Soma térmica acumulada (STa , $^{\circ}\text{C}$), na Terceira Fase de desenvolvimento.

TABELA A2.1 – AJUSTES DO MODELO LINEAR ENTRE A MASSA FRESCA (MF , $g\ m^{-2}$) E A SOMA TÉRMICA ACUMULADA (STa , $^{\circ}C$), PARA A **SEGUNDA FASE** DE DESENVOLVIMENTO DA VARIEDADE **RB036066** DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Tb ($^{\circ}C$)	MSE ($g\ m^{-2}$) ²	$RMSE$ ($g\ m^{-2}$)	$NRMSE$ média (ad.)	$NRMSE$ mediana (ad.)	R^2 (ad.)	p-valor (ad.)	Shapiro Wilk (ad.)	Shapiro p (ad.)
0,0	51000,00	226,00	0,1100	0,1260	0,9778	0,0112	0,8638	0,2742
0,5	50800,00	225,00	0,1100	0,1250	0,9779	0,0111	0,8654	0,2800
1,0	50700,00	225,00	0,1100	0,1250	0,9779	0,0111	0,8670	0,2861
1,5	50500,00	225,00	0,1100	0,1250	0,9780	0,0111	0,8687	0,2925
2,0	50400,00	224,00	0,1100	0,1250	0,9781	0,0110	0,8704	0,2993
2,5	50200,00	224,00	0,1090	0,1250	0,9781	0,0110	0,8722	0,3065
3,0	50000,00	224,00	0,1090	0,1240	0,9782	0,0110	0,8741	0,3141
3,5	49800,00	223,00	0,1090	0,1240	0,9783	0,0109	0,8761	0,3222
4,0	49600,00	223,00	0,1090	0,1240	0,9784	0,0109	0,8782	0,3308
4,5	49400,00	222,00	0,1090	0,1240	0,9785	0,0108	0,8803	0,3399
5,0	49200,00	222,00	0,1080	0,1230	0,9786	0,0108	0,8825	0,3496
5,5	49000,00	221,00	0,1080	0,1230	0,9787	0,0107	0,8849	0,3600
6,0	48800,00	221,00	0,1080	0,1230	0,9788	0,0107	0,8874	0,3710
6,5	48600,00	220,00	0,1080	0,1220	0,9789	0,0106	0,8899	0,3828
7,0	48300,00	220,00	0,1070	0,1220	0,9790	0,0106	0,8926	0,3954
7,5	48100,00	219,00	0,1070	0,1220	0,9791	0,0105	0,8955	0,4089
8,0	47800,00	219,00	0,1070	0,1220	0,9792	0,0105	0,8984	0,4234
8,5	47500,00	218,00	0,1060	0,1210	0,9793	0,0104	0,9016	0,4389
9,0	47200,00	217,00	0,1060	0,1210	0,9794	0,0103	0,9049	0,4556
9,5	46900,00	217,00	0,1060	0,1200	0,9796	0,0103	0,9083	0,4736
10,0	46600,00	216,00	0,1050	0,1200	0,9797	0,0102	0,9120	0,4930
10,5	46200,00	215,00	0,1050	0,1200	0,9799	0,0101	0,9158	0,5139
11,0	45900,00	214,00	0,1050	0,1190	0,9800	0,0100	0,9199	0,5364
11,5	45500,00	213,00	0,1040	0,1190	0,9802	0,0100	0,9242	0,5606
12,0	45100,00	212,00	0,1040	0,1180	0,9804	0,0099	0,9286	0,5864
12,5	44700,00	211,00	0,1030	0,1180	0,9805	0,0098	0,9333	0,6140
13,0	44300,00	210,00	0,1030	0,1170	0,9807	0,0097	0,9382	0,6433
13,5	43900,00	209,00	0,1020	0,1160	0,9809	0,0096	0,9432	0,6742
14,0	43400,00	208,00	0,1020	0,1160	0,9811	0,0095	0,9485	0,7065
14,5	43000,00	207,00	0,1010	0,1150	0,9813	0,0094	0,9538	0,7402
15,0	42500,00	206,00	0,1010	0,1150	0,9815	0,0093	0,9593	0,7745
15,5	42000,00	205,00	0,1000	0,1140	0,9817	0,0092	0,9648	0,8089
16,0	41500,00	204,00	0,0995	0,1130	0,9819	0,0091	0,9702	0,8428
16,5	41000,00	203,00	0,0989	0,1130	0,9821	0,0090	0,9755	0,8751
17,0	40600,00	201,00	0,0983	0,1120	0,9823	0,0089	0,9804	0,9044
17,5	40100,00	200,00	0,0978	0,1110	0,9825	0,0088	0,9847	0,9292
18,0	39700,00	199,00	0,0972	0,1110	0,9827	0,0087	0,9884	0,9491
18,5	39200,00	198,00	0,0967	0,1100	0,9829	0,0086	0,9913	0,9642
19,0	38700,00	197,00	0,0961	0,1090	0,9831	0,0085	0,9935	0,9746
19,5	38200,00	196,00	0,0954	0,1090	0,9834	0,0084	0,9949	0,9812
20,0	37700,00	194,00	0,0948	0,1080	0,9836	0,0082	0,9958	0,9848
20,5	37000,00	192,00	0,0940	0,1070	0,9839	0,0081	0,9961	0,9863
21,0	36300,00	190,00	0,0930	0,1060	0,9842	0,0079	0,9962	0,9865
21,5	35400,00	188,00	0,0918	0,1050	0,9846	0,0077	0,9960	0,9858
22,0	34400,00	186,00	0,0906	0,1030	0,9850	0,0075	0,9956	0,9843
22,5	33400,00	183,00	0,0892	0,1020	0,9855	0,0073	0,9949	0,9812
23,0	32200,00	180,00	0,0877	0,0998	0,9860	0,0070	0,9936	0,9750

TABELA A2.2 – AJUSTES DO MODELO LINEAR ENTRE A MASSA FRESCA (MF , $g\ m^{-2}$) E A SOMA TÉRMICA ACUMULADA (STa , $^{\circ}C$), PARA A **SEGUNDA FASE** DE DESENVOLVIMENTO DA VARIEDADE **RB867515** DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Tb ($^{\circ}C$)	MSE ($g\ m^{-2}$) ²	$RMSE$ ($g\ m^{-2}$)	$NRMSE$ média (ad.)	$NRMSE$ mediana (ad.)	R^2 (ad.)	p-valor (ad.)	Shapiro Wilk (ad.)	Shapiro p (ad.)
0,0	335000,00	579,00	0,2690	0,3960	0,9064	0,0479	0,8782	0,3308
0,5	335000,00	578,00	0,2690	0,3950	0,9066	0,0479	0,8779	0,3296
1,0	334000,00	578,00	0,2690	0,3950	0,9068	0,0478	0,8776	0,3284
1,5	333000,00	577,00	0,2690	0,3950	0,9070	0,0477	0,8773	0,3271
2,0	333000,00	577,00	0,2680	0,3940	0,9071	0,0476	0,8769	0,3257
2,5	332000,00	576,00	0,2680	0,3940	0,9073	0,0475	0,8766	0,3243
3,0	331000,00	575,00	0,2680	0,3930	0,9076	0,0473	0,8762	0,3228
3,5	330000,00	575,00	0,2670	0,3930	0,9078	0,0472	0,8758	0,3212
4,0	330000,00	574,00	0,2670	0,3920	0,9080	0,0471	0,8754	0,3195
4,5	329000,00	573,00	0,2670	0,3920	0,9083	0,0470	0,8750	0,3178
5,0	328000,00	572,00	0,2660	0,3910	0,9085	0,0468	0,8746	0,3160
5,5	327000,00	572,00	0,2660	0,3910	0,9088	0,0467	0,8741	0,3140
6,0	326000,00	571,00	0,2650	0,3900	0,9091	0,0466	0,8736	0,3120
6,5	325000,00	570,00	0,2650	0,3890	0,9093	0,0464	0,8731	0,3098
7,0	324000,00	569,00	0,2650	0,3890	0,9097	0,0462	0,8725	0,3075
7,5	322000,00	568,00	0,2640	0,3880	0,9100	0,0461	0,8719	0,3051
8,0	321000,00	567,00	0,2640	0,3870	0,9103	0,0459	0,8712	0,3026
8,5	320000,00	566,00	0,2630	0,3870	0,9107	0,0457	0,8705	0,2998
9,0	319000,00	564,00	0,2630	0,3860	0,9111	0,0455	0,8698	0,2969
9,5	317000,00	563,00	0,2620	0,3850	0,9115	0,0453	0,8690	0,2938
10,0	316000,00	562,00	0,2610	0,3840	0,9119	0,0451	0,8681	0,2905
10,5	314000,00	560,00	0,2610	0,3830	0,9123	0,0448	0,8672	0,2869
11,0	312000,00	559,00	0,2600	0,3820	0,9128	0,0446	0,8662	0,2831
11,5	310000,00	557,00	0,2590	0,3810	0,9133	0,0443	0,8651	0,2789
12,0	308000,00	555,00	0,2580	0,3800	0,9139	0,0440	0,8639	0,2745
12,5	306000,00	554,00	0,2570	0,3780	0,9145	0,0437	0,8626	0,2698
13,0	304000,00	552,00	0,2570	0,3770	0,9151	0,0434	0,8612	0,2647
13,5	302000,00	549,00	0,2560	0,3750	0,9157	0,0431	0,8597	0,2592
14,0	299000,00	547,00	0,2540	0,3740	0,9164	0,0427	0,8581	0,2534
14,5	297000,00	545,00	0,2530	0,3720	0,9172	0,0423	0,8563	0,2471
15,0	294000,00	542,00	0,2520	0,3700	0,9180	0,0419	0,8543	0,2403
15,5	291000,00	539,00	0,2510	0,3690	0,9188	0,0415	0,8521	0,2331
16,0	288000,00	536,00	0,2490	0,3670	0,9197	0,0410	0,8498	0,2255
16,5	284000,00	533,00	0,2480	0,3650	0,9206	0,0405	0,8472	0,2173
17,0	281000,00	530,00	0,2470	0,3620	0,9215	0,0400	0,8445	0,2089
17,5	278000,00	527,00	0,2450	0,3600	0,9224	0,0396	0,8417	0,2004
18,0	275000,00	524,00	0,2440	0,3580	0,9233	0,0391	0,8388	0,1920
18,5	272000,00	521,00	0,2420	0,3560	0,9241	0,0387	0,8360	0,1839
19,0	269000,00	519,00	0,2410	0,3550	0,9248	0,0383	0,8332	0,1762
19,5	267000,00	517,00	0,2400	0,3530	0,9254	0,0380	0,8306	0,1694
20,0	266000,00	516,00	0,2400	0,3520	0,9258	0,0378	0,8283	0,1634
20,5	265000,00	515,00	0,2400	0,3520	0,9259	0,0378	0,8265	0,1587
21,0	266000,00	516,00	0,2400	0,3530	0,9257	0,0379	0,8252	0,1555
21,5	268000,00	518,00	0,2410	0,3540	0,9252	0,0381	0,8245	0,1538
22,0	271000,00	520,00	0,2420	0,3560	0,9244	0,0385	0,8244	0,1536
22,5	275000,00	524,00	0,2440	0,3580	0,9233	0,0391	0,8250	0,1551
23,0	280000,00	529,00	0,2460	0,3620	0,9219	0,0399	0,8263	0,1584

TABELA A2.3 – AJUSTES DO MODELO LINEAR ENTRE A MASSA FRESCA (MF , $g\ m^{-2}$) E A SOMA TÉRMICA ACUMULADA (STa , $^{\circ}C$), PARA A **SEGUNDA FASE** DE DESENVOLVIMENTO DA VARIEDADE **RB966928** DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Tb ($^{\circ}C$)	MSE ($g\ m^{-2}$) ²	$RMSE$ ($g\ m^{-2}$)	$NRMSE$ média (ad.)	$NRMSE$ mediana (ad.)	R^2 (ad.)	p-valor (ad.)	Shapiro Wilk (ad.)	Shapiro p (ad.)
0,0	84700,00	291,00	0,1100	0,1370	0,9796	0,0103	0,8401	0,1956
0,5	84200,00	290,00	0,1100	0,1360	0,9797	0,0102	0,8406	0,1971
1,0	83700,00	289,00	0,1090	0,1360	0,9798	0,0101	0,8411	0,1986
1,5	83200,00	288,00	0,1090	0,1350	0,9799	0,0101	0,8417	0,2003
2,0	82700,00	288,00	0,1090	0,1350	0,9801	0,0100	0,8422	0,2020
2,5	82200,00	287,00	0,1080	0,1340	0,9802	0,0099	0,8428	0,2038
3,0	81600,00	286,00	0,1080	0,1340	0,9803	0,0099	0,8435	0,2057
3,5	81000,00	285,00	0,1080	0,1340	0,9805	0,0098	0,8441	0,2077
4,0	80400,00	284,00	0,1070	0,1330	0,9806	0,0097	0,8448	0,2098
4,5	79800,00	282,00	0,1070	0,1320	0,9808	0,0097	0,8455	0,2120
5,0	79100,00	281,00	0,1060	0,1320	0,9809	0,0096	0,8463	0,2144
5,5	78400,00	280,00	0,1060	0,1310	0,9811	0,0095	0,8471	0,2169
6,0	77700,00	279,00	0,1050	0,1310	0,9813	0,0094	0,8479	0,2195
6,5	76900,00	277,00	0,1050	0,1300	0,9815	0,0093	0,8488	0,2223
7,0	76100,00	276,00	0,1040	0,1290	0,9817	0,0092	0,8497	0,2253
7,5	75300,00	274,00	0,1040	0,1290	0,9819	0,0091	0,8507	0,2285
8,0	74400,00	273,00	0,1030	0,1280	0,9821	0,0090	0,8518	0,2319
8,5	73400,00	271,00	0,1020	0,1270	0,9823	0,0089	0,8529	0,2356
9,0	72400,00	269,00	0,1020	0,1260	0,9825	0,0088	0,8540	0,2395
9,5	71400,00	267,00	0,1010	0,1250	0,9828	0,0086	0,8553	0,2438
10,0	70300,00	265,00	0,1000	0,1240	0,9831	0,0085	0,8566	0,2483
10,5	69100,00	263,00	0,0994	0,1230	0,9833	0,0084	0,8580	0,2533
11,0	67900,00	261,00	0,0985	0,1220	0,9836	0,0082	0,8595	0,2586
11,5	66600,00	258,00	0,0975	0,1210	0,9840	0,0081	0,8612	0,2644
12,0	65200,00	255,00	0,0965	0,1200	0,9843	0,0079	0,8629	0,2706
12,5	63800,00	253,00	0,0954	0,1180	0,9846	0,0077	0,8647	0,2774
13,0	62200,00	249,00	0,0943	0,1170	0,9850	0,0075	0,8666	0,2847
13,5	60600,00	246,00	0,0931	0,1160	0,9854	0,0073	0,8687	0,2926
14,0	58900,00	243,00	0,0917	0,1140	0,9858	0,0071	0,8709	0,3012
14,5	57100,00	239,00	0,0903	0,1120	0,9862	0,0069	0,8732	0,3104
15,0	55200,00	235,00	0,0888	0,1100	0,9867	0,0067	0,8756	0,3203
15,5	53300,00	231,00	0,0872	0,1080	0,9872	0,0064	0,8782	0,3310
16,0	51200,00	226,00	0,0855	0,1060	0,9877	0,0062	0,8809	0,3425
16,5	49100,00	222,00	0,0837	0,1040	0,9882	0,0059	0,8837	0,3547
17,0	46900,00	217,00	0,0819	0,1020	0,9887	0,0057	0,8866	0,3674
17,5	44800,00	212,00	0,0800	0,0993	0,9892	0,0054	0,8894	0,3803
18,0	42800,00	207,00	0,0782	0,0971	0,9897	0,0052	0,8921	0,3931
18,5	40900,00	202,00	0,0765	0,0949	0,9901	0,0049	0,8948	0,4055
19,0	39200,00	198,00	0,0749	0,0929	0,9905	0,0047	0,8971	0,4170
19,5	37800,00	194,00	0,0735	0,0912	0,9909	0,0046	0,8991	0,4268
20,0	36700,00	192,00	0,0724	0,0899	0,9912	0,0044	0,9007	0,4345
20,5	36000,00	190,00	0,0717	0,0890	0,9913	0,0043	0,9016	0,4393
21,0	35800,00	189,00	0,0715	0,0888	0,9914	0,0043	0,9018	0,4402
21,5	36100,00	190,00	0,0718	0,0891	0,9913	0,0044	0,9012	0,4369
22,0	36800,00	192,00	0,0725	0,0900	0,9911	0,0044	0,8997	0,4294
22,5	38100,00	195,00	0,0737	0,0915	0,9908	0,0046	0,8973	0,4177
23,0	39900,00	200,00	0,0755	0,0938	0,9904	0,0048	0,8942	0,4026

TABELA A2.4 – AJUSTES DO MODELO LINEAR ENTRE A MASSA FRESCA (MF , $g\ m^{-2}$) E A SOMA TÉRMICA ACUMULADA (STa , $^{\circ}C$), PARA A **TERCEIRA FASE** DE DESENVOLVIMENTO DA VARIEDADE **RB036066** DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Tb ($^{\circ}C$)	MSE ($g\ m^{-2}$) ²	$RMSE$ ($g\ m^{-2}$)	$NRMSE$ média (ad.)	$NRMSE$ mediana (ad.)	R^2 (ad.)	p-valor (ad.)	Shapiro Wilk (ad.)	Shapiro p (ad.)
0,0	7040,00	83,90	0,0148	0,0150	0,9951	0,0445	0,8344	0,1996
0,5	6860,00	82,80	0,0146	0,0148	0,9952	0,0439	0,8337	0,1978
1,0	6670,00	81,70	0,0144	0,0146	0,9954	0,0433	0,8330	0,1960
1,5	6480,00	80,50	0,0142	0,0144	0,9955	0,0427	0,8323	0,1942
2,0	6290,00	79,30	0,0140	0,0141	0,9956	0,0421	0,8315	0,1922
2,5	6080,00	78,00	0,0138	0,0139	0,9958	0,0414	0,8307	0,1902
3,0	5880,00	76,70	0,0135	0,0137	0,9959	0,0407	0,8299	0,1881
3,5	5660,00	75,30	0,0133	0,0134	0,9961	0,0399	0,8290	0,1858
4,0	5450,00	73,80	0,0130	0,0132	0,9962	0,0391	0,8281	0,1835
4,5	5220,00	72,20	0,0128	0,0129	0,9964	0,0383	0,8271	0,1810
5,0	4990,00	70,60	0,0125	0,0126	0,9965	0,0375	0,8261	0,1784
5,5	4750,00	68,90	0,0122	0,0123	0,9967	0,0366	0,8250	0,1757
6,0	4500,00	67,10	0,0119	0,0120	0,9969	0,0356	0,8239	0,1729
6,5	4250,00	65,20	0,0115	0,0116	0,9971	0,0346	0,8227	0,1698
7,0	4000,00	63,20	0,0112	0,0113	0,9972	0,0335	0,8214	0,1666
7,5	3730,00	61,10	0,0108	0,0109	0,9974	0,0324	0,8200	0,1632
8,0	3460,00	58,80	0,0104	0,0105	0,9976	0,0312	0,8186	0,1597
8,5	3190,00	56,40	0,0100	0,0101	0,9978	0,0299	0,8170	0,1558
9,0	2900,00	53,90	0,0095	0,0096	0,9980	0,0286	0,8154	0,1518
9,5	2620,00	51,20	0,0090	0,0091	0,9982	0,0271	0,8136	0,1475
10,0	2330,00	48,30	0,0085	0,0086	0,9984	0,0256	0,8118	0,1429
10,5	2040,00	45,20	0,0080	0,0081	0,9986	0,0240	0,8097	0,1380
11,0	1750,00	41,90	0,0074	0,0075	0,9988	0,0222	0,8076	0,1327
11,5	1470,00	38,30	0,0068	0,0068	0,9990	0,0203	0,8052	0,1270
12,0	1190,00	34,50	0,0061	0,0062	0,9992	0,0183	0,8027	0,1210
12,5	927,00	30,50	0,0054	0,0054	0,9994	0,0161	0,8000	0,1145
13,0	679,00	26,10	0,0046	0,0047	0,9995	0,0138	0,7971	0,1075
13,5	453,00	21,30	0,0038	0,0038	0,9997	0,0113	0,7939	0,0999
14,0	260,00	16,10	0,0029	0,0029	0,9998	0,0086	0,7904	0,0917
14,5	111,00	10,50	0,0019	0,0019	0,9999	0,0056	0,7866	0,0828
15,0	19,40	4,41	0,0008	0,0008	1,0000	0,0023	0,7824	0,0731
15,5	5,25	2,29	0,0004	0,0004	1,0000	0,0012	0,7778	0,0624
16,0	92,90	9,64	0,0017	0,0017	0,9999	0,0051	0,7726	0,0507
16,5	314,00	17,70	0,0031	0,0032	0,9998	0,0094	0,7670	0,0379
17,0	707,00	26,60	0,0047	0,0047	0,9995	0,0141	0,7607	0,0238
17,5	1320,00	36,30	0,0064	0,0065	0,9991	0,0192	0,7538	0,0084
18,0	2190,00	46,80	0,0083	0,0084	0,9985	0,0248	0,7538	0,0084
18,5	3390,00	58,20	0,0103	0,0104	0,9977	0,0309	0,7619	0,0265
19,0	4950,00	70,40	0,0124	0,0126	0,9966	0,0373	0,7705	0,0459
19,5	6940,00	83,30	0,0147	0,0149	0,9952	0,0442	0,7795	0,0665
20,0	9430,00	97,10	0,0171	0,0173	0,9935	0,0515	0,7890	0,0885
20,5	12500,00	112,00	0,0197	0,0199	0,9914	0,0593	0,7989	0,1118
21,0	16100,00	127,00	0,0224	0,0227	0,9888	0,0675	0,8091	0,1363
21,5	20500,00	143,00	0,0253	0,0255	0,9858	0,0760	0,8195	0,1619
22,0	25400,00	159,00	0,0281	0,0284	0,9824	0,0848	0,8299	0,1882
22,5	31000,00	176,00	0,0311	0,0314	0,9785	0,0937	0,8403	0,2149
23,0	37200,00	193,00	0,0341	0,0344	0,9742	0,1027	0,8506	0,2421

