



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR EM LATOSSOLO
VERMELHO DA DEPRESSÃO INTERMONTANA DE CERES**

LUCAS DE CASTRO MEDRADO

Orientador:

Prof. Dr. Glenio Guimarães Santos

Coorientadora:

Prof. Dra. Vladia Correchel

GOIÂNIA – GO – Brasil

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Lucas de Castro Medrado

3. Título do trabalho

DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR EM LATOSSOLO VERMELHO DA DEPRESSÃO INTERMONTANA DE CERES

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
 - b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
- O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Glenio Guimarães Santos, Professor do Magistério Superior**, em 10/05/2021, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **LUCAS DE CASTRO MEDRADO, Discente**, em 10/05/2021, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539](#),

10/05/2021

SEI/UFG - 2056782 - Termo de Ciência e de Autorização (TECA)



[de 8 de outubro de 2015.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2056782** e o código CRC **C6B67392**.

Referência: Processo nº 23070.007715/2021-06

SEI nº 2056782

LUCAS DE CASTRO MEDRADO

**DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR EM LATOSSOLO
VERMELHO DA DEPRESSÃO INTERMONTANA DE CERES**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia. **Área de concentração:** Solo e Água.

Orientador:

Prof. Dr. Glenio Guimarães Santos

Coorientadora:

Prof^ª. Dra. Vladia Correchel

GOIÂNIA – GO - BRASIL

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Medrado, Lucas de Castro
Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar em Latossolo
Vermelho da Depressão Intermontana de Ceres [manuscrito] / Lucas
de Castro Medrado. - 2021.
CIII, 103 f.

Orientador: Prof. Dr. Glenio Guimarães Santos; co-orientadora Dra.
Vladiá Correchel.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, ,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia, 2021.

1. cana-de-açúcar. 2. sistema radicular. 3. manejo do solo. 4.
qualidade física do solo . 5. química do solo. I. Santos, Glenio
Guimarães, orient. II. Título.

CDU 631/635



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata Nº 34/2021 da sessão de Defesa de Dissertação de **Lucas de Castro Medrado** que confere o título de Mestre em Agronomia, na área de concentração em Solo e Água.

Aos 24/02/2021, vinte e quatro dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um, a partir das 8:30, oito horas e trinta minutos, por videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR EM AMBIENTE DE PRODUÇÃO NO ESTADO DE GOIÁS". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador e Presidente da Banca Examinadora, **Prof. Glenio Guimarães Santos (EA/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Prof. Rilner Alves Flores (EA/UFG)**, membro titular interno; **Prof. Eduardo da Costa Severiano (IFGoiano)**, membro titular externo. Durante a arguição, os membros da banca fizeram sugestão de alteração do título do trabalho, conforme explicitado abaixo. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido o candidato **APROVADO** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Presidente da Banca Examinadora, **Prof. Glenio Guimarães Santos**, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos 24/02/2021, vinte e quatro dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

"DESENVOLVIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR EM LATOSSOLO VERMELHO DA DEPRESSÃO INTERMONTANA DE CERES"

Documento assinado eletronicamente por **Rilner Alves Flores, Professor do Magistério Superior**, em 04/03/2021, às 16:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Glenio Guimarães Santos, Professor do Magistério Superior**, em 04/03/2021, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo da Costa Severiano, Usuário Externo**, em 05/03/2021, às 13:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1919373** e o código CRC **7B558FB5**.

11/03/2021

SEI/UFG - 1919373 - Ata de Defesa de Dissertação



Referência: Processo nº 23070.007715/2021-06

SEI nº 1919373

https://sei.ufg.br/sei/documento_consulta_externa.php?id_acesso_externo=111548&id_documento=2074227&id_orgao_acesso_externo=0&infra_has... 2/2

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a minha mãe, Claudia Renata de Castro Medrado, e ao meu pai, João Carlos da Rocha Medrado, que sempre me apoiaram em minha trajetória de vida, sempre mantendo a retidão de seus ensinamentos. A meu irmão, Rafael de Castro Medrado.

Agradeço a minha companheira, Gabriela Maia Garcia, que sempre me incentivou e se mostrou disposta a colaborar intensamente com a pesquisa.

À Universidade Federal de Goiás, pelo suporte educacional prestado desde o ano de 2013, no ingresso de minha graduação até a conclusão do curso de mestrado.

Ao meu orientador, Glenio Guimarães Santos, pela paciência, dedicação e conhecimento empenhado nesta caminhada.

A minha coorientadora, que desde o primeiro momento demonstrou presteza e boa vontade para colaborar com a pesquisa, auxiliando e prestando suporte nesta jornada de conhecimento.

Aos professores Leonardo Collier e Rilner Flores, que sempre prestaram apoio quando necessário.

Aos amigos que tive a honra de conviver nestes 2 anos e que sempre colaboraram ativamente nesta pesquisa, Gustavo Cassiano, João Carlos dos Anjos, Breno Wilson e ao amigo Wilson Nogueira.

À técnica de laboratório Nara Rubia, que sempre contribuiu com seus conhecimentos, dando suporte e instruindo às análises laboratoriais.