TABELA A2.5 – AJUSTES DO MODELO LINEAR ENTRE A MASSA FRESCA (MF , $g\ m^{-2}$) E A SOMA TÉRMICA ACUMULADA (STa , $^{\circ}C$), PARA A **TERCEIRA FASE** DE DESENVOLVIMENTO DA VARIEDADE **RB966928** DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Tb ($^{\circ}C$)	MSE ($g\ m^{-2}$) ²	$RMSE$ ($g\ m^{-2}$)	$NRMSE$ média (ad.)	$NRMSE$ mediana (ad.)	R^2 (ad.)	p-valor (ad.)	Shapiro Wilk (ad.)	Shapiro p (ad.)
0,0	5210,00	72,10	0,0101	0,0101	0,9958	0,0415	0,8344	0,1996
0,5	5060,00	71,20	0,0099	0,0100	0,9959	0,0409	0,8337	0,1978
1,0	4920,00	70,10	0,0098	0,0099	0,9960	0,0403	0,8330	0,1960
1,5	4770,00	69,00	0,0096	0,0097	0,9961	0,0397	0,8323	0,1942
2,0	4610,00	67,90	0,0095	0,0096	0,9962	0,0390	0,8315	0,1922
2,5	4450,00	66,70	0,0093	0,0094	0,9964	0,0384	0,8307	0,1902
3,0	4290,00	65,50	0,0091	0,0092	0,9965	0,0376	0,8299	0,1881
3,5	4120,00	64,20	0,0090	0,0090	0,9966	0,0369	0,8290	0,1858
4,0	3950,00	62,80	0,0088	0,0088	0,9968	0,0361	0,8281	0,1835
4,5	3770,00	61,40	0,0086	0,0086	0,9969	0,0353	0,8271	0,1810
5,0	3590,00	59,90	0,0084	0,0084	0,9971	0,0344	0,8261	0,1784
5,5	3400,00	58,30	0,0081	0,0082	0,9972	0,0335	0,8250	0,1757
6,0	3210,00	56,70	0,0079	0,0080	0,9974	0,0326	0,8239	0,1729
6,5	3020,00	54,90	0,0077	0,0077	0,9975	0,0316	0,8227	0,1698
7,0	2820,00	53,10	0,0074	0,0075	0,9977	0,0305	0,8214	0,1666
7,5	2610,00	51,10	0,0071	0,0072	0,9979	0,0294	0,8200	0,1632
8,0	2400,00	49,00	0,0068	0,0069	0,9980	0,0282	0,8186	0,1597
8,5	2190,00	46,80	0,0065	0,0066	0,9982	0,0269	0,8170	0,1558
9,0	1980,00	44,50	0,0062	0,0063	0,9984	0,0256	0,8154	0,1518
9,5	1760,00	42,00	0,0059	0,0059	0,9986	0,0241	0,8136	0,1475
10,0	1540,00	39,30	0,0055	0,0055	0,9987	0,0226	0,8118	0,1429
10,5	1330,00	36,40	0,0051	0,0051	0,9989	0,0209	0,8097	0,1380
11,0	1110,00	33,40	0,0047	0,0047	0,9991	0,0192	0,8076	0,1327
11,5	907,00	30,10	0,0042	0,0042	0,9993	0,0173	0,8052	0,1270
12,0	708,00	26,60	0,0037	0,0037	0,9994	0,0153	0,8027	0,1210
12,5	521,00	22,80	0,0032	0,0032	0,9996	0,0131	0,8000	0,1145
13,0	352,00	18,80	0,0026	0,0026	0,9997	0,0108	0,7971	0,1075
13,5	207,00	14,40	0,0020	0,0020	0,9998	0,0083	0,7939	0,0999
14,0	92,60	9,62	0,0013	0,0014	0,9999	0,0055	0,7904	0,0917
14,5	19,80	4,45	0,0006	0,0006	1,0000	0,0026	0,7866	0,0828
15,0	1,44	1,20	0,0002	0,0002	1,0000	0,0007	0,7824	0,0731
15,5	54,50	7,38	0,0010	0,0010	1,0000	0,0042	0,7778	0,0624
16,0	201,00	14,20	0,0020	0,0020	0,9998	0,0081	0,7726	0,0507
16,5	468,00	21,60	0,0030	0,0030	0,9996	0,0124	0,7670	0,0379
17,0	888,00	29,80	0,0042	0,0042	0,9993	0,0171	0,7607	0,0238
17,5	1500,00	38,70	0,0054	0,0055	0,9988	0,0223	0,7538	0,0084
18,0	2350,00	48,50	0,0068	0,0068	0,9981	0,0278	0,7538	0,0084
18,5	3480,00	59,00	0,0082	0,0083	0,9972	0,0339	0,7619	0,0265
19,0	4930,00	70,20	0,0098	0,0099	0,9960	0,0404	0,7705	0,0459
19,5	6750,00	82,20	0,0115	0,0116	0,9945	0,0472	0,7795	0,0665
20,0	9000,00	94,80	0,0132	0,0133	0,9927	0,0545	0,7890	0,0885
20,5	11700,00	108,00	0,0151	0,0152	0,9904	0,0623	0,7989	0,1118
21,0	15000,00	122,00	0,0171	0,0172	0,9878	0,0705	0,8091	0,1363
21,5	18800,00	137,00	0,0191	0,0193	0,9847	0,0790	0,8195	0,1619
22,0	23200,00	152,00	0,0212	0,0214	0,9811	0,0878	0,8299	0,1882
22,5	28100,00	168,00	0,0234	0,0236	0,9771	0,0967	0,8403	0,2149
23,0	33600,00	183,00	0,0256	0,0258	0,9727	0,1057	0,8506	0,2421

APÊNDICE 3 – AJUSTES E PARÂMETROS OBTIDOS COM O MODELO LOGÍSTICO PARA VARIEDADES DA CANA-DE-AÇÚCAR, ENVOLVENDO A RELAÇÃO: MASSA FRESCA (MF) vs TEMPERATURA MÉDIA DO AR ACUMULADA (Ta).

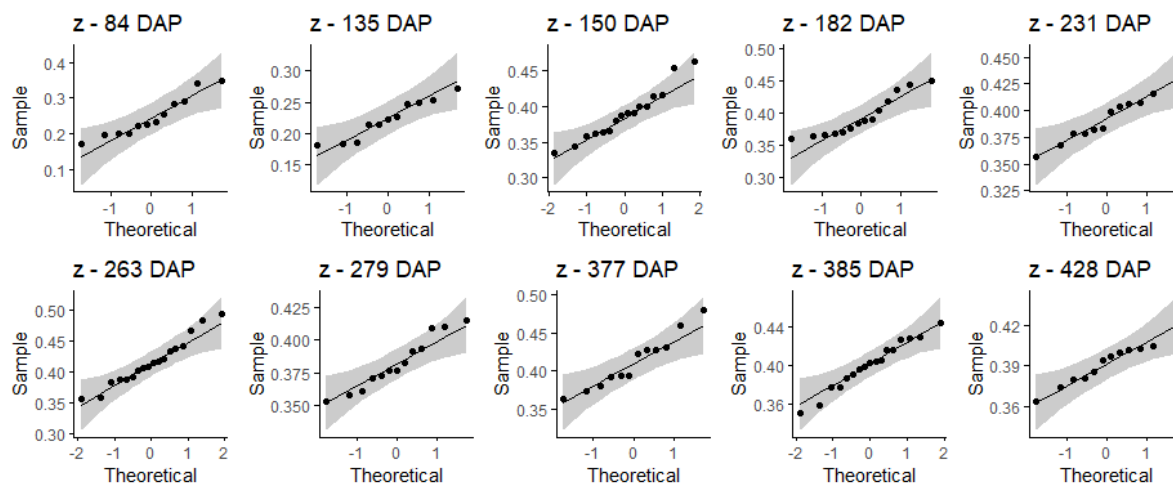
TABELA A3.1 – PARÂMETROS OBTIDOS DO AJUSTAMENTO ENTRE MASSA FRESCA (MF) E A TEMPERATURA MÉDIA DO AR ACUMULADA (Ta), COM O MODELO LOGÍSTICO, PARA AS VARIEDADES DA CANA-DE-AÇÚCAR.

Parâmetros	----- RB036066 -----				----- RB867515 -----				----- RB966928 -----			
	Estimada (unidade da variável)	Erro	t (ad.)	p -valor (ad.)	Estimada (unidade da variável)	Erro	t (ad.)	p -valor (ad.)	Estimada (unidade da variável)	Erro	t (ad.)	p -valor (ad.)
A (g m^{-2})	7923,90	720,80	10,99	<0,01*	5897,50	442,90	13,32	<0,01*	8891,17	271,63	32,73	<0,01*
T_f ($^{\circ}\text{C}$)	6201,30	330,30	18,77	<0,01*	5320,80	258,40	20,59	<0,01*	5800,93	108,68	53,38	<0,01*
E ($^{\circ}\text{C}$)	1248,60	185,00	6,75	<0,01*	611,10	194,10	3,15	0,03*	1040,15	68,93	15,09	<0,01*
—	—	—	$R^2 =$	0,99	—	—	$R^2 =$	0,98	—	—	$R^2 =$	0,99

Sendo: A – parâmetro numérico representando a assíntota da curva ajustada (g m^{-2}); T_f – parâmetro numérico que representa o valor T no ponto de inflexão da curva ($^{\circ}\text{C}$); E – parâmetro de escala numérica no eixo de entrada ($^{\circ}\text{C}$). *Significativo à 5% de probabilidade.

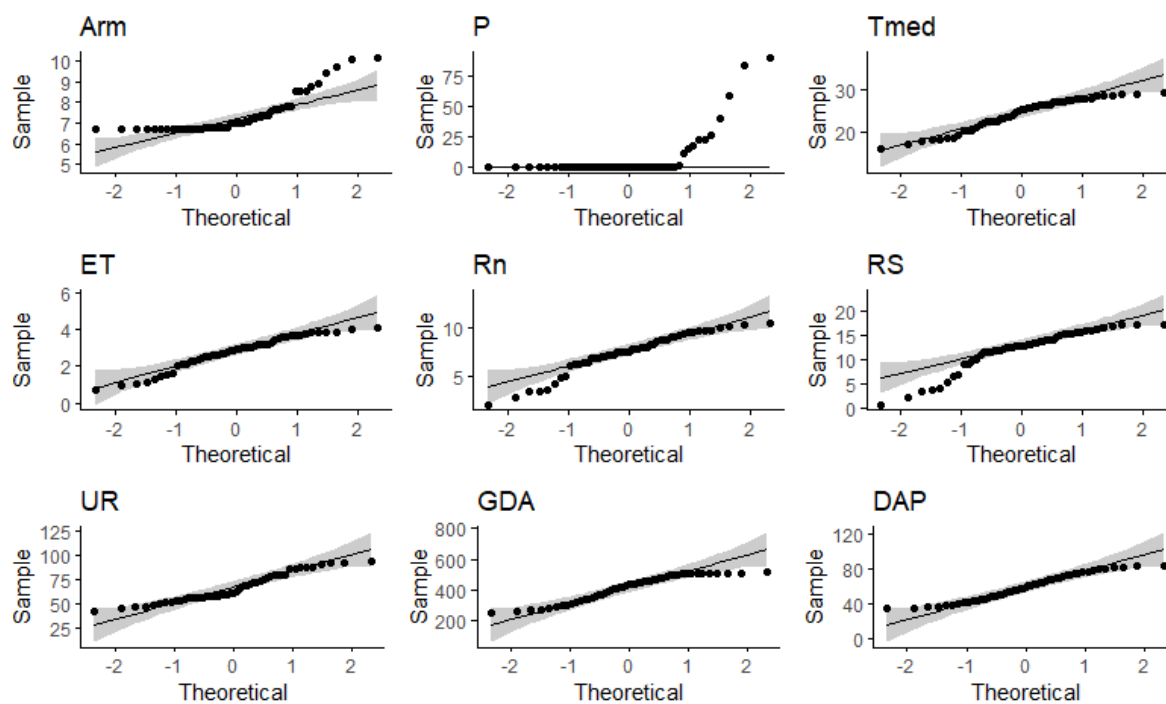
APÊNDICE 4 – NORMALIDADE UNIVARIADA DA PROFUNDIDADE EFETIVA RADICULAR (z) E DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*)

FIGURA A4.1 – NORMALIDADE UNIVARIADA DA PROFUNDIDADE EFETIVA RADICULAR (z, m) NOS DIAS APÓS PLANTIO (DAP).



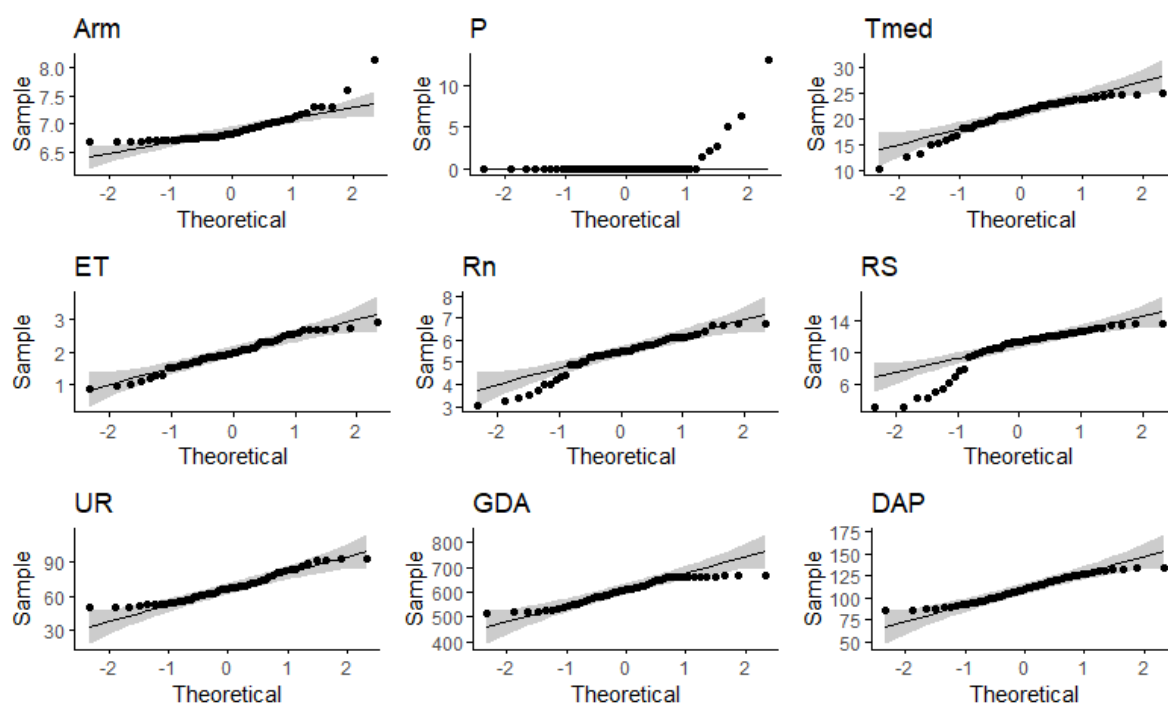
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.2 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 84 DAP.



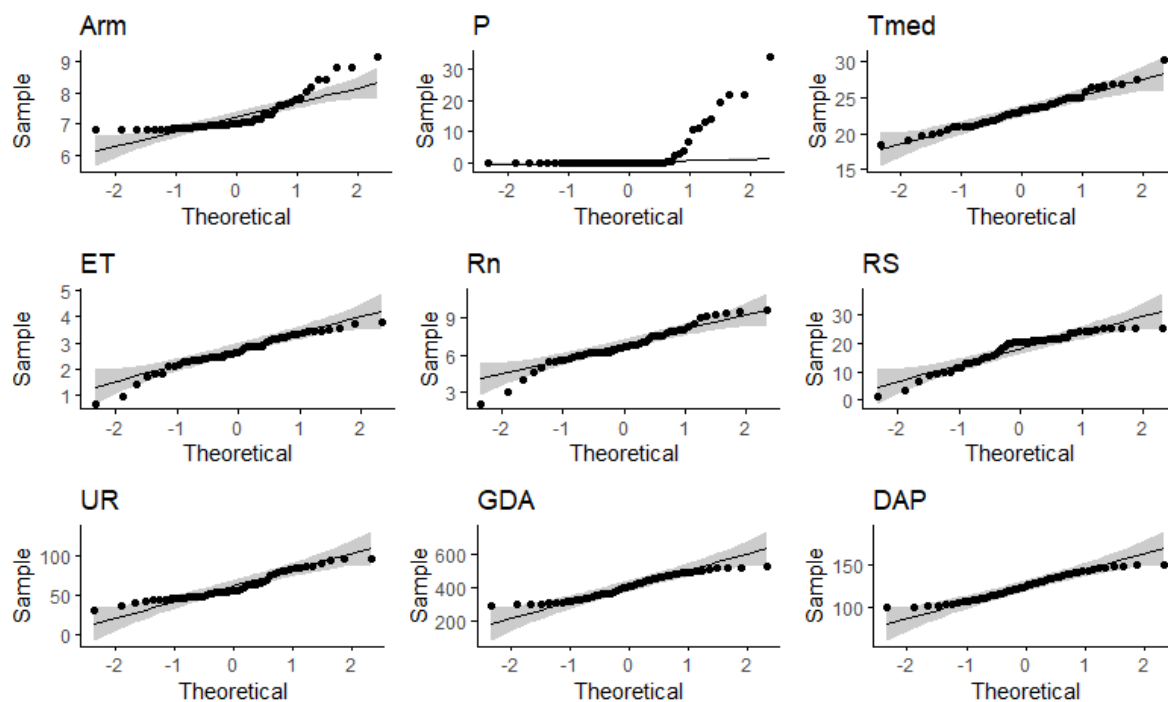
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.3 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 135 DAP.



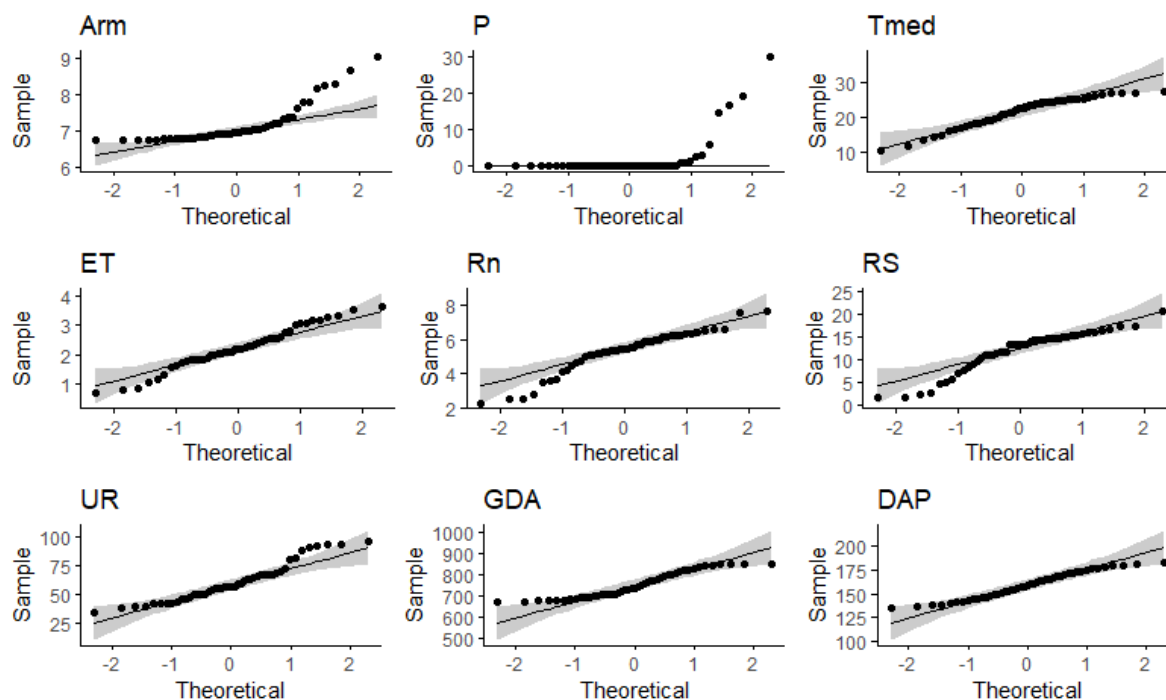
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.4 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 150 DAP.



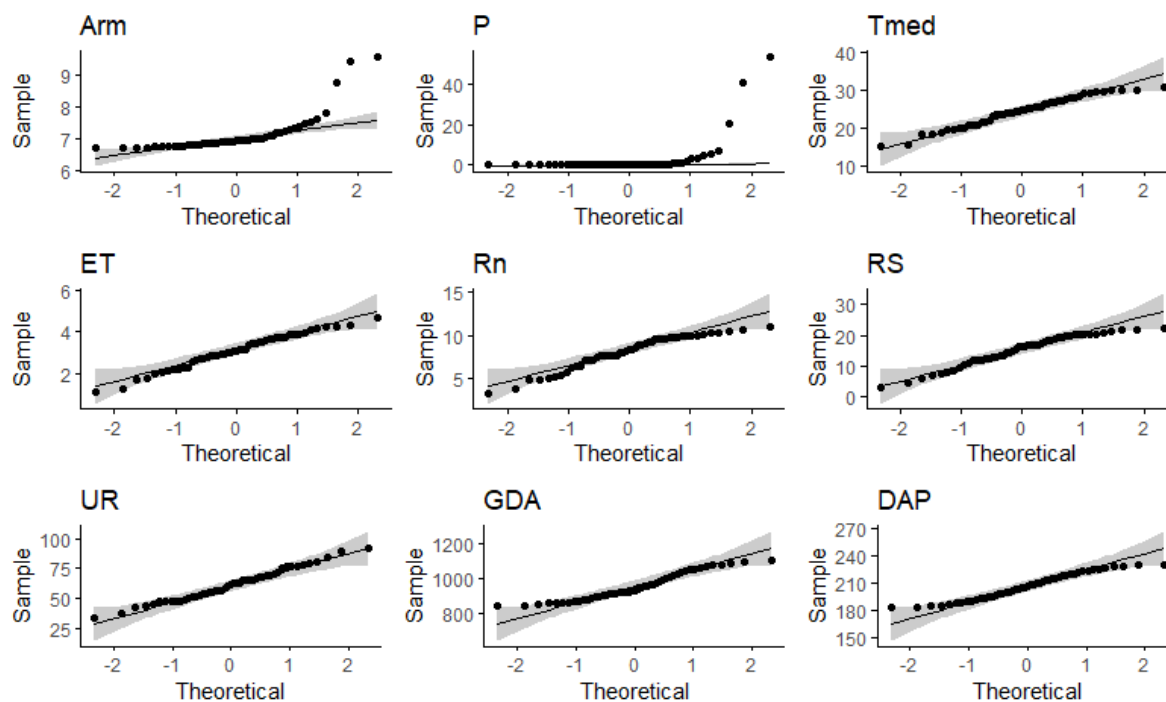
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.5 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 182 DAP.



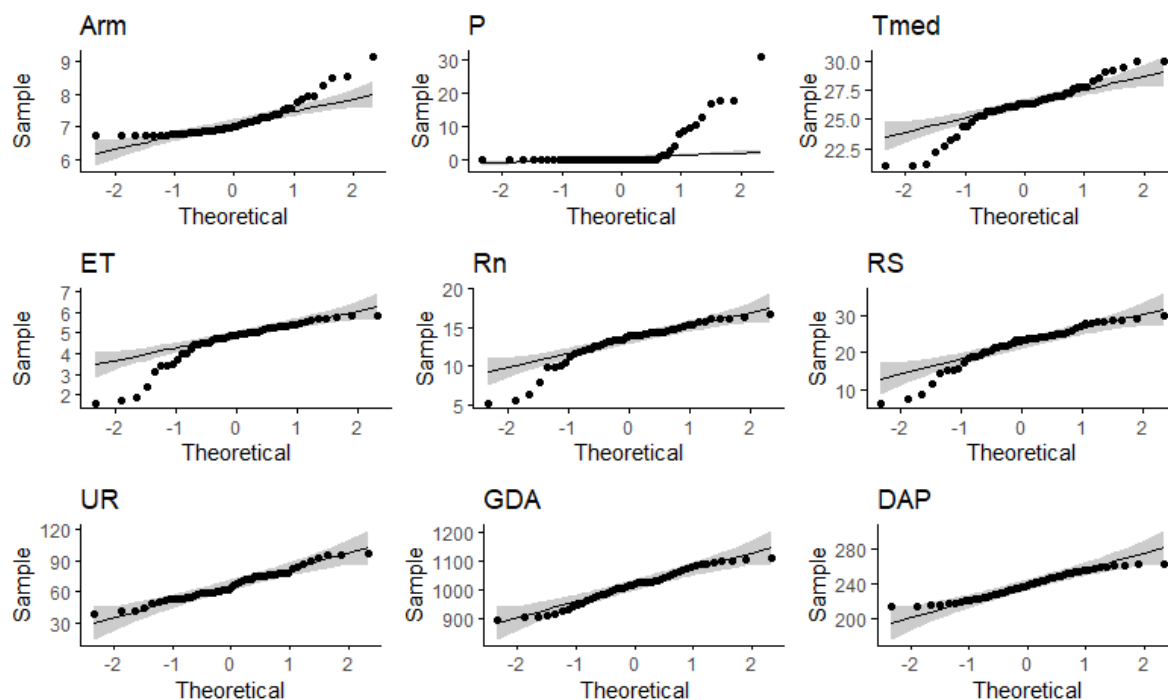
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.6 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 231 DAP.



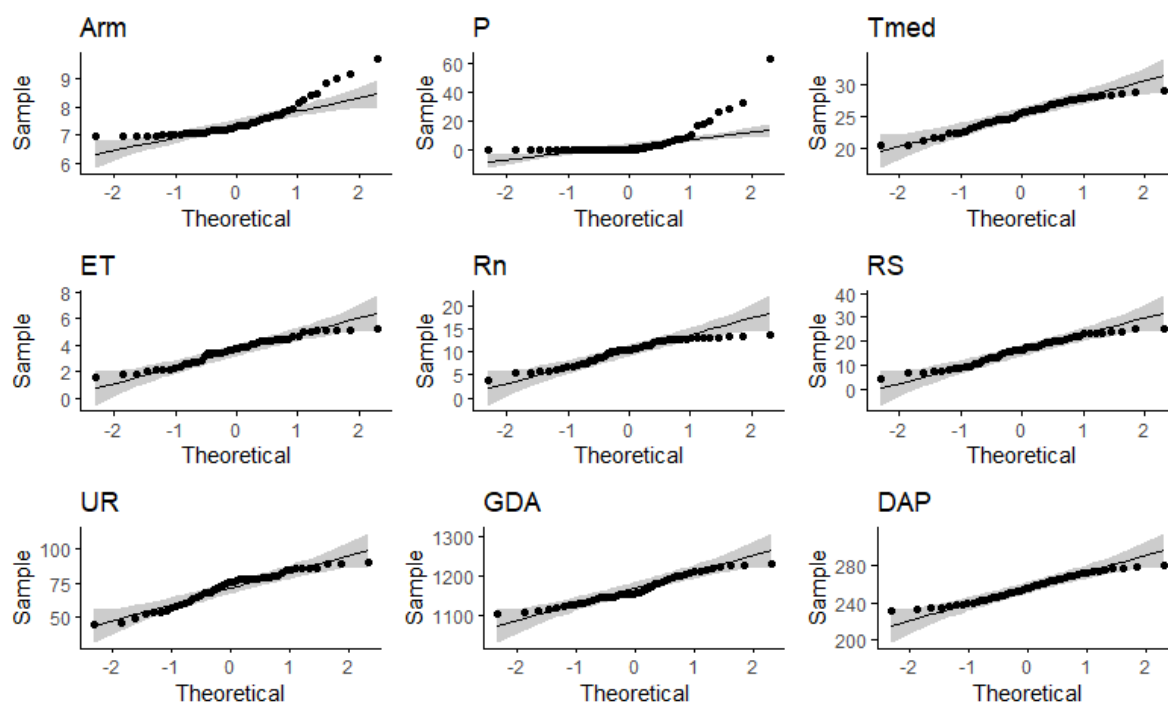
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.7 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 263 DAP.



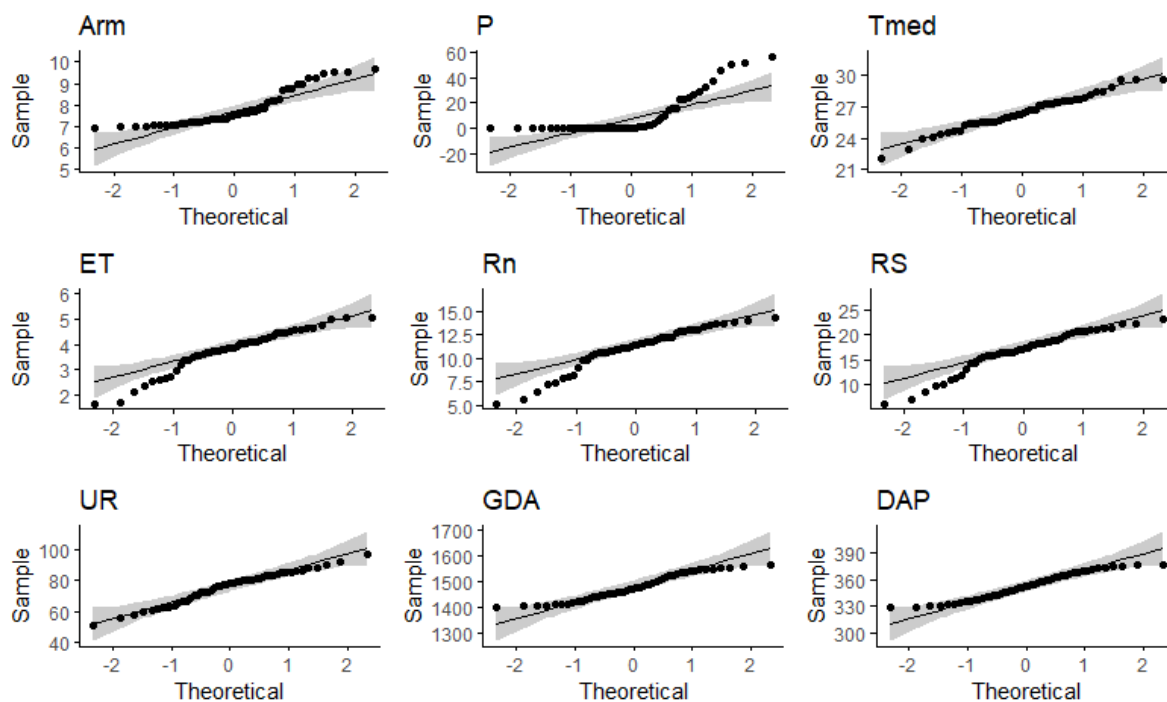
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.8 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 279 DAP.



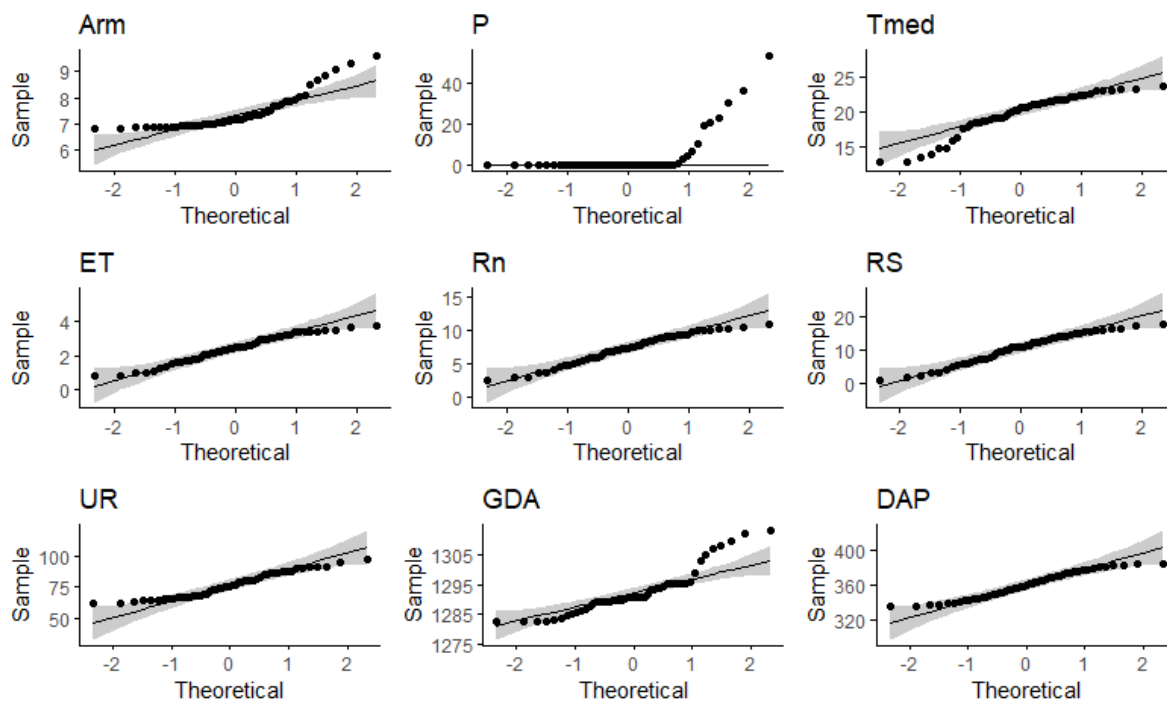
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.9 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 377 DAP.



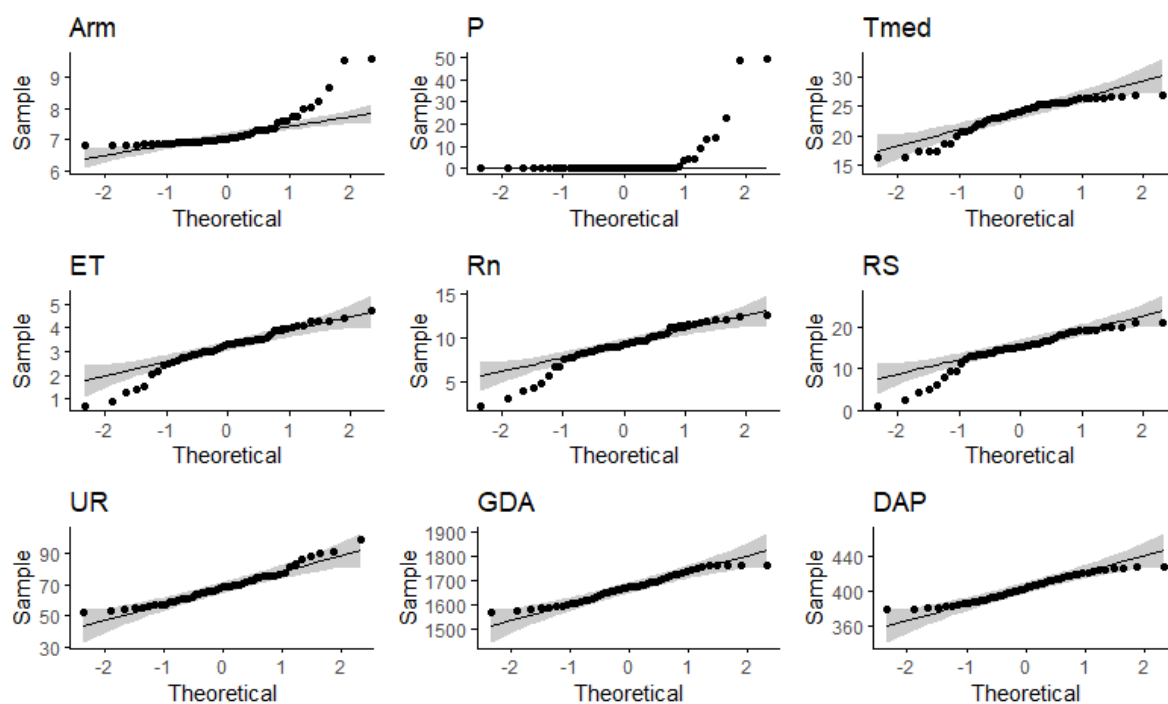
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.10 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 385 DAP.



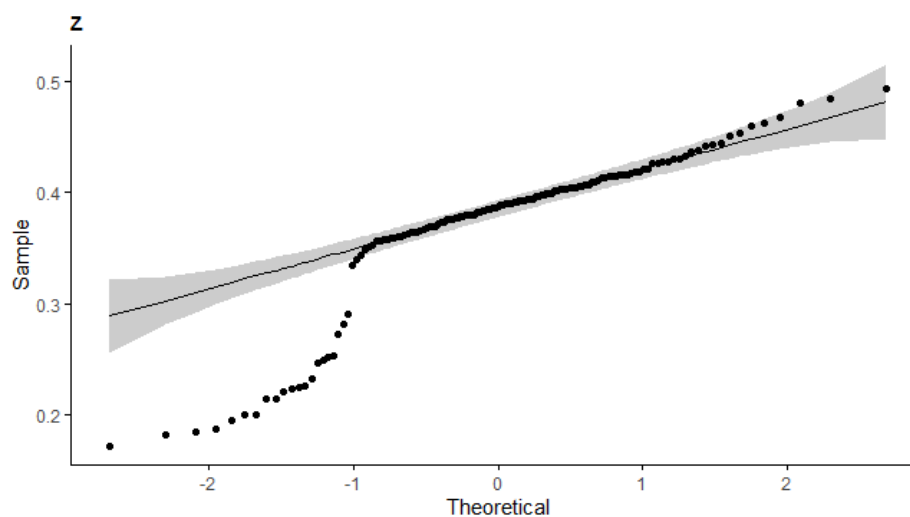
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.11 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) AOS 428 DAP.



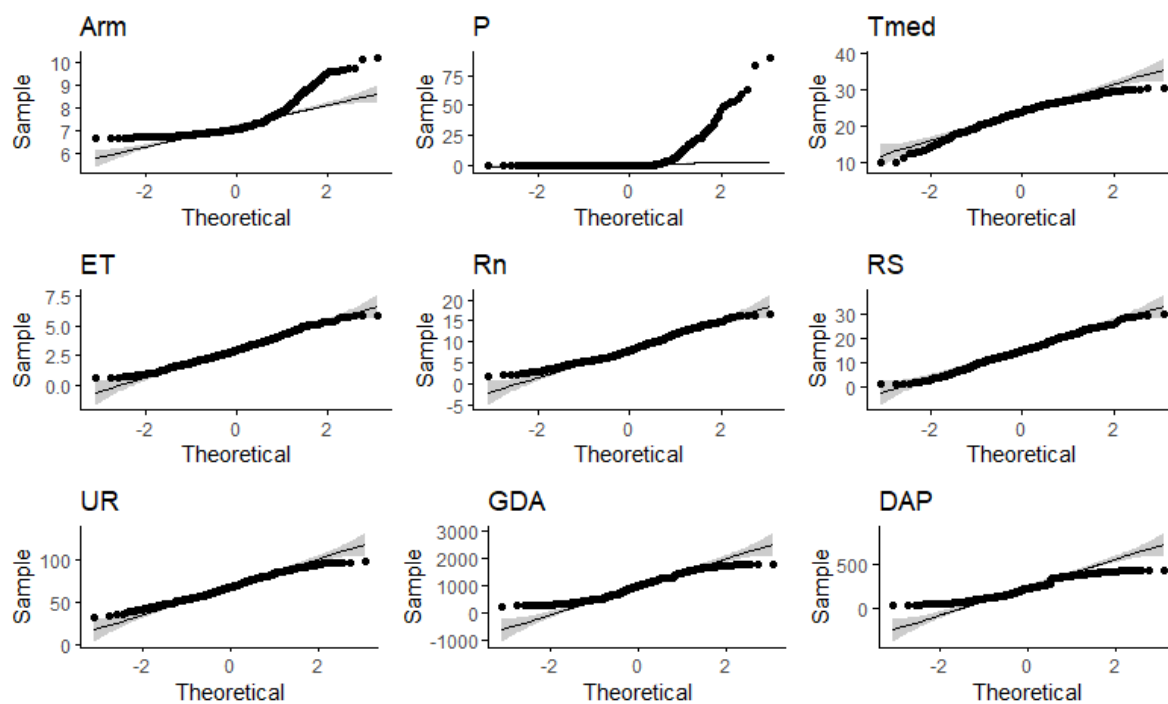
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.12 – NORMALIDADE UNIVARIADA DA PROFUNDIDADE EFETIVA RADICULAR (z , m) NO PERÍODO DE 2002 E 2011.



FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A4.13 – NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO SOLO (*Arm*) NO PERÍODO DE 2002 E 2011.



FONTE: a Autora (2022).

APÊNDICE 5 – ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (*DR*), EM RELAÇÃO AOS DIAS APÓS PLANTIO (*DAP*) E CAMADAS DE SOLO.

TABELA A5.1 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DE TRÊS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAMADA DE SOLO NO DAP_{84} , EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
Variedade	2	0,271	4	0,224	0,807
Bloco	4	0,120	2	0,308	0,854
Erro a	1	0,098	3	0,161	0,705
Camada	1	7,518	7	15,076	0,004*
Variedade x Camada	2	0,735	5	0,737	0,506
Erro b	9	4,488	6		
Total	19	13,230	1		
CV 1 (%) =	23,12				
CV 2 (%) =	52,26				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

TABELA A5.2 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DE TRÊS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAMADA DE SOLO NO DAP_{135} , EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
Variedade	2	1,575	6	2,676	0,162
Bloco	4	0,825	3	97,048	0,076
Erro a	1	0,002	2	0,007	0,936
Camada	1	3,095	7	14,046	0,003*
Variedade x Camada	2	0,803	5	1,822	0,207
Erro b	11	2,424	4		
Total	21	8,724	1		
CV 1 (%) =	5,93				
CV 2 (%) =	60,45				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

TABELA A5.3 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DE TRÊS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAMADA DE SOLO NO DAP_{182} , EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
Variedade	2	4,224	6	4,168	0,064
Bloco	4	7,924	5	7,273	0,270
Erro a	1	0,272	2	0,538	0,487
Camada	2	94,147	7	62,167	0,000*
Variedade x Camada	4	4,407	4	1,455	0,248
Erro b	23	17,416	3		
Total	36	128,391	1		
CV 1 (%) =	18,58				
CV 2 (%) =	30,97				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

TABELA A5.4 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DE TRÊS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAMADA DE SOLO NO DAP_{231} , EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
Variedade	2	0,391	2	0,082	0,922
Bloco	4	2,182	3	0,198	0,919
Erro a	2	5,504	6	1,156	0,376
Camada	2	90,469	7	29,736	0,000*
Variedade x Camada	4	3,825	4	0,629	0,647
Erro b	22	33,466	5		
Total	36	135,837	1		
CV 1 (%) =	51,72				
CV 2 (%) =	38,45				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

TABELA A5.5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DE TRÊS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAMADA DE SOLO NO DAP_{279} , EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
Variedade	2	2,977	5	1,632	0,272
Bloco	4	10,435	6	2,890	0,412
Erro a	1	0,903	4	0,989	0,358
Camada	2	150,009	7	102,564	0,000*
Variedade x Camada	4	1,038	2	0,355	0,838
Erro b	22	16,088	3		
Total	35	181,451	1		
CV 1 (%) =	35,63				
CV 2 (%) =	32,07				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

TABELA A5.6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DE TRÊS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAMADA DE SOLO NO DAP_{377} , EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
Variedade	2	5,891	4	1,179	0,362
Bloco	4	8,096	2	0,237	0,891
Erro a	1	8,531	7	3,413	0,107
Camada	2	105,558	6	20,129	0,000*
Variedade x Camada	4	19,031	5	1,815	0,160
Erro b	23	60,308	3		
Total	36	207,417	1		
CV 1 (%) =	81,03				
CV 2 (%) =	44,93				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

TABELA A5.7 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DE TRÊS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAMADA DE SOLO NO DAP_{428} , EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
Variedade	2	2,370	3	0,704	0,531
Bloco	4	1,240	2	0,120	0,963
Erro a	2	5,160	7	1,532	0,290
Camada	2	282,800	6	109,971	0,000*
Variedade x Camada	4	5,050	4	0,982	0,438
Erro b	22	28,290	5		
Total	36	324,910	1		
CV 1 (%) =	34,89				
CV 2 (%) =	24,62				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

TABELA A5.8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DOS DIAS APÓS PLANTIO (DAP) E VARIEDADES NA CAMADA DE SOLO DE 0-20 cm, EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
DAPs	6	505,210	7	37,922	0,000*
Bloco	4	10,090	4	1,794	0,388
Erro a	2	2,810	2	0,633	0,541
Variedade	2	3,830	3	0,646	0,528
DAPs x Variedade	12	35,360	5	0,995	0,467
Erro b	51	151,050	6		
Total	77	708,340	1		
CV 1 (%) =	25,47				
CV 2 (%) =	36,96				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

TABELA A5.9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DOS DIAS APÓS PLANTIO (DAP) E VARIEDADES NA CAMADA DE SOLO DE 20-40 cm, EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
DAPs	6	82,204	7	29,955	0,000*
Bloco	4	1,603	4	13,355	0,071
Erro a	2	0,060	2	0,066	0,937
Variedade	2	1,122	5	1,504	0,232
DAPs x Variedade	12	8,179	6	1,826	0,069
Erro b	50	18,659	3		
Total	76	111,826	1		
CV 1 (%) =	9,28				
CV 2 (%) =	32,72				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

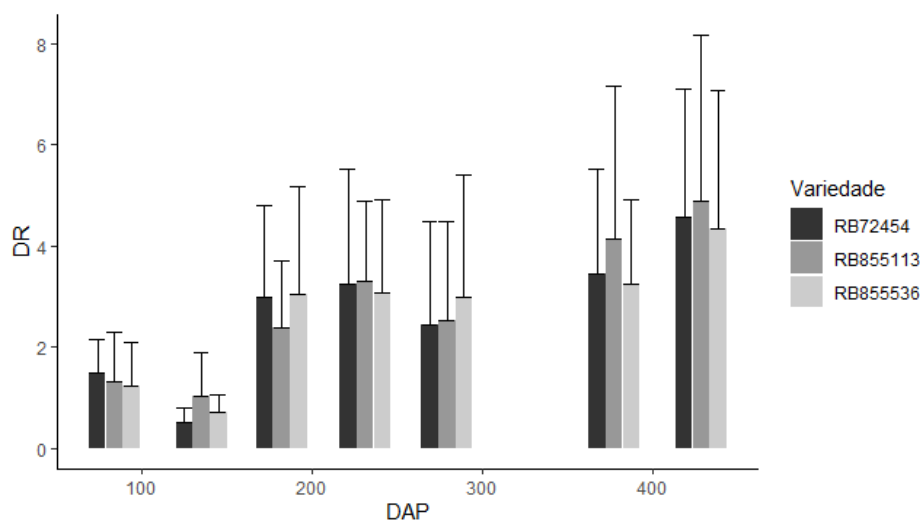
TABELA A5.10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) NA AVALIAÇÃO DOS DIAS APÓS PLANTIO (DAP) E VARIEDADES NA CAMADA DE SOLO DE 40-60 cm, EM CICLO DE CANA PLANTA, NO MUNICÍPIO DE PARANAVÁI, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr (> Fc)
DAPs	4	15,656	7	16,964	0,000*
Bloco	4	0,406	2	0,177	0,924
Erro a	1	0,575	6	2,492	0,135
Variedade	2	0,629	3	0,766	0,472
DAPs x Variedade	8	2,616	4	0,797	0,609
Erro b	39	16,014	5		
Total	58	35,896	1		
CV 1 (%) =	39,71				
CV 2 (%) =	33,55				

GL – Graus de liberdade; SQ – Soma do Quadrado; QM – Quadrado médio; Fc – F calculado; Pr (> Fc) – Probabilidade de significância; * Significativo à 5 % de probabilidade pelo teste F; CV – Coeficiente de variação (%).

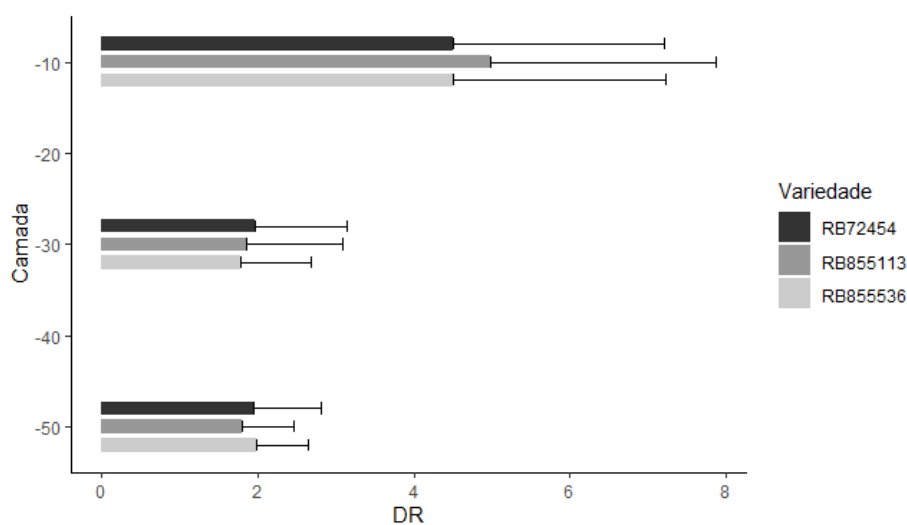
APÊNDICE 6 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR)

FIGURA A6.1 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}), EM CICLO CANA-PLANTA, DAS VARIEDADES RB72454, RB855113 E RB855536, NOS DIAS APÓS O PLANTIO (DAP), NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.