Ao CNPq pela bolsa de fomento concedida ao longo destes dois anos.

Sem vocês, a conclusão desta caminhada não seria tão proveitosa, agradeço o convívio e carinho de todos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
RESUMO GERAL	13
GENERAL ABSTRACT	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 HISTÓRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	17
2.2 EXPANSÃO E PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS	19
2.3 DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS	20
2.4 ATRIBUTOS FÍSICOS, HÍDRICOS E QUÍMICOS DO SOLO	21
2.5 SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR	24
2.6 O SISTEMA MINIRHIZOTRON	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	27
3.2 COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO EM CAMPO	29
3.3 TESTES DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	31
3.4 TESTES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CAMPO	32
3.5 ANÁLISES LABORATORIAIS	33
3.5.1 Análises químicas	33
3.5.2 Umidade, granulometria e densidade de partículas do solo	35
3.5.3 Curva de retenção de água no solo	37
3.5.4 Estabilidade de agregados em água	40
3.6 ACOMPANHAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR E AQUISIÇÃO DE DADOS	41
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	45
4.2 ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DO SOLO	50
4.3 ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO RADICULAR	58
5 CONCLUSÕES	77
6 REFERÊNCIAS	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios da tonelada de cana por hectare (TCH) e valor econômico relativo (VER) das três variedades estudadas.....	29
Tabela 2. Valores médios da análise granulométrica, grupamento textural e densidade de partículas do solo nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60, 0,80-0,90 m.	37
Tabela 3. Atributos químicos do solo nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60 e 0,80-0,90 m de profundidade.	46
Tabela 4. Valores médios dos atributos físicos e hídricos do solo por variedade estudada. ...	50
Tabela 5. Valores médios dos atributos físicos e hídricos por variedade e por camada de solo.	51
Tabela 6. Distribuição dos valores médios de diâmetro médio ponderado por via úmida das variedades estudadas nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60, 0,80-0,90 m. espaço simples.	56
Tabela 8. Valores médios do atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada.....	59
Tabela 9. Valores médios do atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada, em diferentes profundidades para o mês de Novembro de 2019.	59
Tabela 10. Valores médios do atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada, em diferentes profundidades para o mês de Fevereiro de 2020.	64
Tabela 11. Valores médios do atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada, em diferentes profundidades para o mês de junho de 2020.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área experimental, localizada na Usina Jalles Machado em Goianésia – GO.	27
Figura 2. Precipitação pluviométrica mensal (mm) e temperatura média (°C) da área de estudo, para o período entre Julho de 2019 a Junho de 2020.....	28
Figura 3. Coleta de anéis volumétricos em campo. a) anéis volumétricos após a coleta. b) pesquisador manuseando equipamento para realizar a coleta.	30
Figura 4. Monólitos de solo coletados em campo.	31
Figura 5. Leitura da resistência a penetração em campo. a) pesquisador manuseando penetrômetro. b) pesquisador realizando leitura da resistência à penetração em campo.	32
Figura 6. Coleta de dados através do permeâmetro de Guelph no campo.	33
Figura 7. Procedimentos de laboratório para execução da análise granulométrica.....	36
Figura 8. a) e b): Procedimentos de laboratório para determinação da densidade de partículas do solo.	37
Figura 9. Amostras de solo em cilindro em processo de saturação.....	38
Figura 10. Câmara de Richards com amostras indeformadas.	40
Figura 11. Trado holandês para abertura dos furos e instalação dos tubos de acrílico no solo.	42
Figura 12. Preparo para coleta de dados do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar através do scanner de raízes.	43
Figura 13. Análise do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar utilizando o software RootSnap!.	43
Figura 14. Curva de retenção de água do solo da variedade RB034045. a) camada 0-0,10 m; b) camada 0,10-0,20 m; c) camada 0,40-0,60 m; d) camada 0,60-0,80 m.....	53
Figura 15. Curva de retenção de água do solo da variedade RB985476. a) camada 0-0,10 m; b) camada 0,10-0,20 m; c) camada 0,40-0,60 m; d) camada 0,60-0,80 m.....	54
Figura 16. Curva de retenção de água do solo da variedade RB987935. a) camada 0-0,10 m; b) camada 0,10-0,20 m; c) camada 0,40-0,60 m; d) camada 0,60-0,80 m.....	55
Figura 17. Médias de resistência à penetração e umidade do solo em função das variedades e camadas do solo. Letras minúsculas iguais em profundidade para a mesma variedade não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).	57
Figura 18. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês	

de Novembro de 2019. a) Planta 1 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 1 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 1 (repetição) da variedade RB987935.....	61
Figura 19. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Novembro de 2019. a) Planta 2 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 2 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 2 (repetição) da variedade RB987935.....	62
Figura 20. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Novembro de 2019. a) Planta 3 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 3 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 3 (repetição) da variedade RB987935.....	63
Figura 21. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Fevereiro de 2020. a) Planta 1 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 1 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 1 (repetição) da variedade RB987935.....	65
Figura 22. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Fevereiro de 2020. a) Planta 2 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 2 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 2 (repetição) da variedade RB987935.....	66
Figura 23. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Fevereiro de 2020. a) Planta 3 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 3 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 3 (repetição) da variedade RB987935.....	67
Figura 24. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Junho de 2020. a) Planta 1 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 1 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 1 (repetição) da variedade RB987935.	69
Figura 25. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Junho de 2020. a) Planta 2 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 2 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 2 (repetição) da variedade RB987935.	70
Figura 26. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Junho de 2020. a) Planta 3 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 3 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 3 (repetição) da variedade RB987935.	71

RESUMO

MEDRADO, L. C. **Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho da Depressão Intermontana de Ceres**. 2021. 103 f.. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiás, Goiânia, 2021.