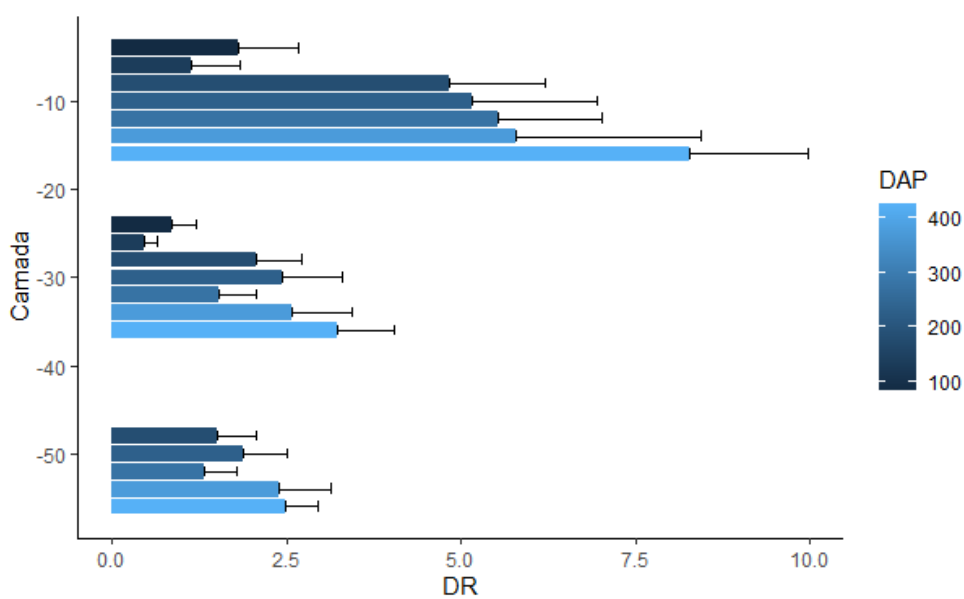
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A6.2 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}), EM CICLO CANA-PLANTA, NAS CAMADAS 0-20 cm; 20-40 cm e 40-60 cm, DAS VARIEDADES RB72454, RB855113 E RB855536, NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.



FONTE: a Autora (2022).

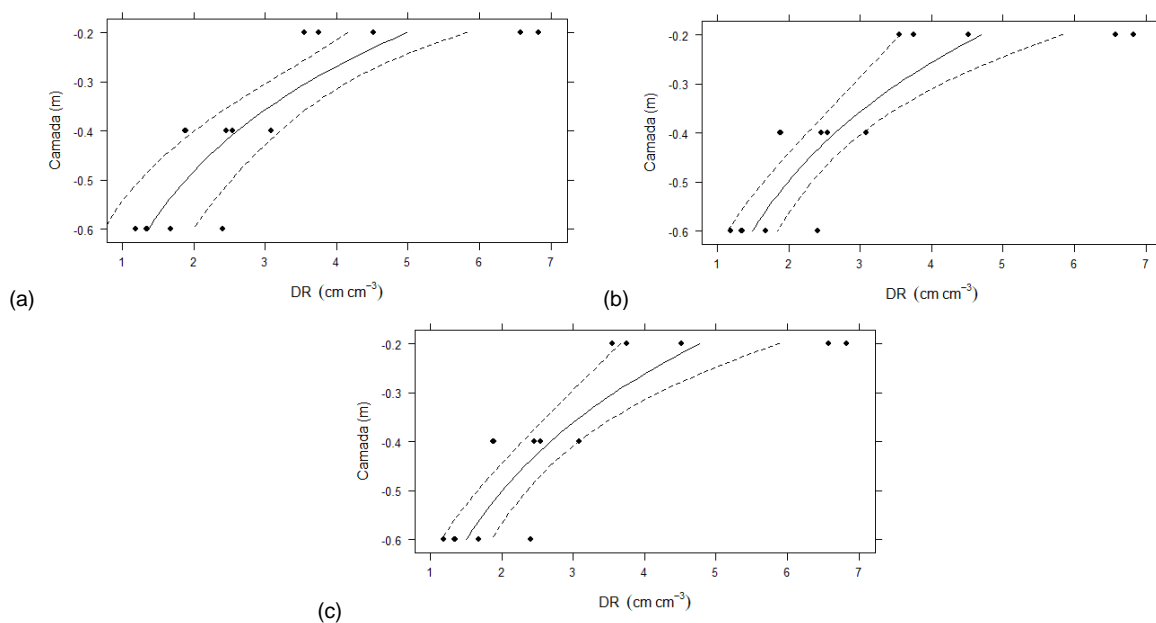
FIGURA A6.3 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}), EM CICLO CANA-PLANTA, NAS CAMADAS 0-20 cm; 20-40 cm e 40-60 cm, NOS DIAS APÓS PLANTIO (DAP), NO MUNICÍPIO DE PARANAVÁI, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ, SAFRA 2002/2003.



FONTE: a Autora (2022).

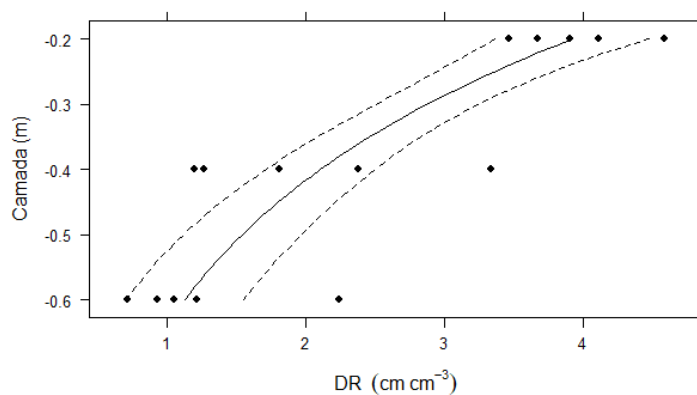
APÊNDICE 7 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO COM AS BANDAS DE CONFIANÇA

FIGURA A7.1 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{182} , PARA VARIEDADE RB72454, MODELAGEM DA VARIÂNCIA: a) CONSTANTE; b) POTENCIAL; e, c) EXPONENCIAL.



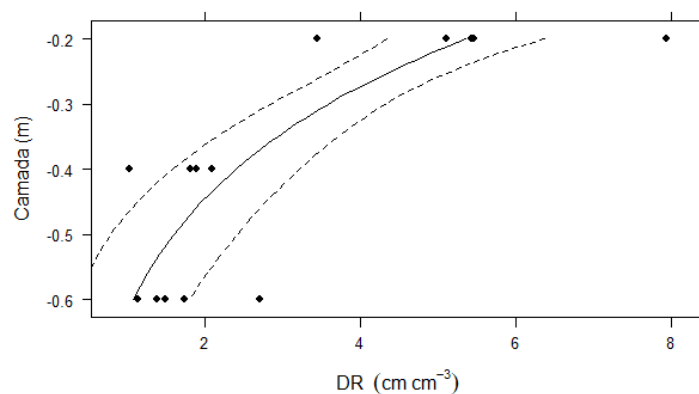
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.2 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{182} , PARA VARIEDADE RB855113, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



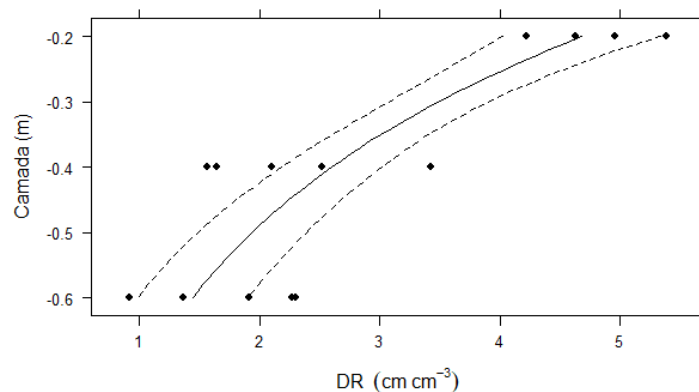
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.3 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{182} , PARA VARIEDADE RB85536, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



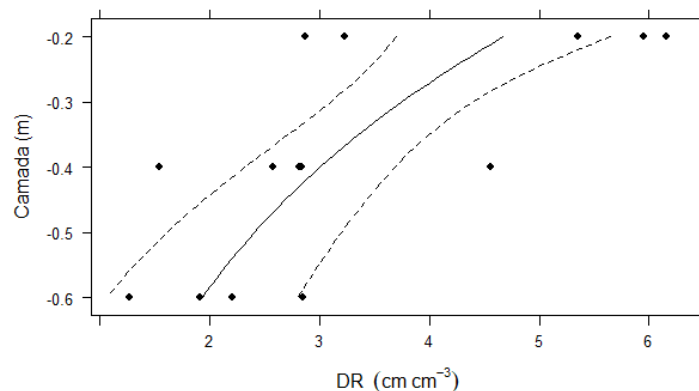
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.4 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{231} , PARA VARIEDADE RB72454, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



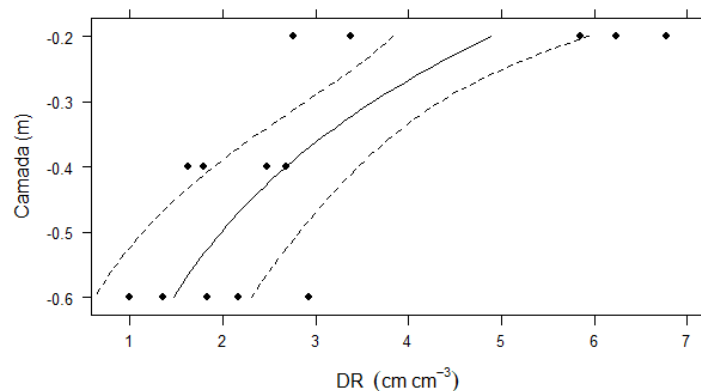
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.5 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{231} , PARA VARIEDADE RB855113, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



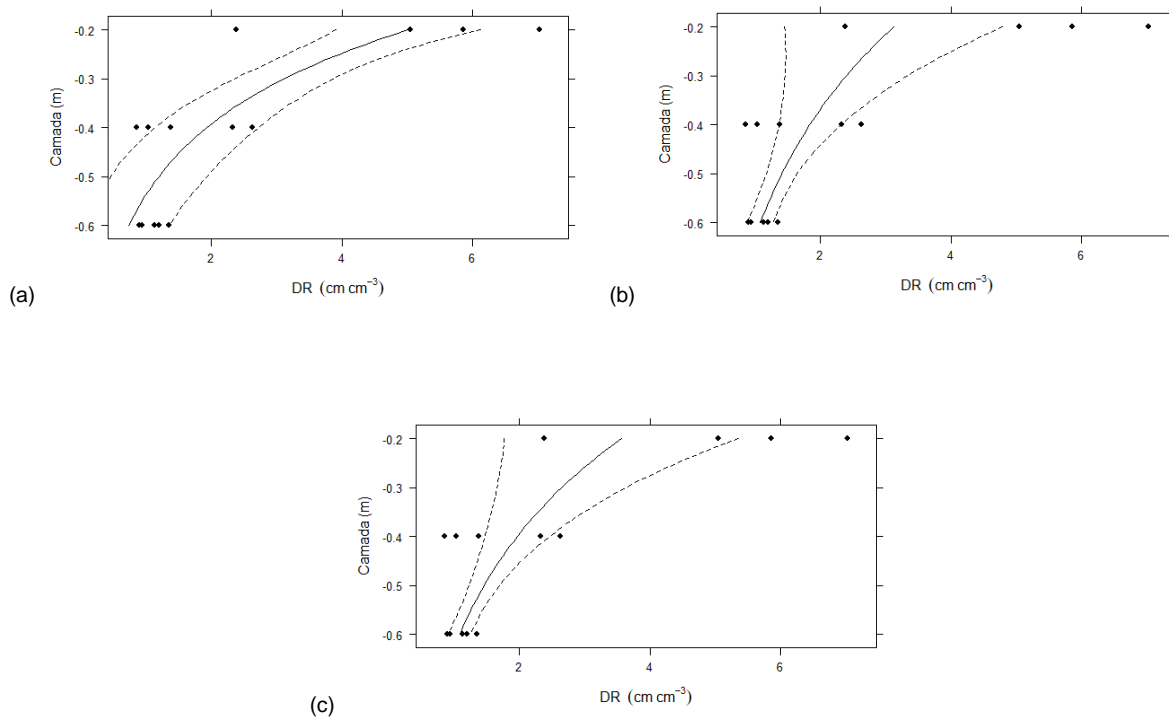
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.6 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{231} , PARA VARIEDADE RB855536, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



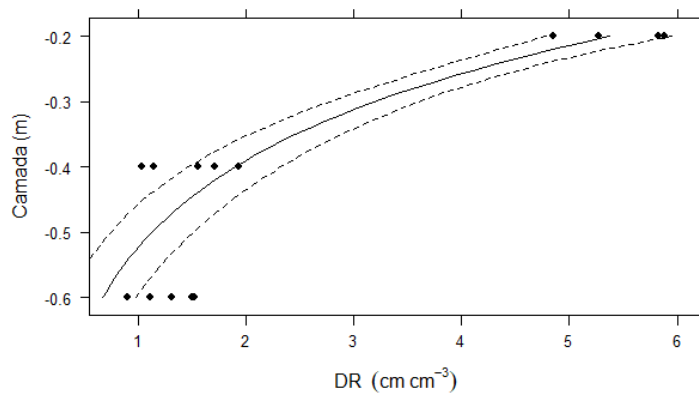
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.7 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{279} , PARA VARIEDADE RB72454, MODELAGEM DA VARIÂNCIA: a) CONSTANTE; b) POTENCIAL; e, c) EXPONENCIAL.



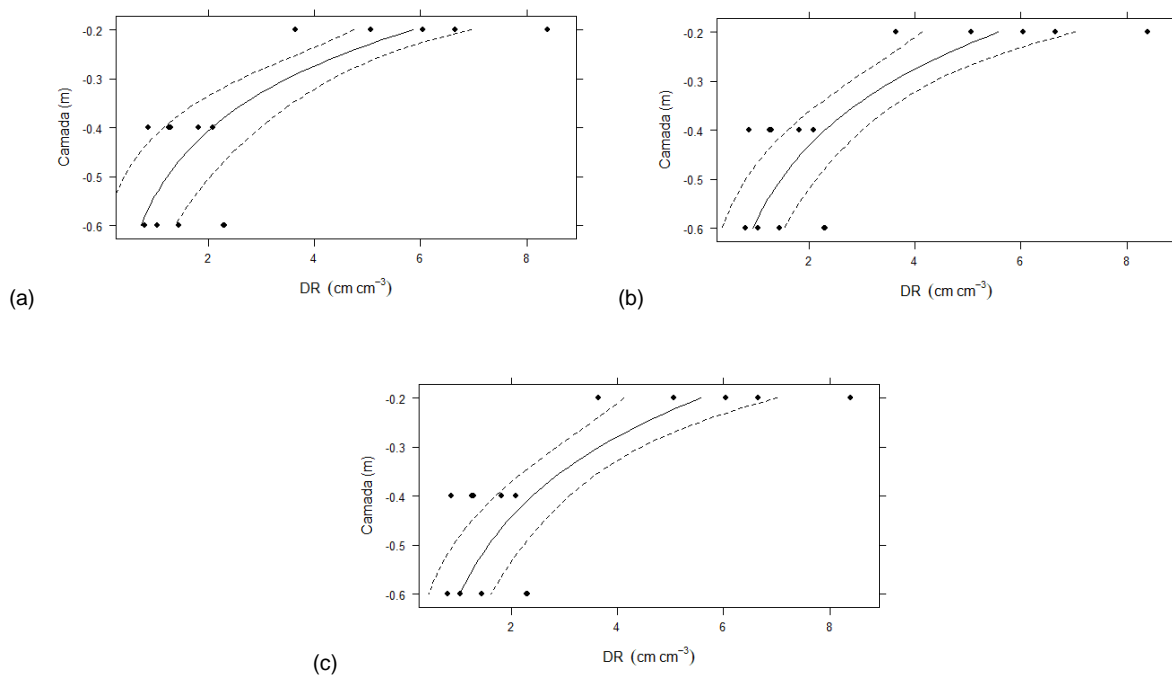
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.8 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{279} , PARA VARIEDADE RB855113, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



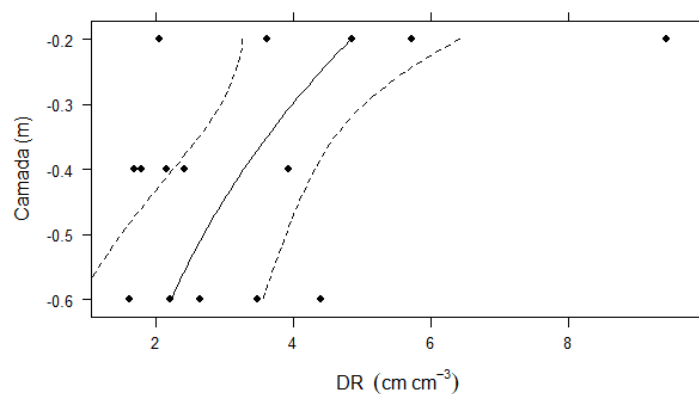
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.9 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{279} , PARA VARIEDADE RB855536, MODELAGEM DA VARIÂNCIA: a) CONSTANTE; b) POTENCIAL; e, c) EXPONENCIAL.



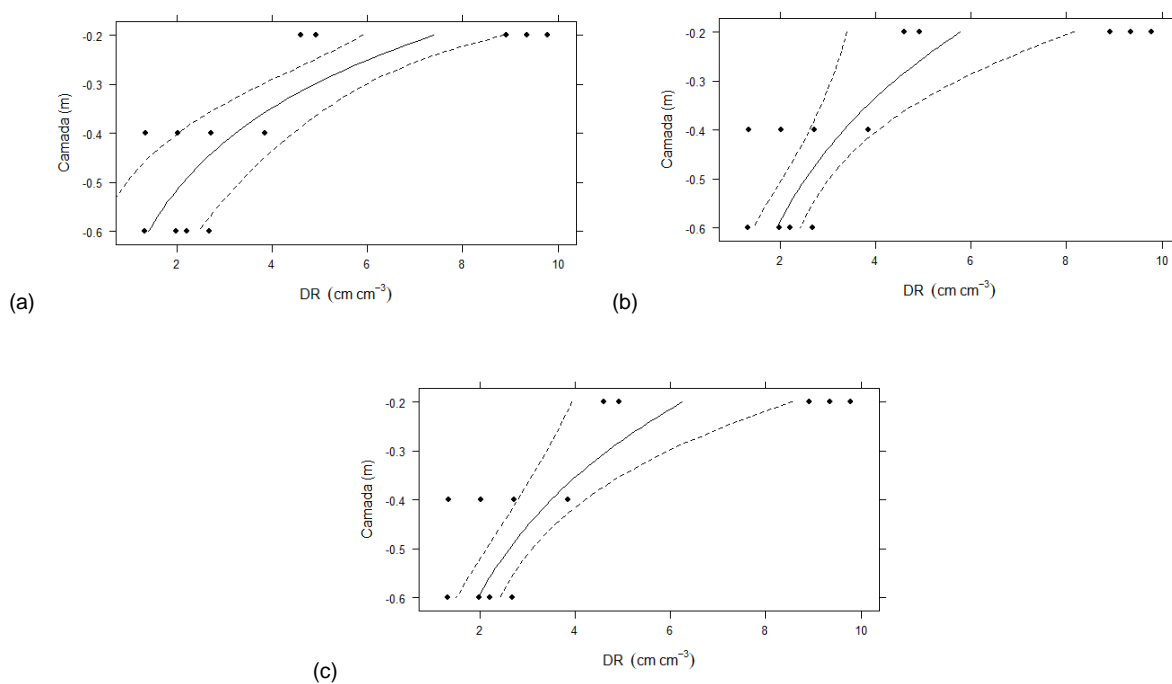
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.10 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{377} , PARA VARIEDADE RB72454, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



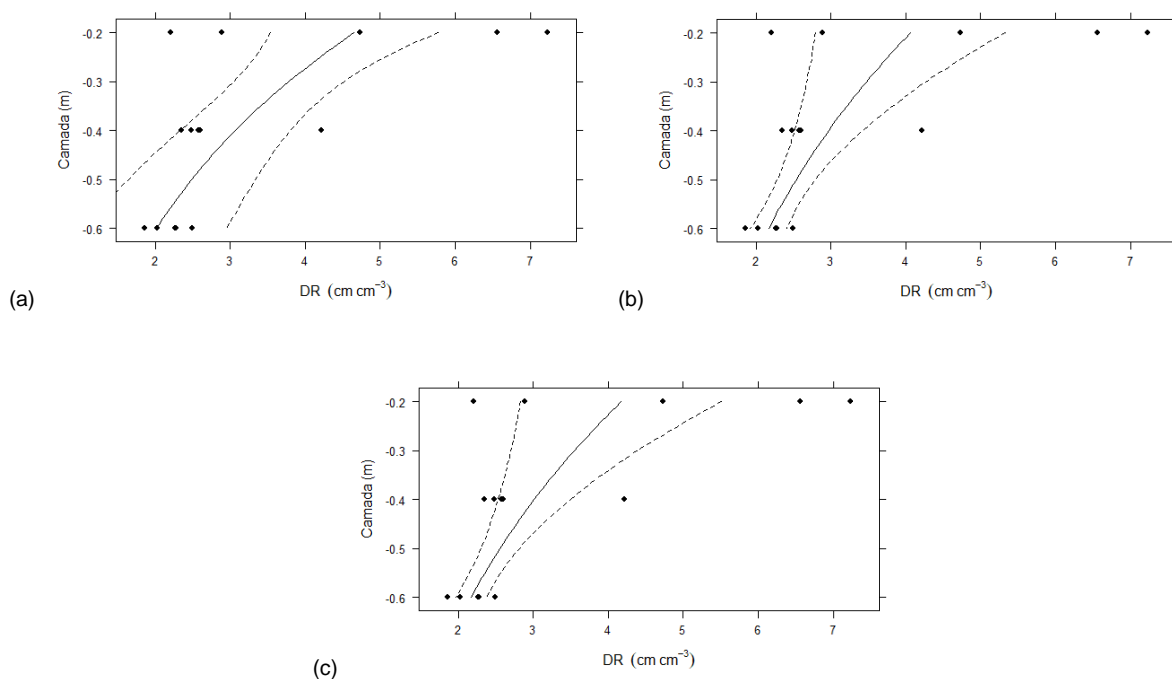
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.11 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{377} , PARA VARIEDADE RB855113, MODELAGEM DA VARIÂNCIA: a) CONSTANTE; b) POTENCIAL; e, c) EXPONENCIAL.



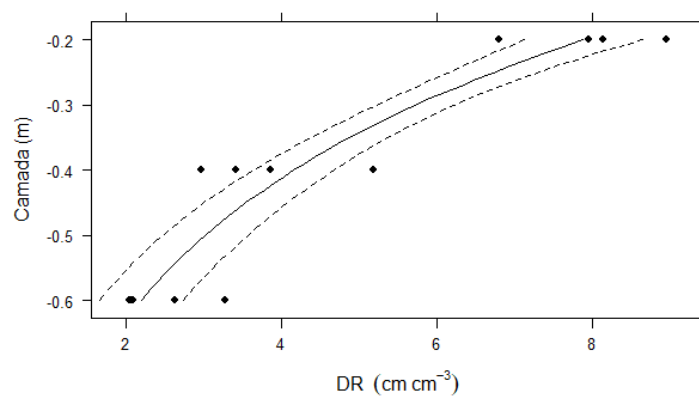
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.12 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{377} , PARA VARIEDADE RB855536, MODELAGEM DA VARIÂNCIA: a) CONSTANTE; b) POTENCIAL; e, c) EXPONENCIAL.



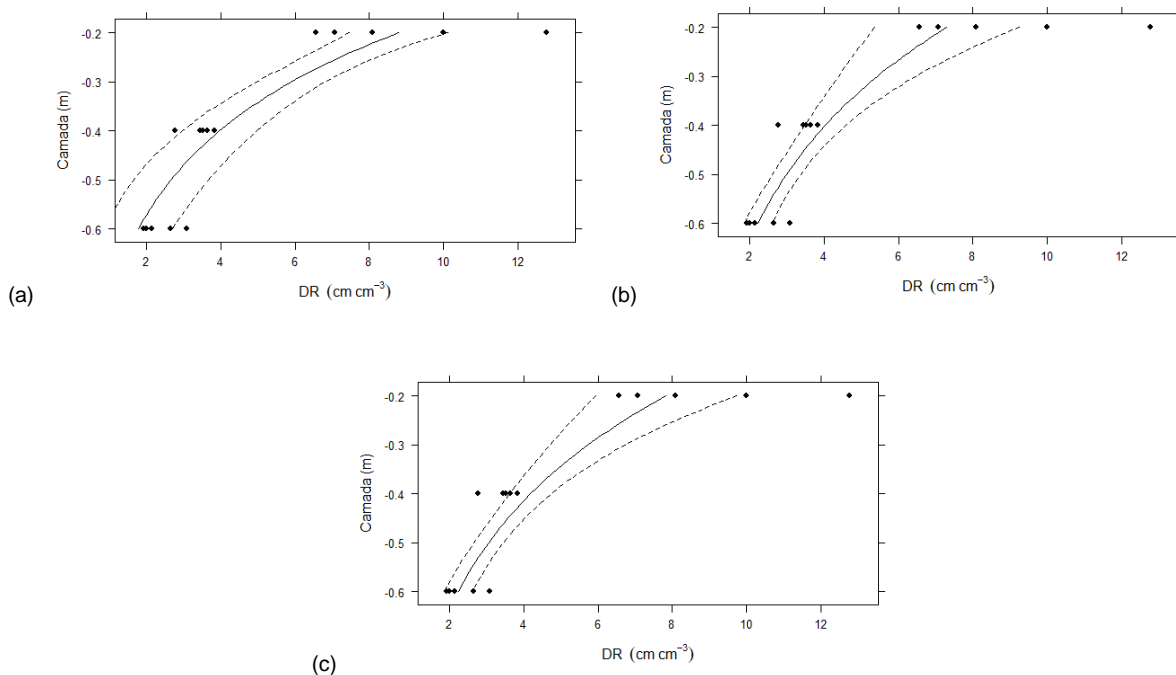
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.13 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{428} , PARA VARIEDADE RB72454, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



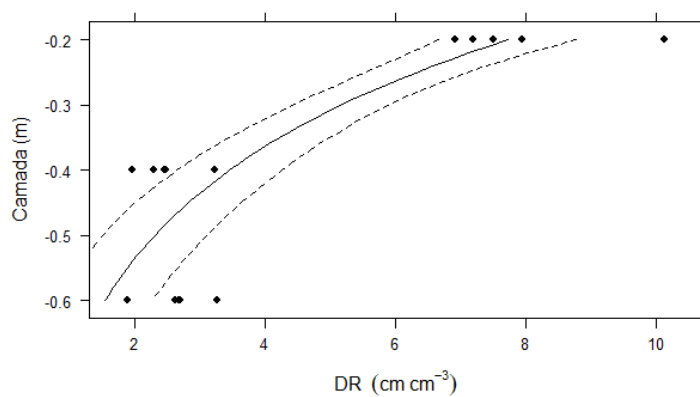
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A7.14 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{428} , PARA VARIEDADE RB855113, MODELAGEM DA VARIÂNCIA: a) CONSTANTE; b) POTENCIAL; e, c) EXPONENCIAL.



FONTE: a Autora (2022).

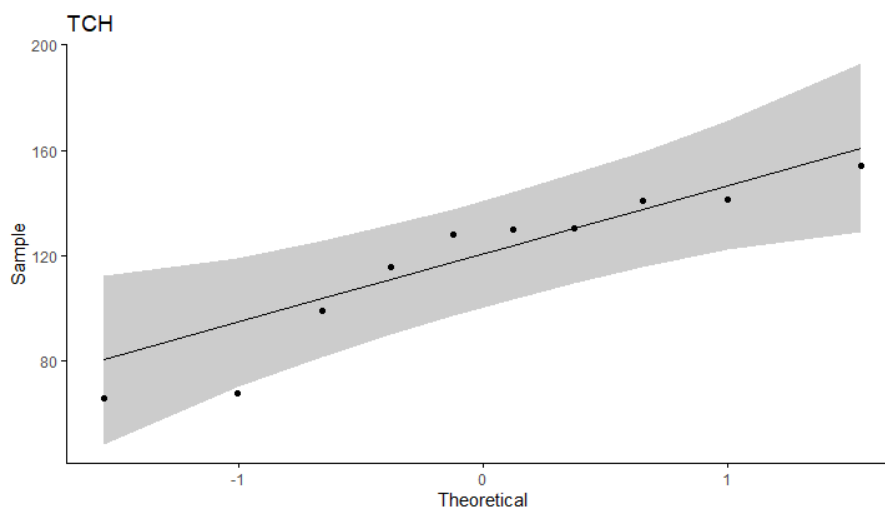
FIGURA A7.15 – DENSIDADE DE COMPRIMENTO RADICULAR (DR , cm cm^{-3}) EM FUNÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO, NO DAP_{428} , PARA VARIEDADE RB855536, MODELAGEM DA VARIÂNCIA CONSTANTE.



FONTE: a Autora (2022).

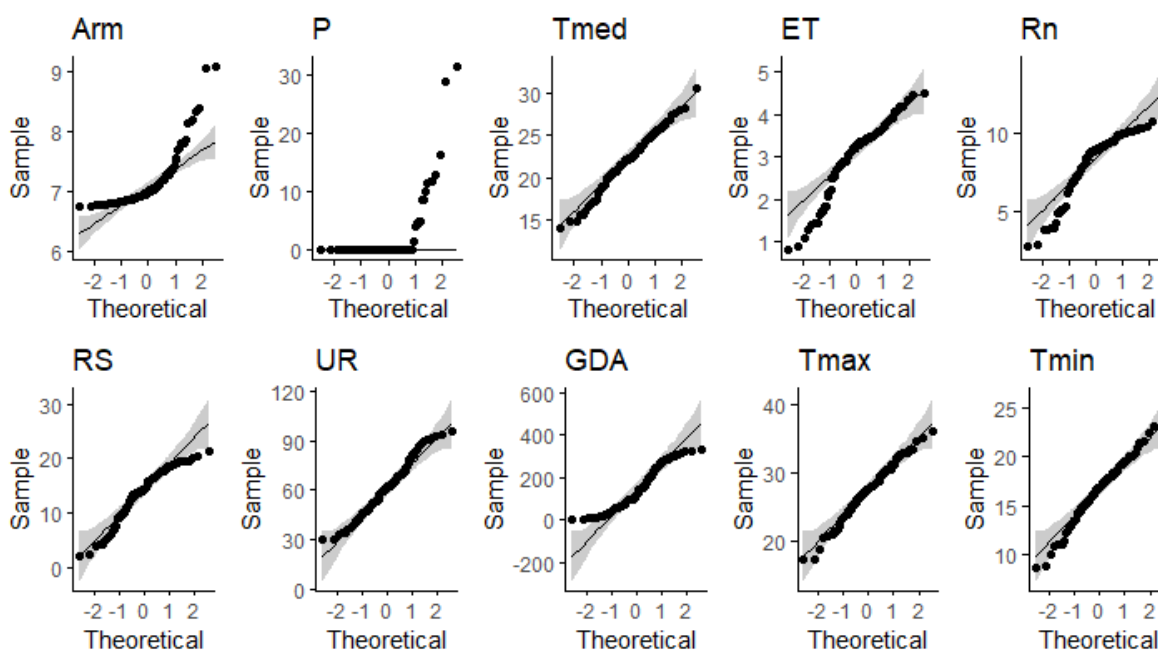
APÊNDICE 8 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DO RENDIMENTO POTENCIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR (*TCH*), DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA NO SOLO (*Arm*)

FIGURA A8.1 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DO RENDIMENTO POTENCIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR (*TCH*, tonelada de colmo por hectare), NAS SAFRAS ANALISADAS (1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008 e 2018 e 2019).



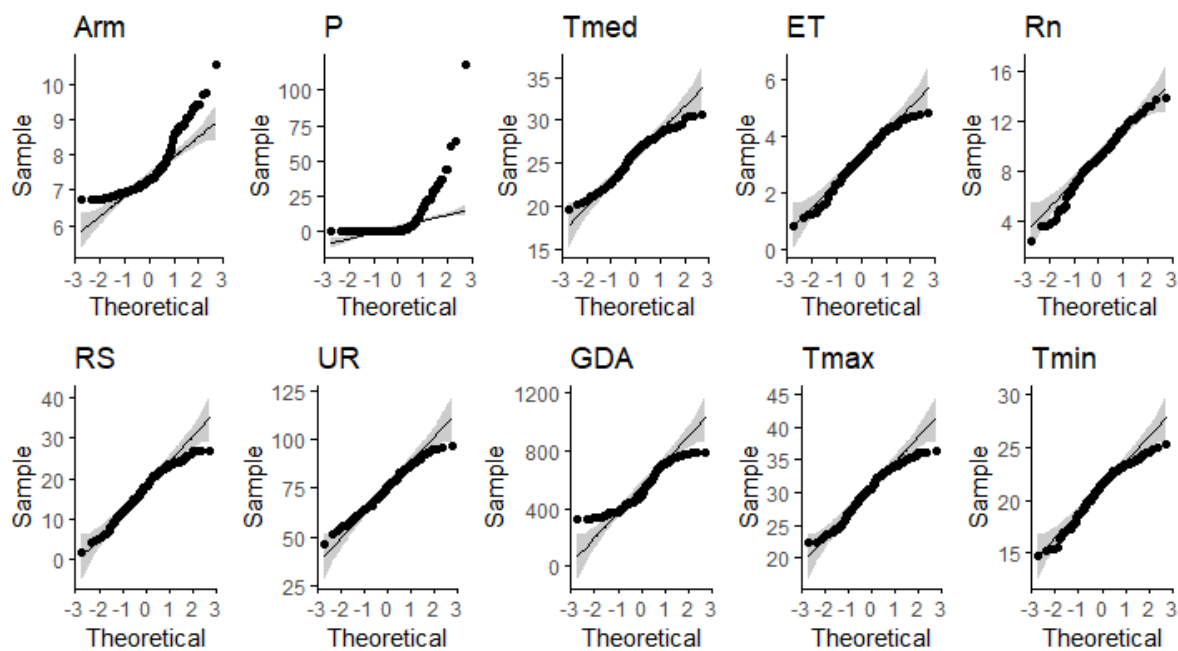
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.2 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 1998.



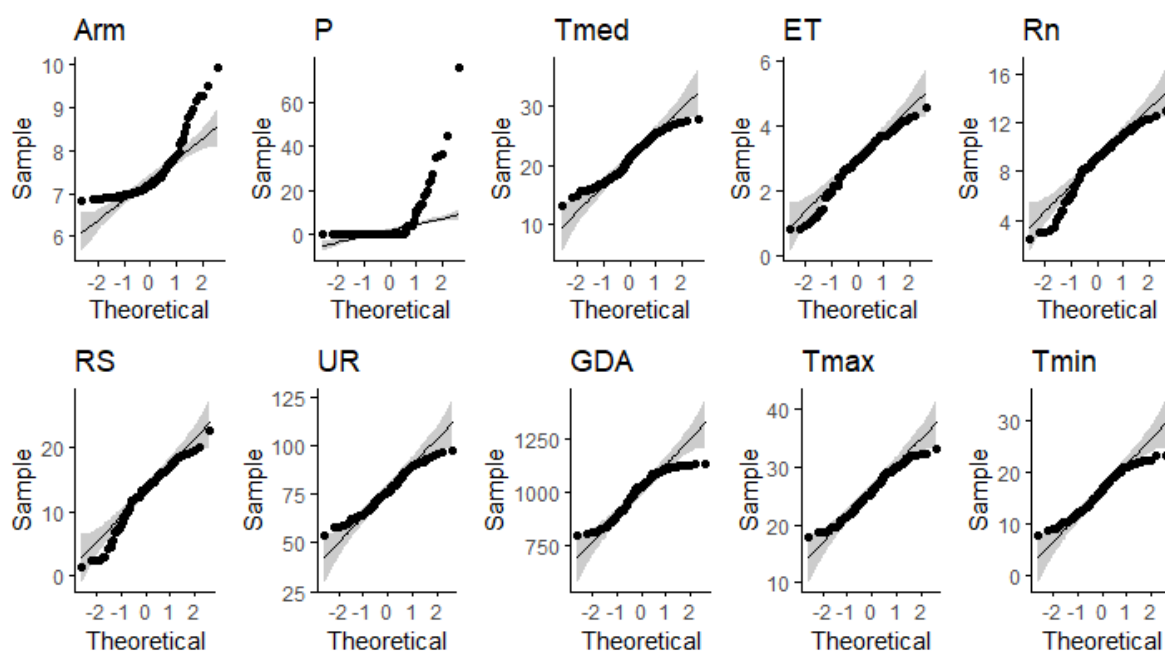
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.3 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 1998.



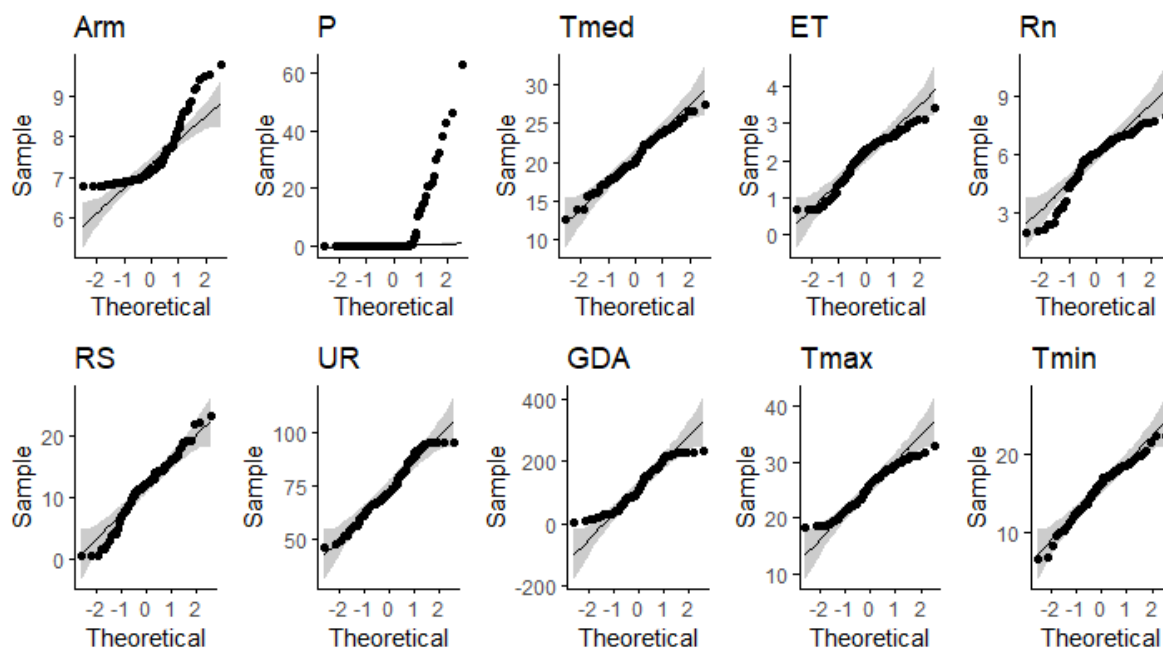
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.4 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 1998.



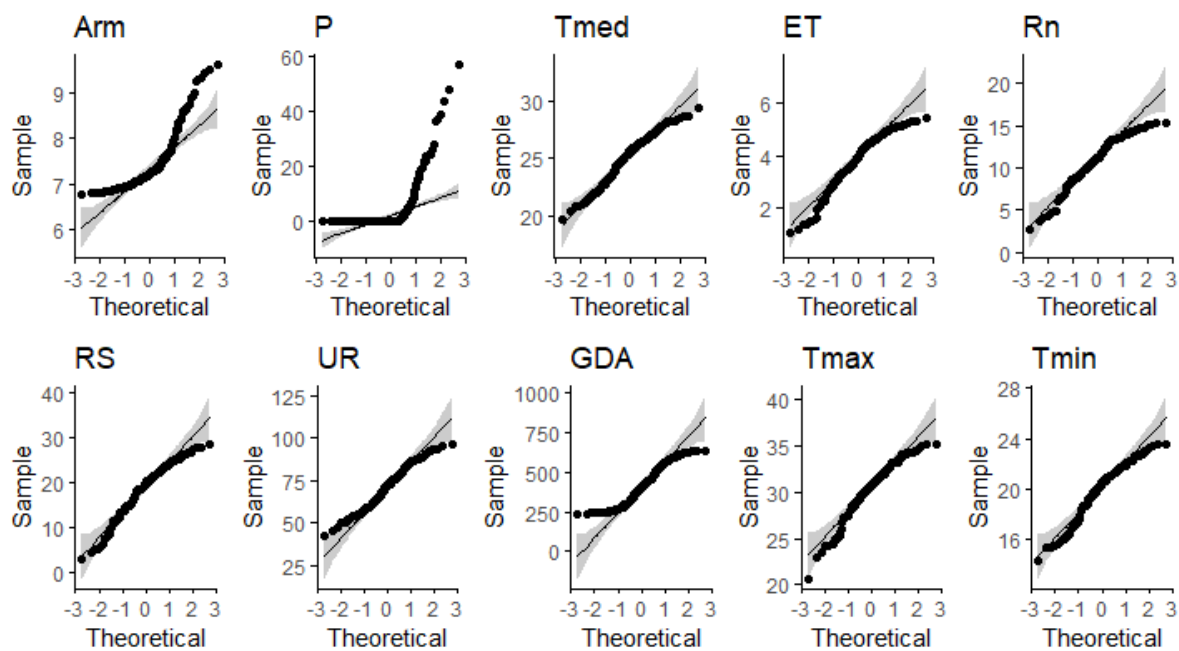
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.5 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 1999.



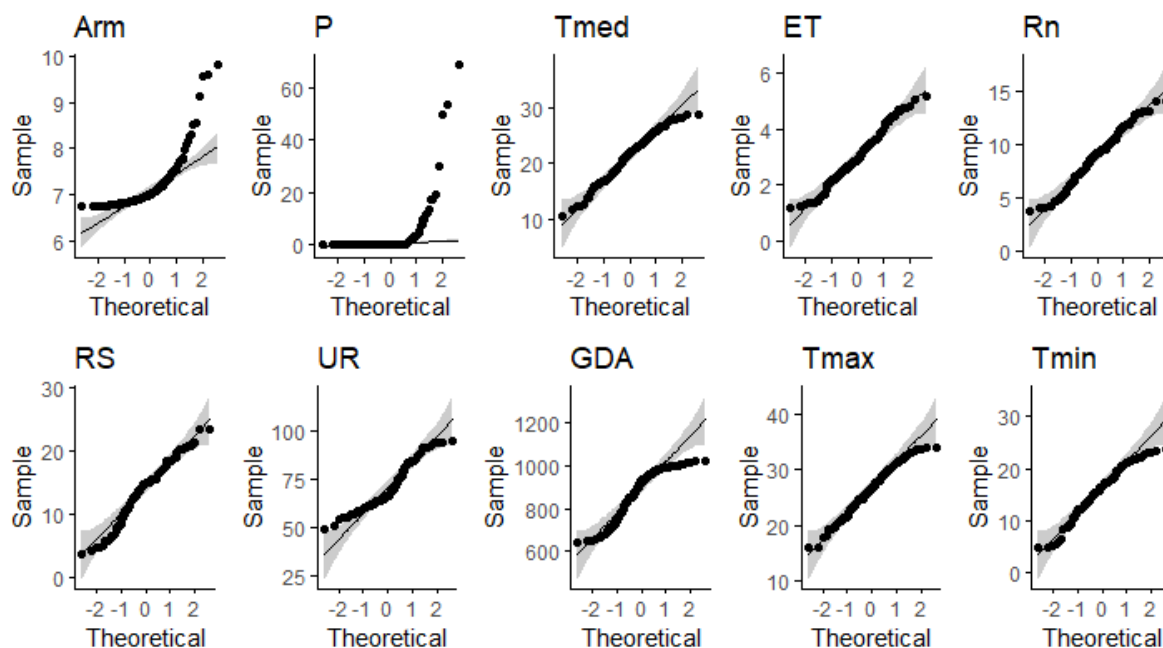
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.6 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 1999.



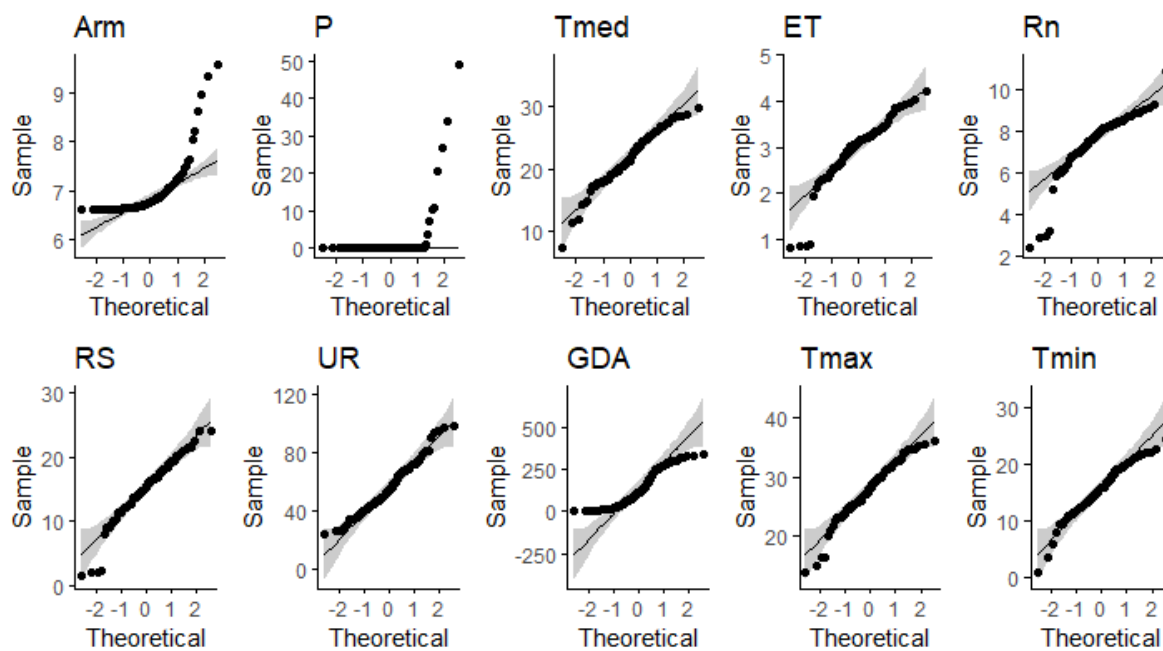
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.7 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 1999.



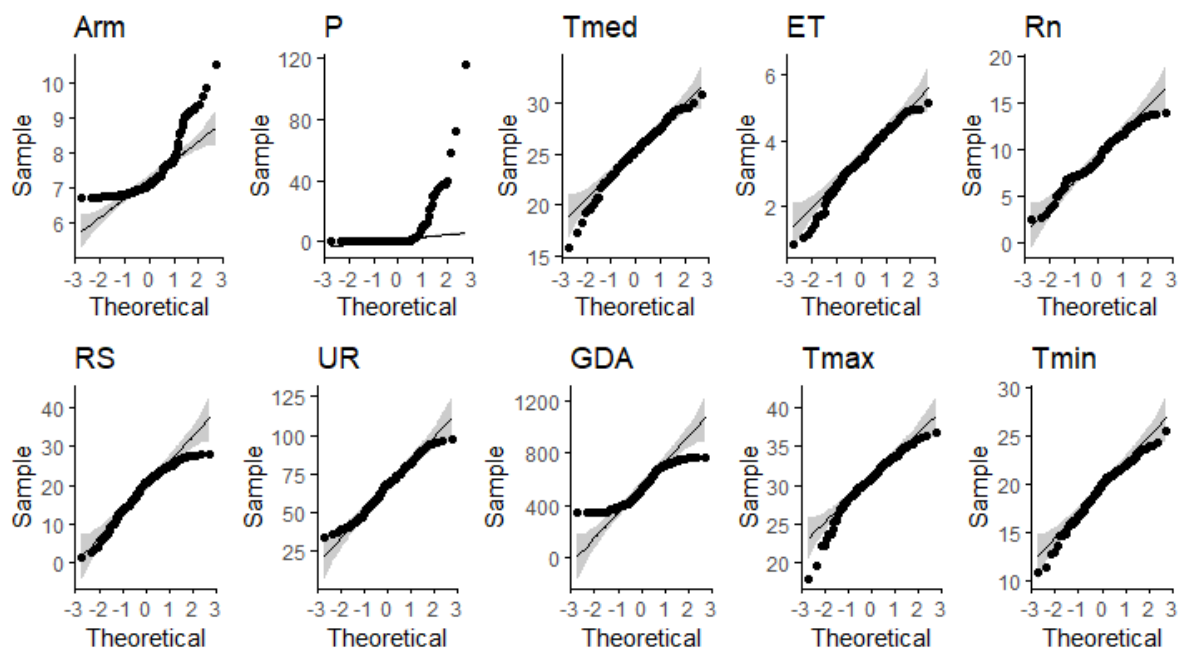
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.8 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2000.



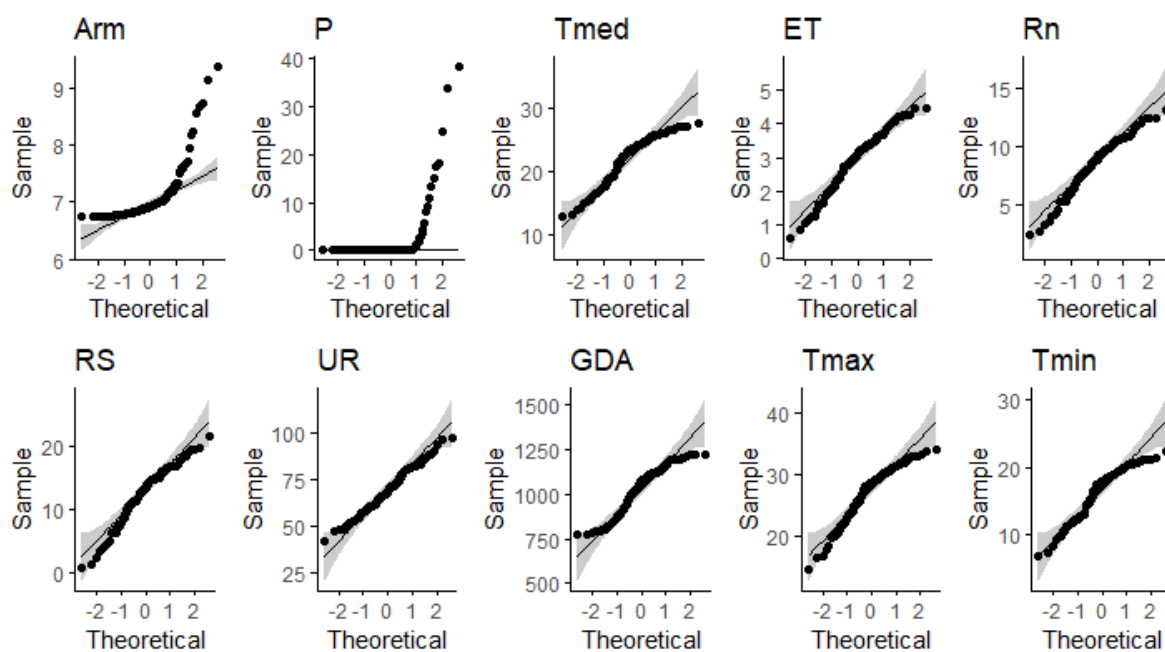
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.9 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2000.



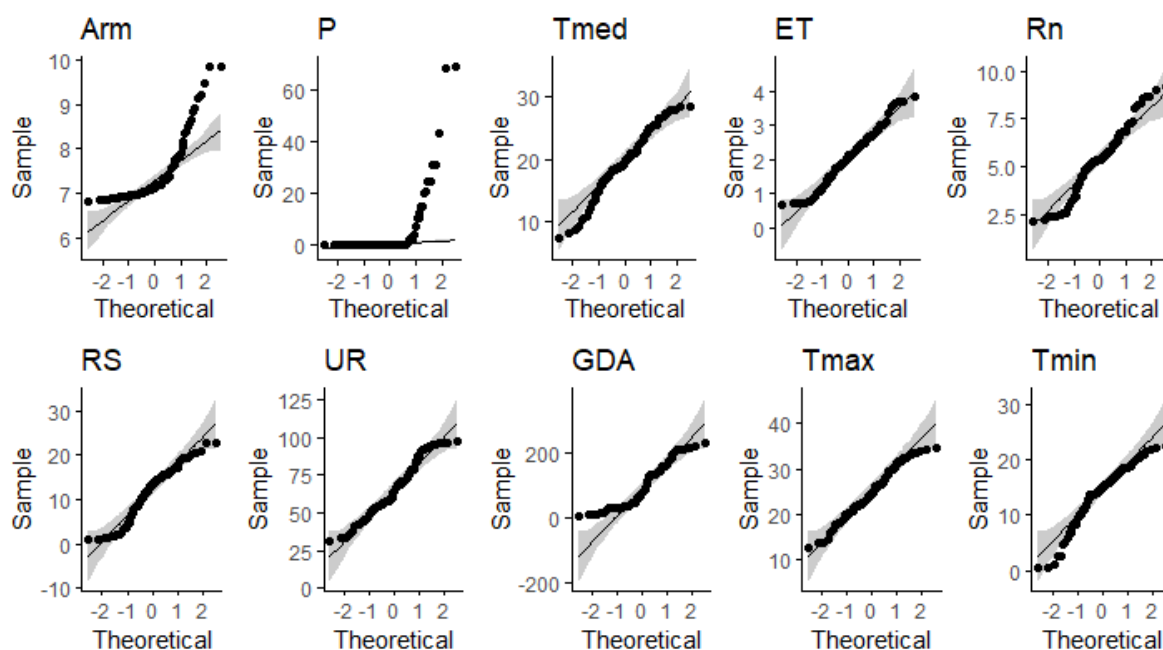
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.10 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2000.



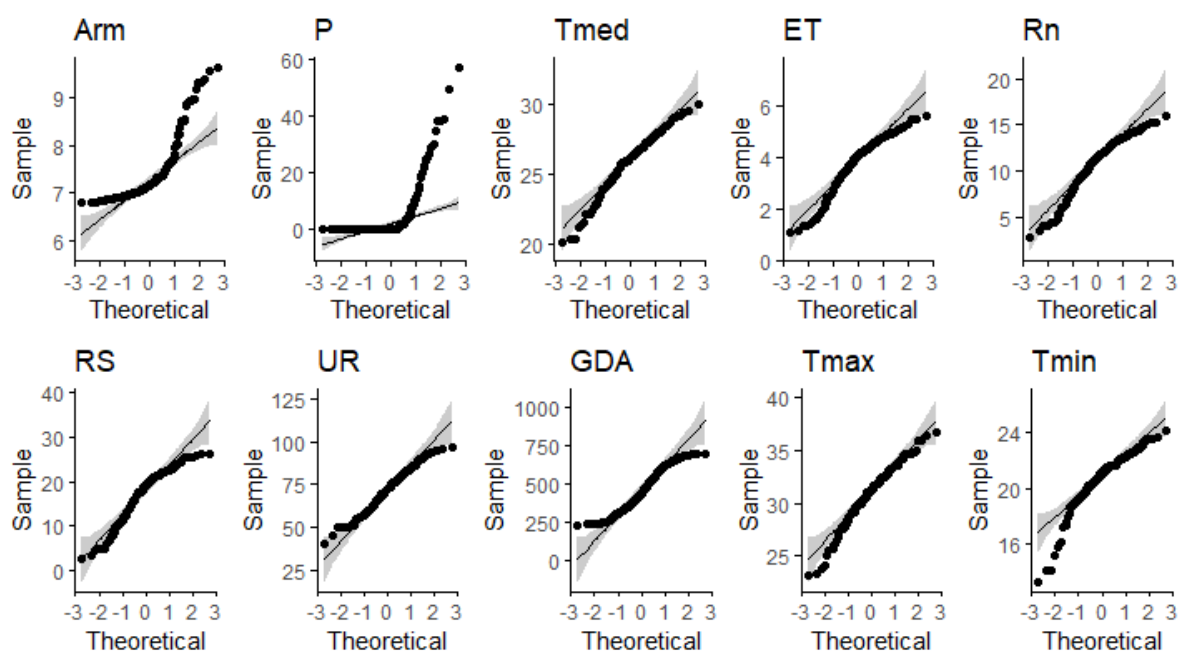
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.11 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2001.



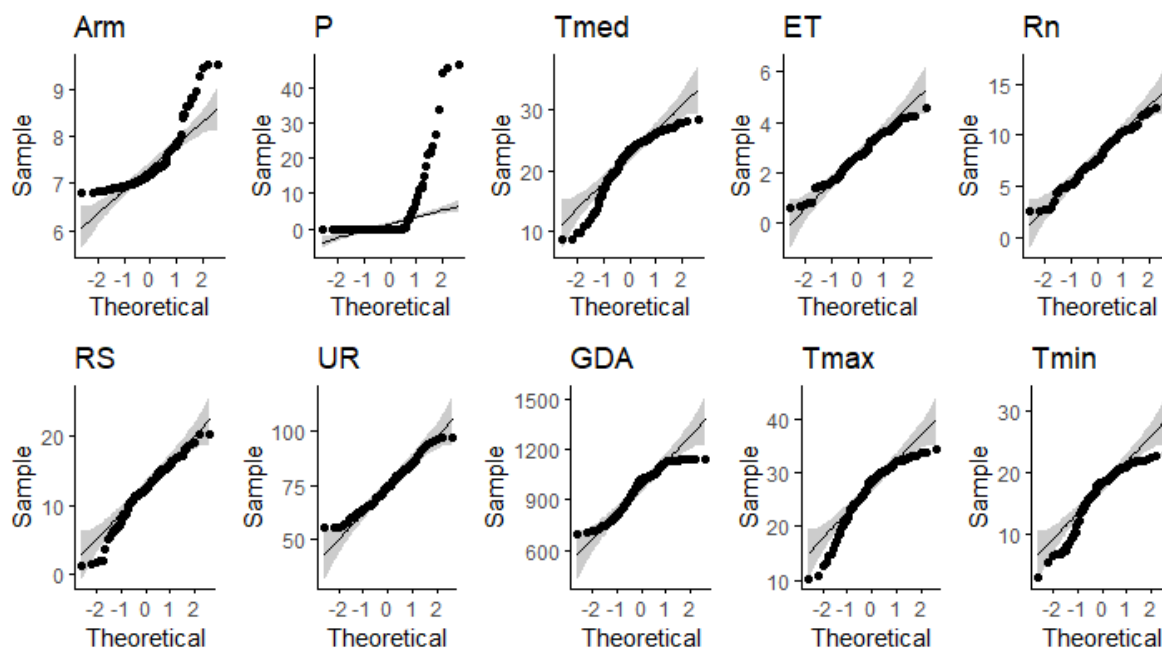
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.12 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2001.



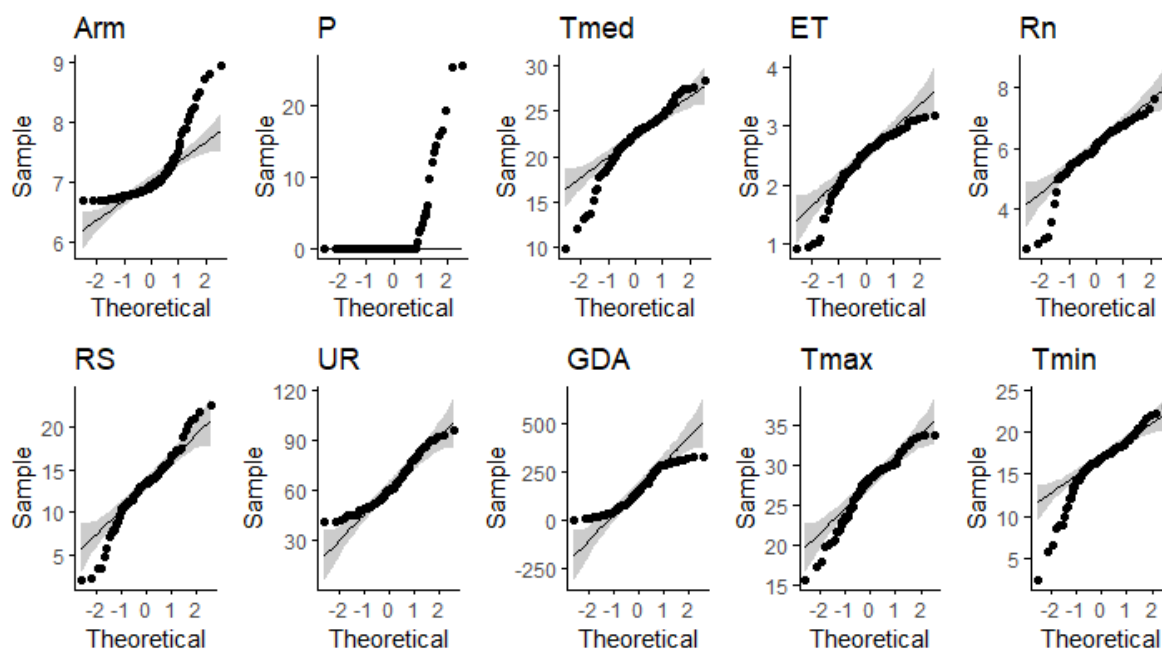
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.13 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2001.



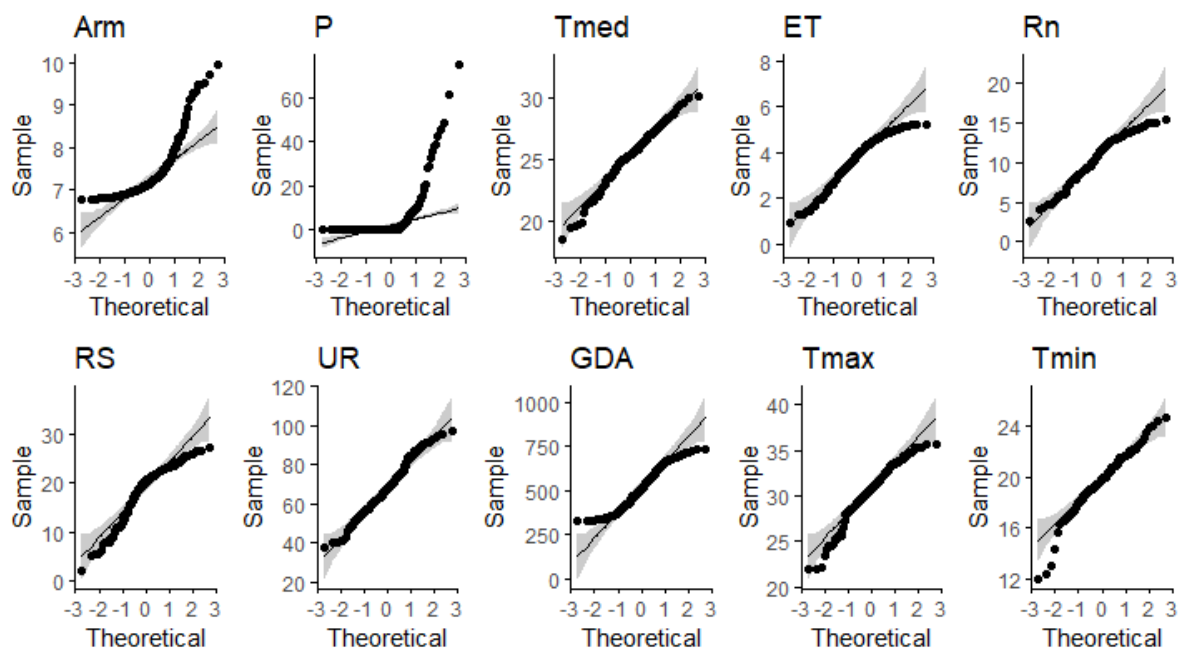
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.14 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2002.



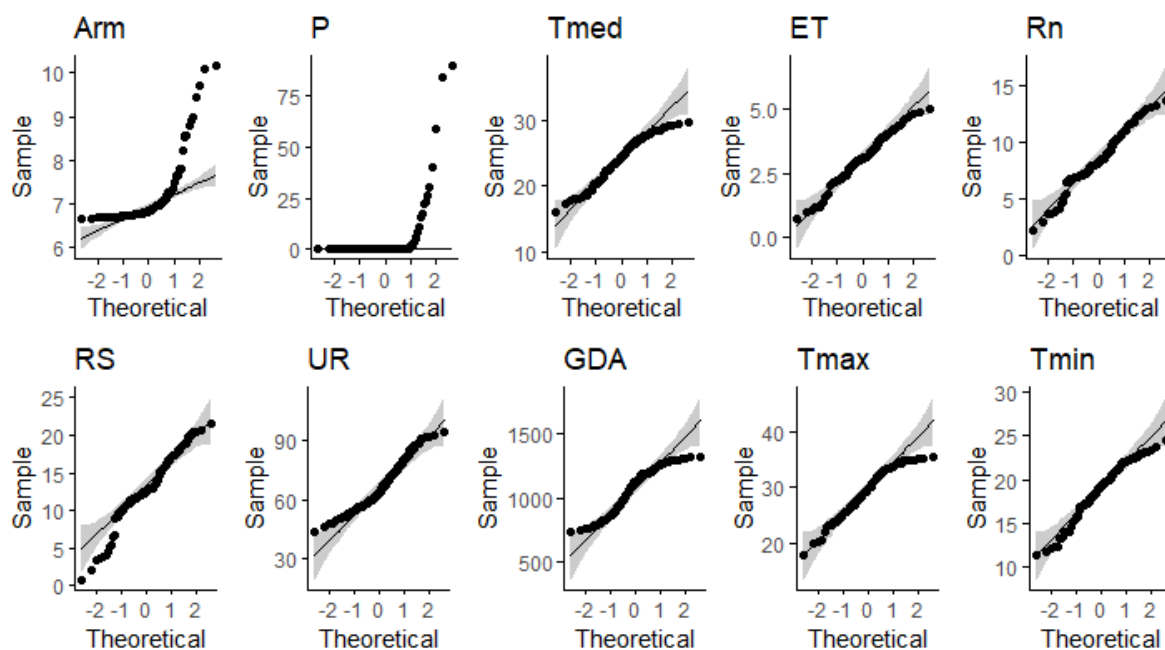
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.15 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2002.



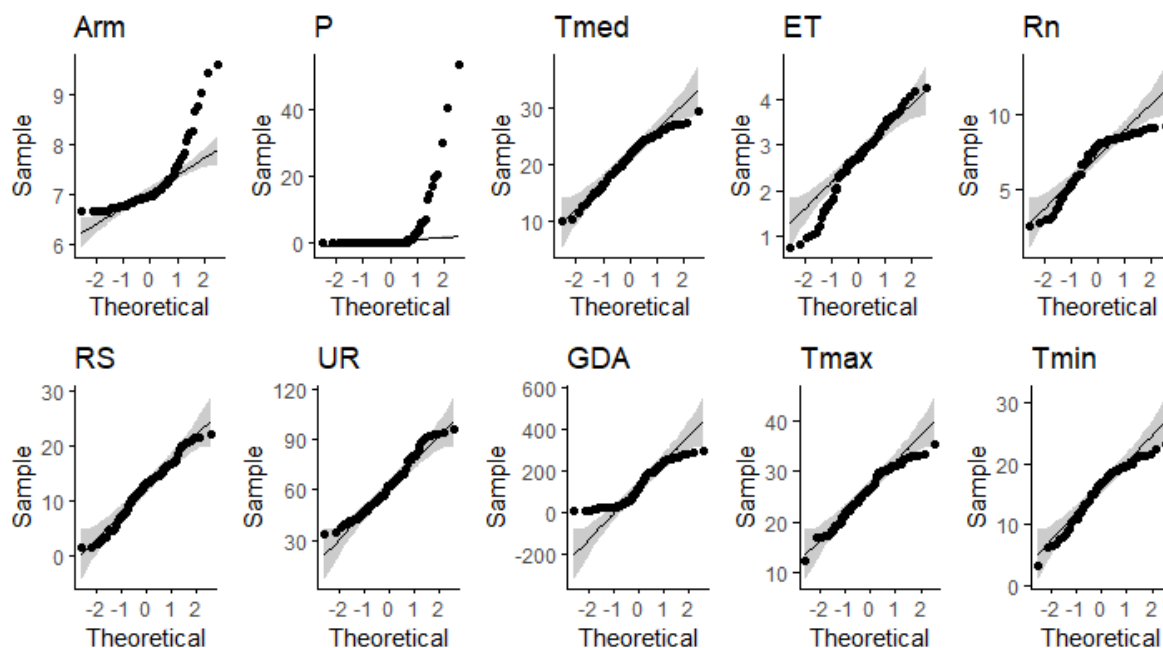
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.16 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2002.



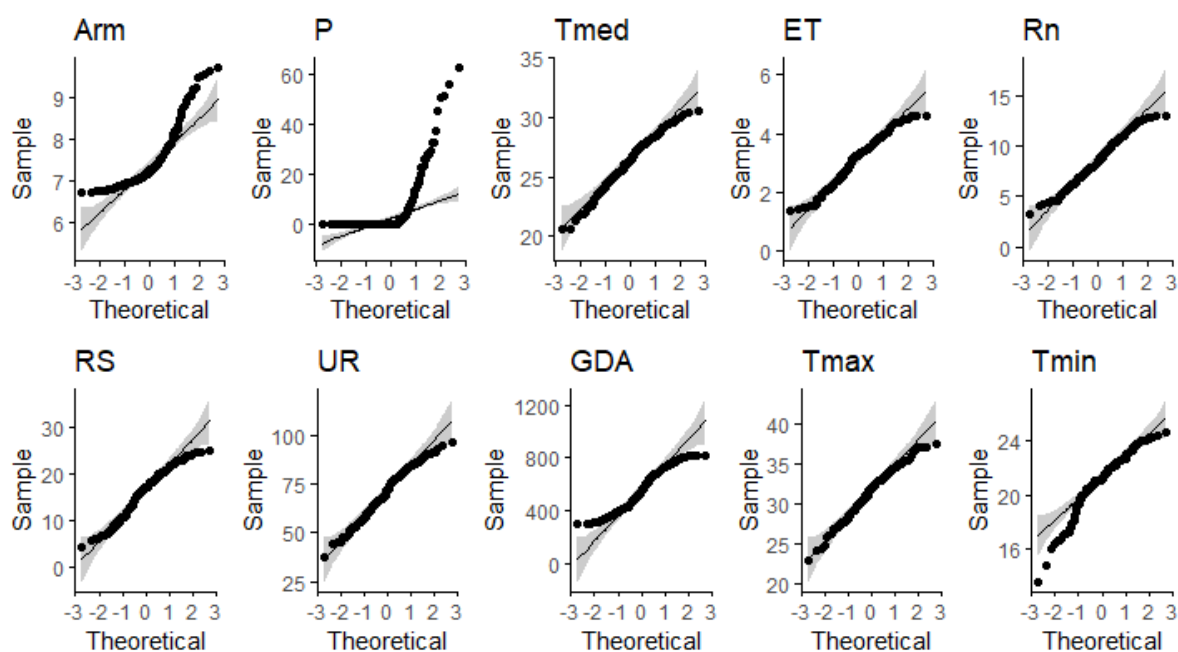
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.17 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2003.



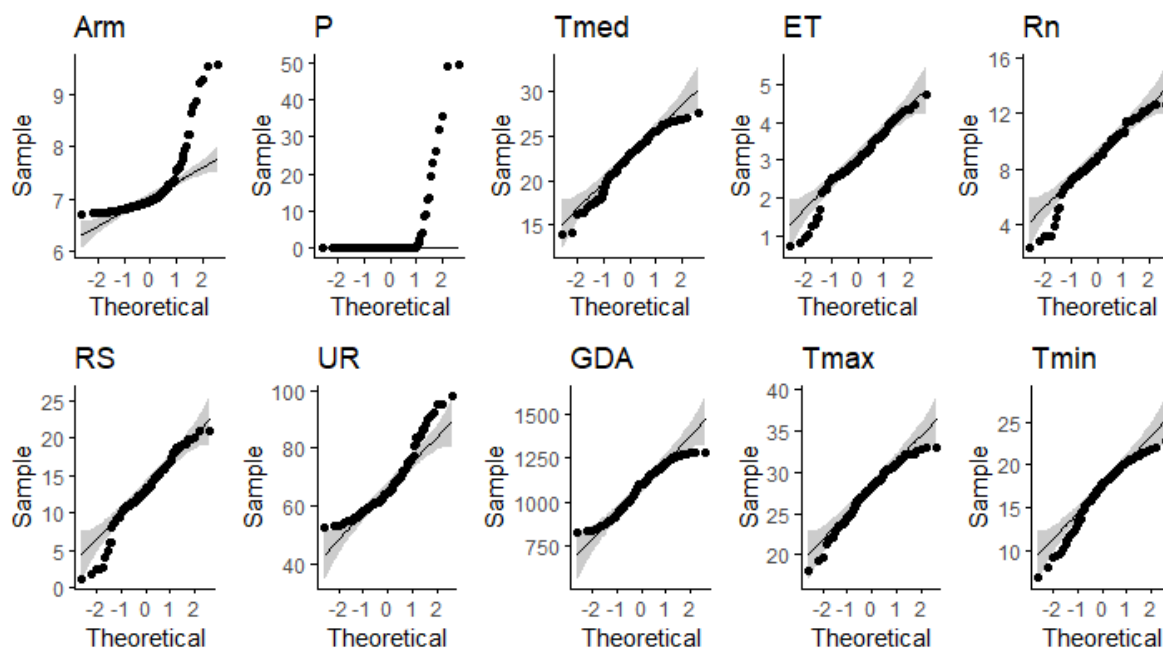
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.18 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2003.



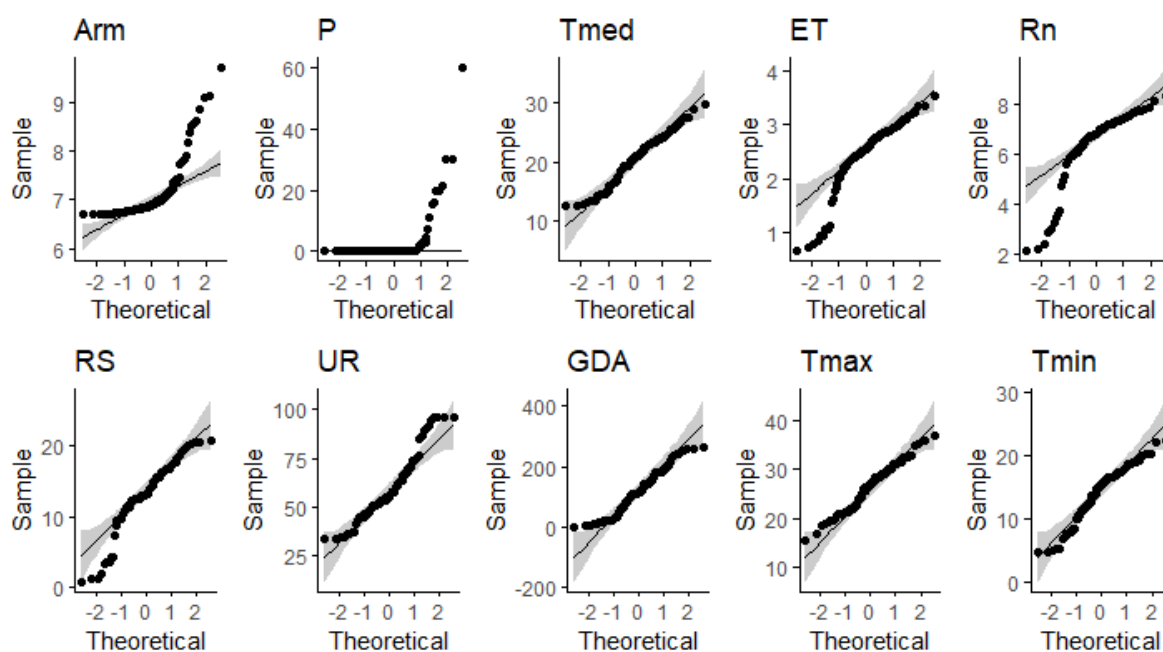
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.19 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2003.



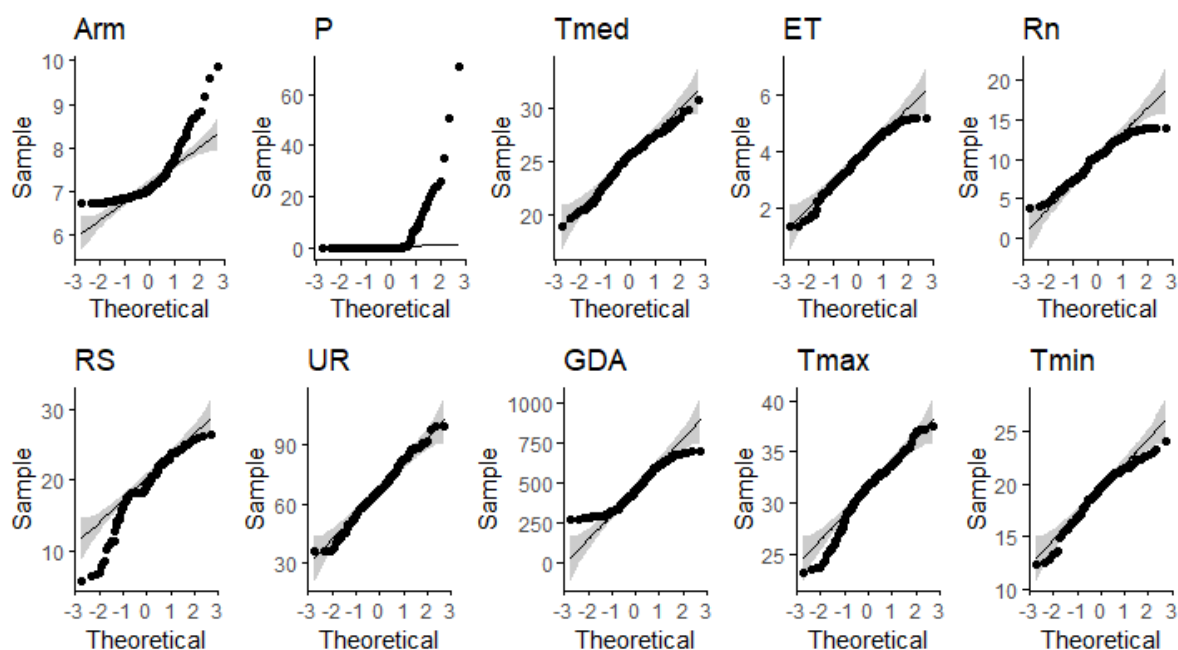
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.20 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2004.



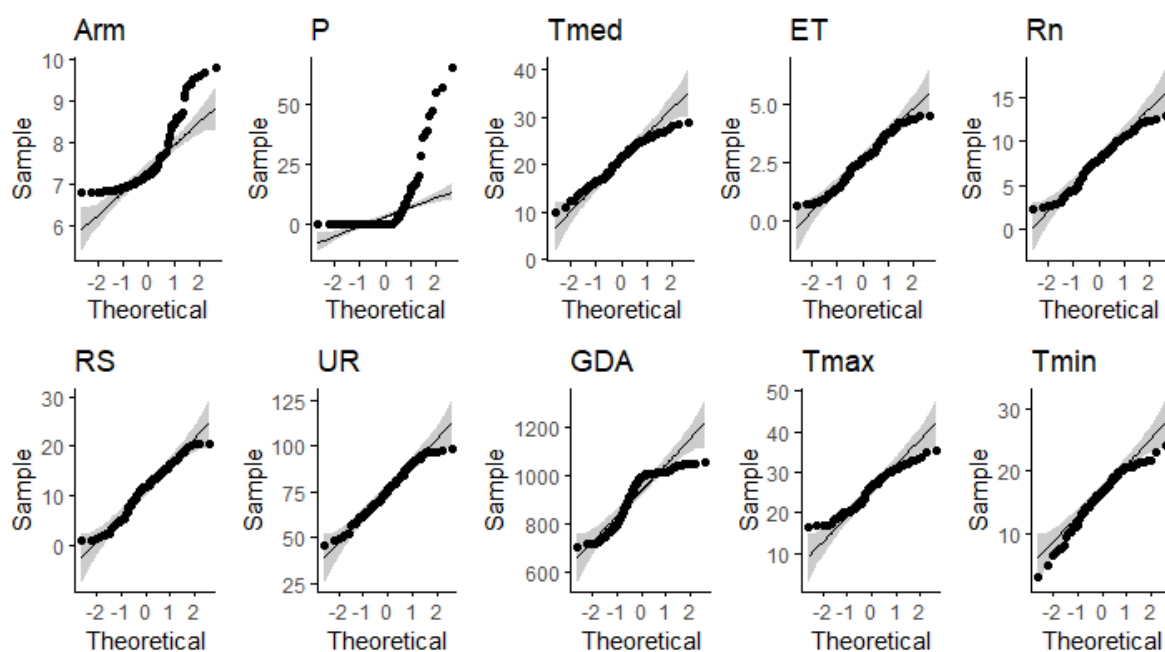
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.21 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2004.



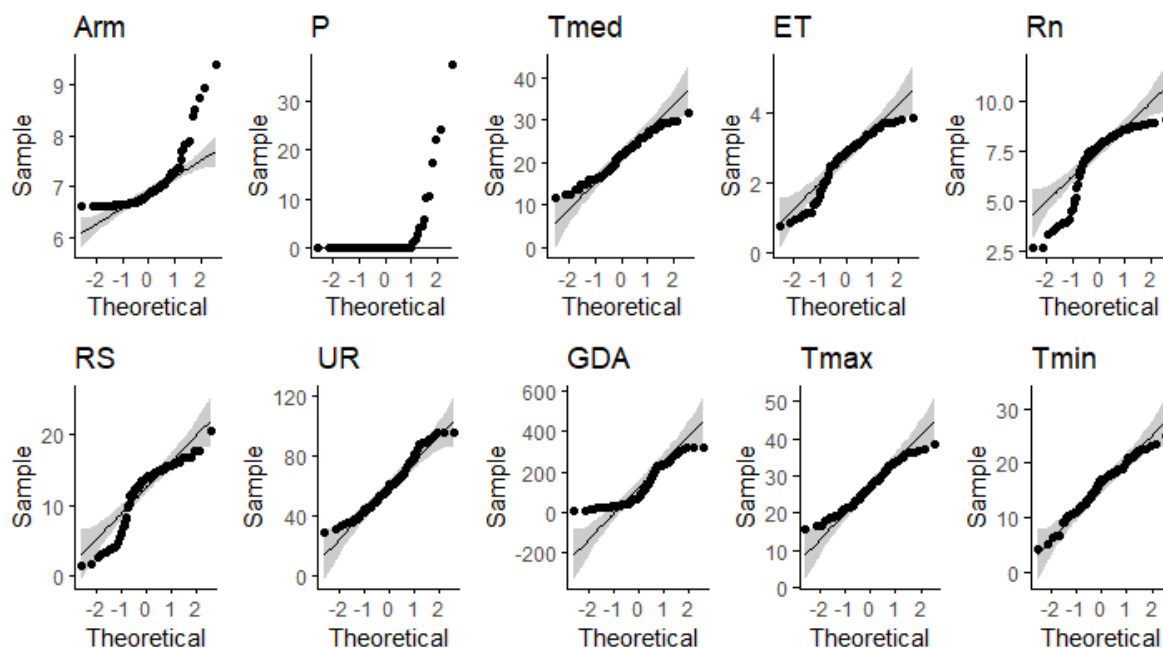
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.22 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2004.



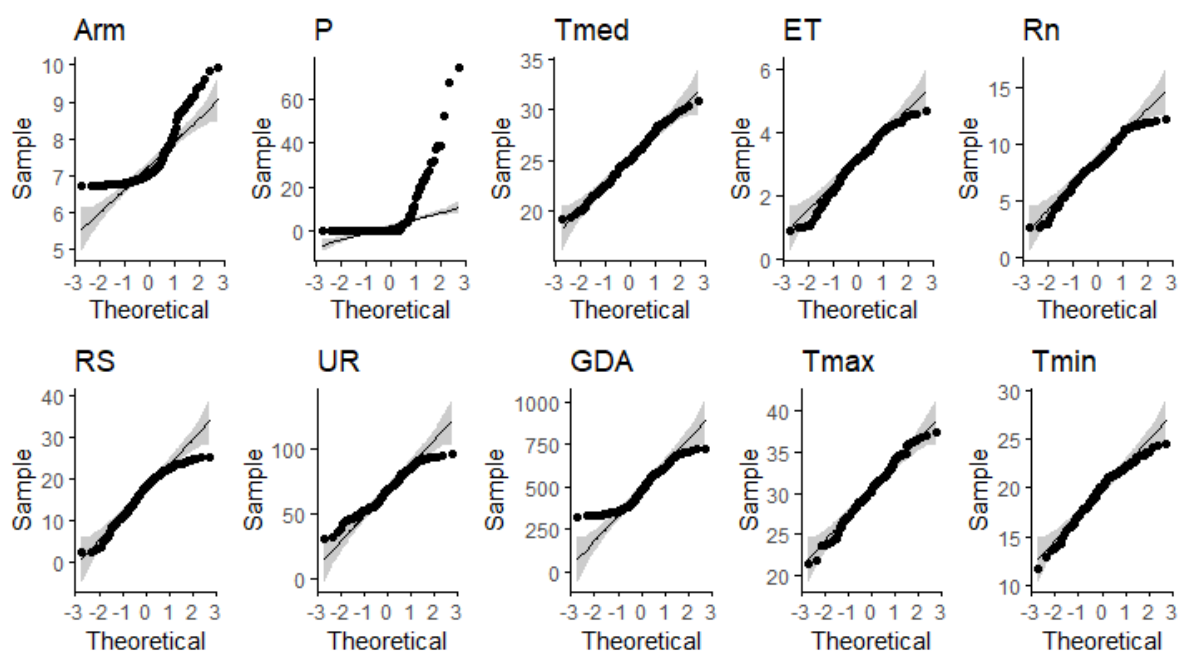
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.23 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2005.



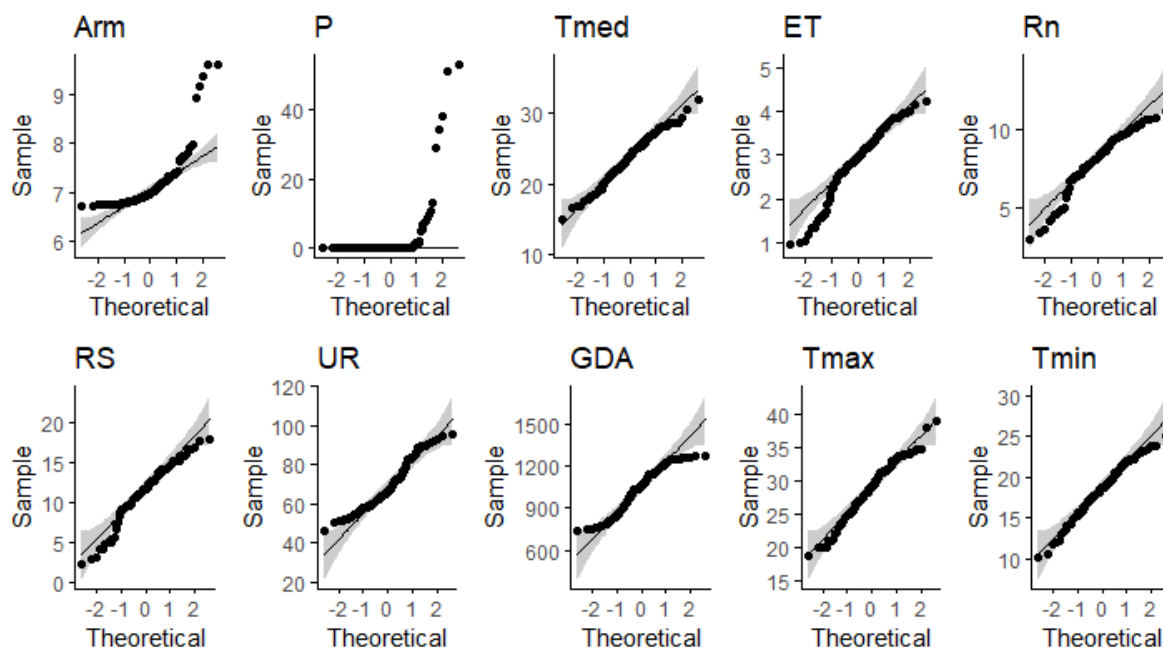
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.24 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2005.



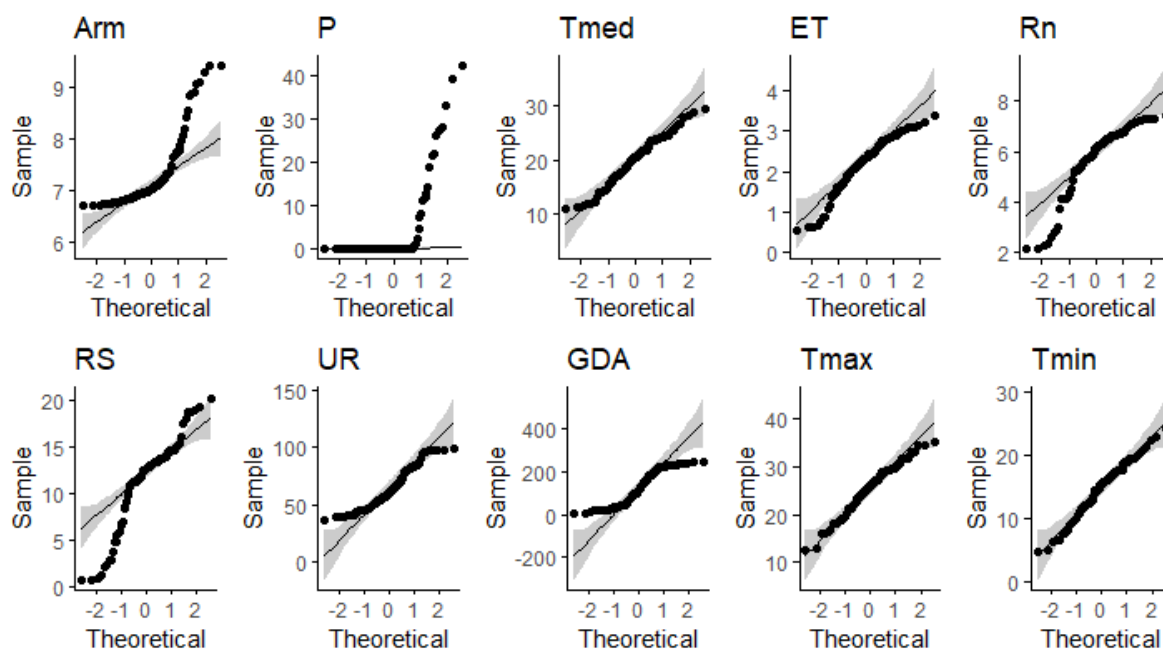
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.25 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2005.



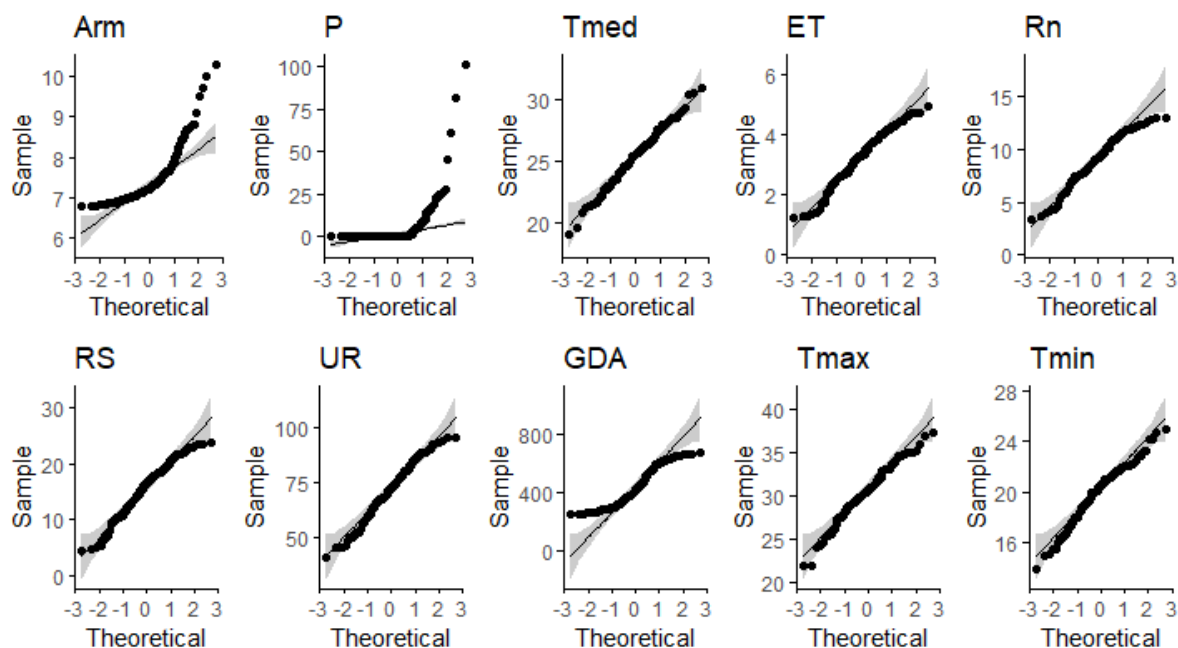
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.26 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2006.



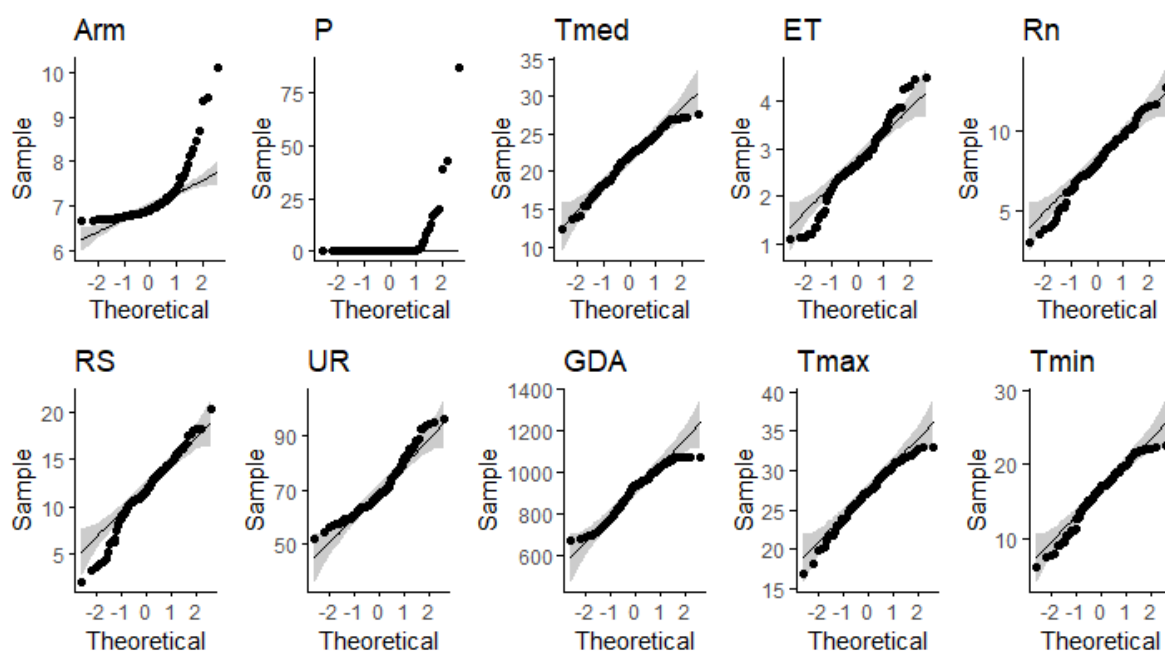
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.27 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2006.



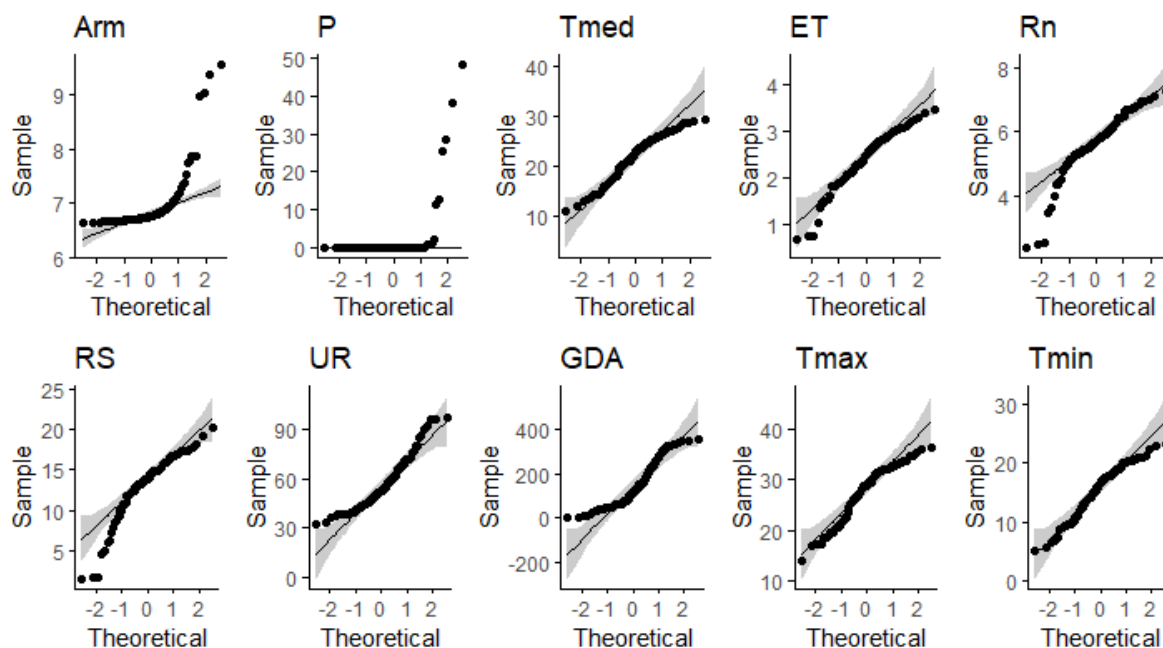
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.28 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2006.



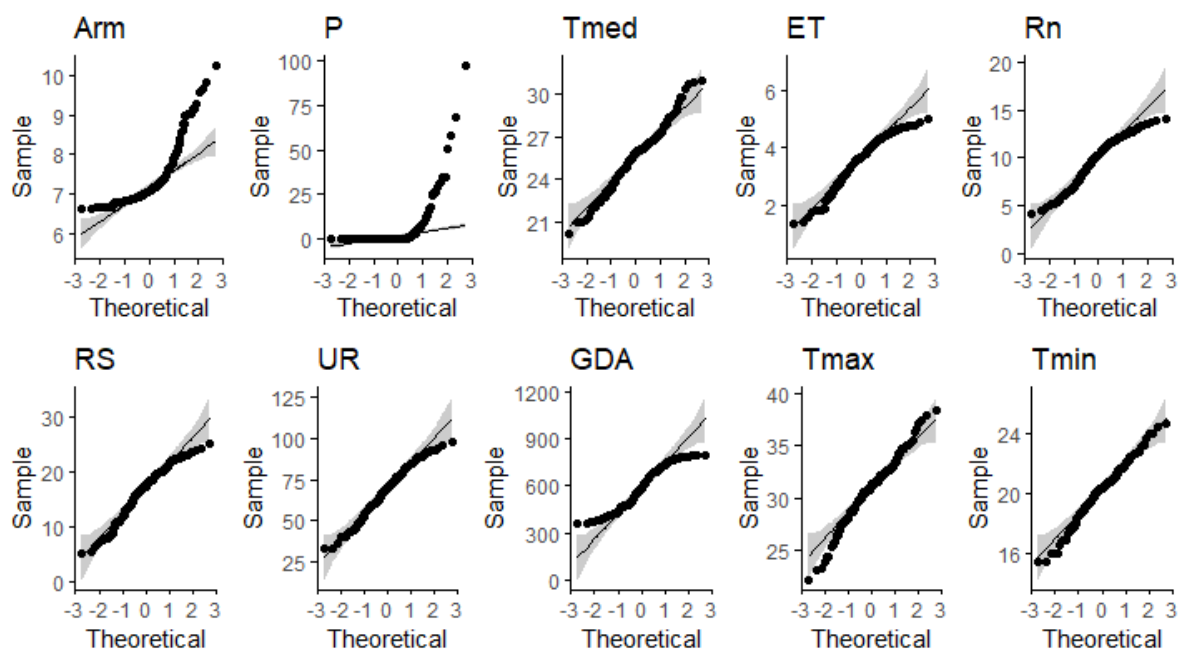
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.29 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2008.



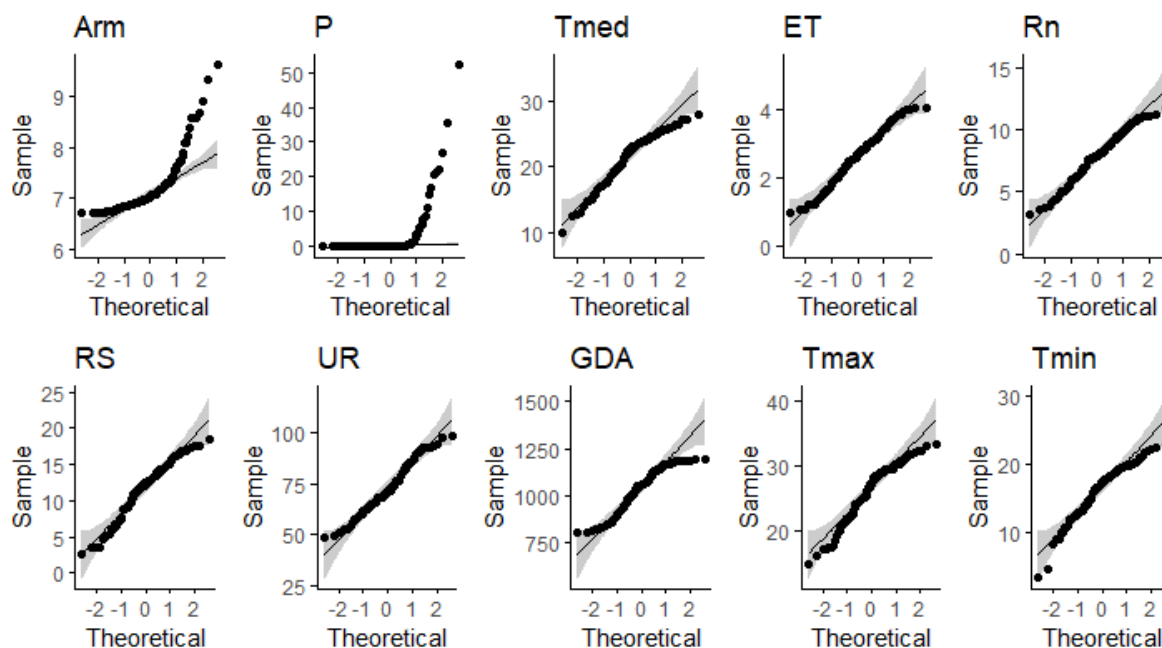
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.30 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2008.



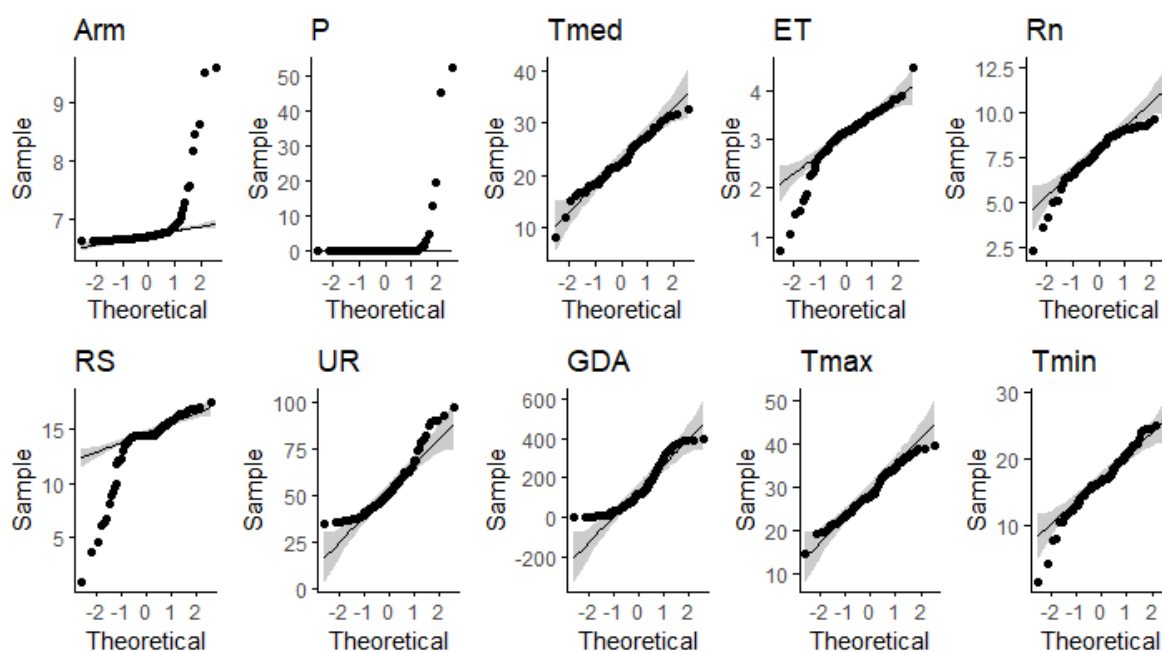
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.31 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2008.



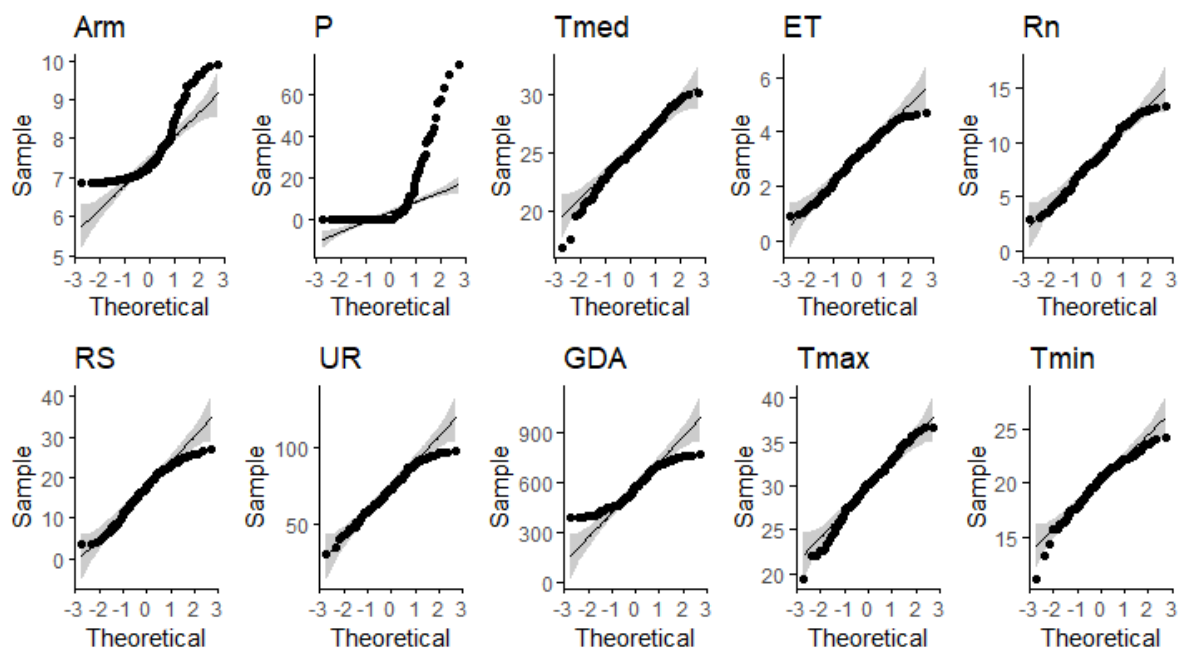
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.32 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2018.



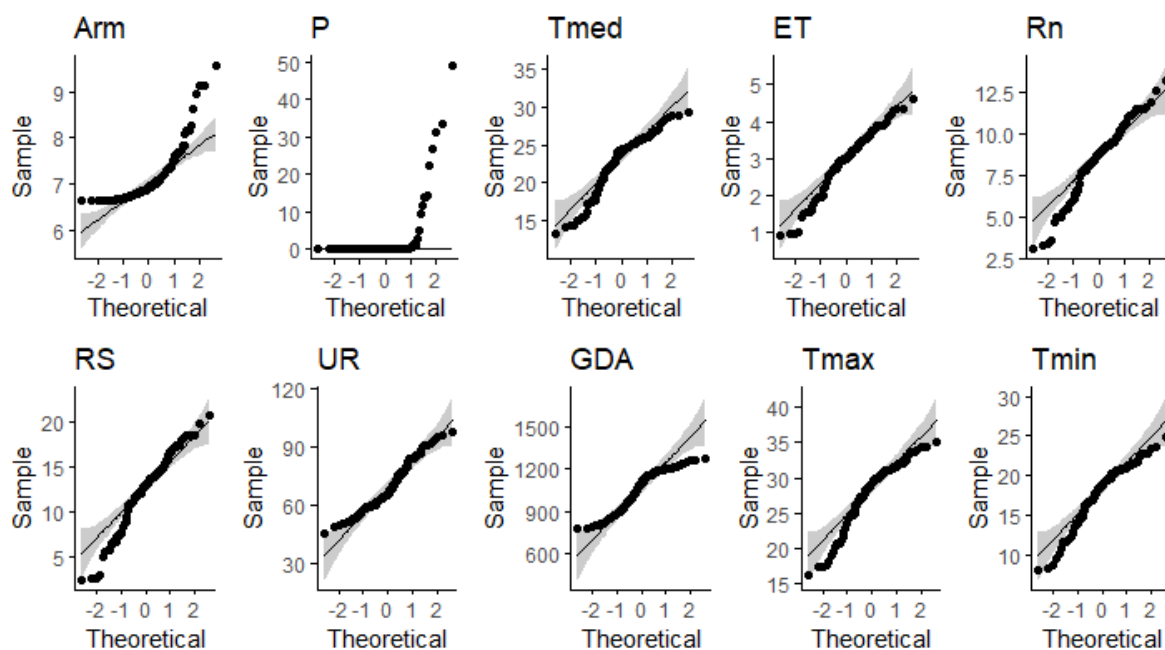
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.33 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2018.



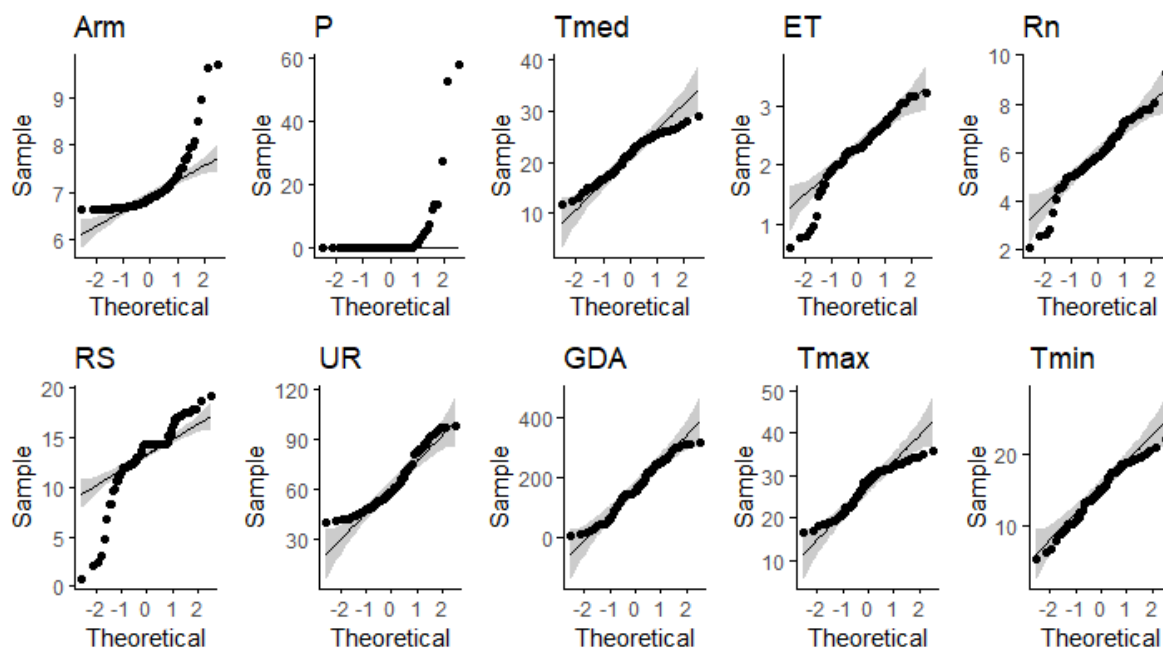
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.34 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2018.



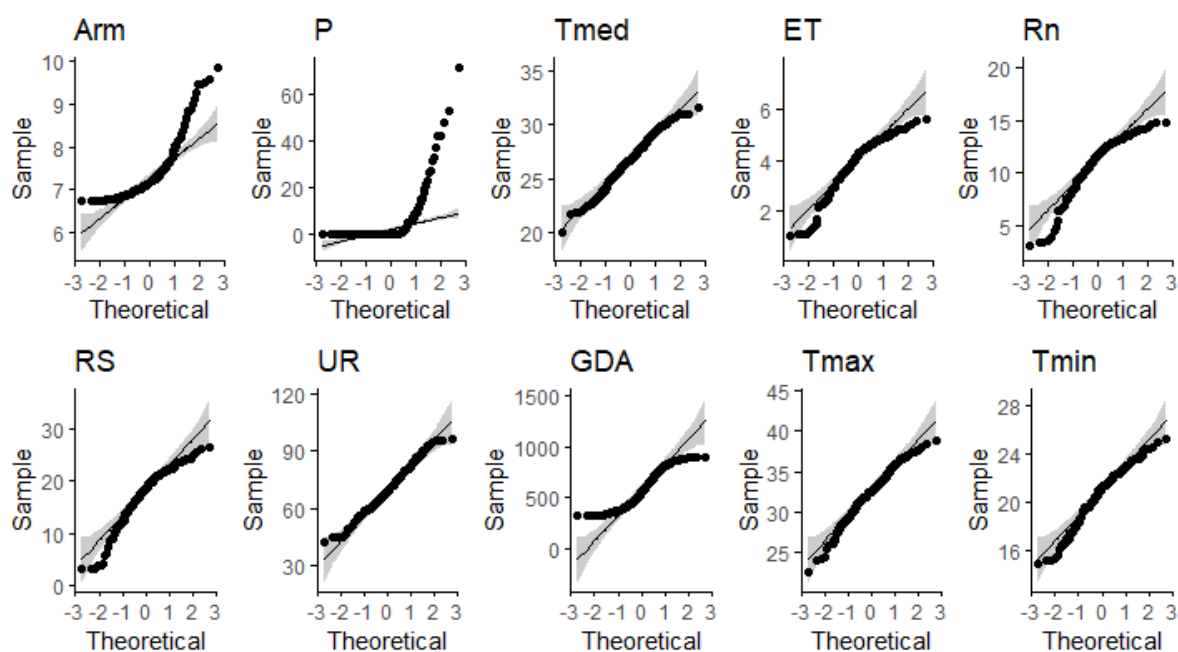
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.35 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE I, SAFRA 2019.



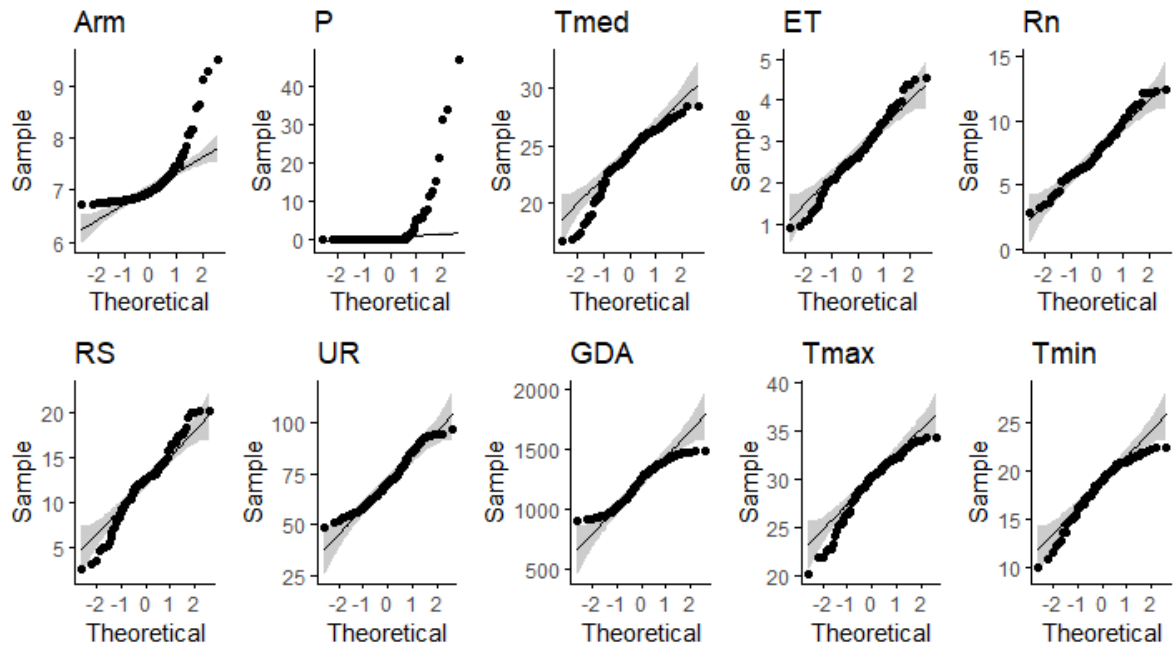
FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.36 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE II, SAFRA 2019.



FONTE: a Autora (2022).

FIGURA A8.37 – ANÁLISE GRÁFICA DA NORMALIDADE UNIVARIADA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO ARMAZENAMENTO DA ÁGUA SOLO (*Arm*), FASE III, SAFRA 2019.



FONTE: a Autora (2022).