A cultura da cana-de-açúcar tem importância sócio-econômica impactante no perfil econômico brasileiro, sendo principalmente utilizada como matéria prima para o etanol. Com os fomentos governamentais e investimento do setor privado, atualmente a cultura ocupa cerca de 8.409,9 mil hectares, sendo que o Estado de Goiás, apresenta a segunda maior área de cultivo com 965 mil hectares. O Estado de Goiás possui aspectos de relevo, clima e solo favoráveis ao cultivo extensivo da cana-de-açúcar, e que aliada a modernização do campo, permitiu a implantação de alta tecnologia em toda sua cadeia de produção. Com o tráfego intenso de maquinários e manejos maus executados no solo, acabam ocorrendo perdas substanciais de produtividade, e conseqüentemente, econômicas. A fim de melhorar o rendimento no campo e ir além das características físico-químicas do solo, propõe-se estudar o sistema radicular da cultura, para melhor compreensão dos efeitos do manejo do solo no crescimento e dinâmica das raízes. Existem poucos trabalhos e referências científicas desta área, principalmente pela dificuldade de se estudar *in loco* as raízes. Com o avanço da tecnologia, surgiram novas formas de avaliação do desenvolvimento radicular, uma delas é baseada na instalação de tubos de acrílico no solo, onde serão realizadas leituras com um *scanner* que imageia a superfície do solo, permitindo identificar o desenvolvimento das raízes. O objetivo do presente trabalho é a avaliação dos fatores de crescimento, mortalidade e regeneração das raízes da cana-de-açúcar e os efeitos do manejo do solo na cultura. O experimento foi conduzido em área experimental na Usina Jalles Machado, em Latossolo Vermelho, localizado no município de Goianésia. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, com três variedades de cana-de-açúcar (RB987935, RB985476 e RB034045) com 3 repetições cada. Para efeito de comparação do manejo do solo, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas, e analisado diversos aspectos físicos do solo como densidade do solo, macro e microporosidade, umidade gravimétrica, diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico, além de análise química nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,80-0,90 m. Os resultados foram submetidos a análise de variância e analisadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade quando significativos. As análises de química do solo, mostraram que os macros e micronutrientes estão em níveis adequados de desenvolvimento, assim como o pH. Os resultados de física do solo, demonstraram que a camada avaliada de 0,10-0,20 m, apresentou resultados mais altos de densidade do solo e resistência à penetração, que é limitante ao desenvolvimento radicular. O desenvolvimento radicular das variedades estudadas ocorreu de forma homogênea, sem grandes variações entre si, isto sobretudo, pela homogeneidade da área estudada. Inicialmente no período de seca, as raízes demonstraram dificuldades para se desenvolver, o que foi alterado quando começou o período chuvoso, independente das condições físicas do solo. Em condições homogêneas de clima, solo e manejo, o sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar RB034045, RB985476 e RB987935 se desenvolvem de forma distinta. Entre as variedades analisadas, os valores médios dos atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar apresentam distribuição mais homogênea em profundidade.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, sistema radicular, manejo do solo, qualidade física do solo, química do solo.

ABSTRACT

MEDRADO, L. C. **Development of sugarcane roots in a LATOSSOLO VERMELHO from the Intermontane Depression of Ceres.** 2021. 103 p. Dissertation (Master in Agronomy: Soil and Water) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiás, Goiânia, 2021.

The culture of sugarcane has an impacting socio-economic importance in the Brazilian economic profile, being mainly used as raw material for ethanol. With government funding and private sector investment, the crop currently occupies about 8,409,900 hectares, with the State of Goiás having the second largest cultivation area with 965,000 hectares. The State of Goiás has aspects of relief, climate and soil favorable to the extensive cultivation of sugarcane, which, together with the modernization of the field, allowed the implementation of high technology throughout its production chain. With the heavy traffic of machinery and poor handling performed on the ground, substantial losses of productivity end up, and consequently, economic losses. In order to improve the yield in the field and go beyond the physical-chemical characteristics of the soil, it is proposed to study the root system of the crop, to better understand the effects of soil management on growth and root dynamics. There are few studies and scientific references in this area, mainly due to the difficulty of studying roots in loco. With the advancement of technology, new ways of assessing root development have emerged, one of which is based on the installation of acrylic tubes in the soil, where readings will be performed with a scanner that images the soil surface, allowing to identify the development of the roots. The objective of the present work is to evaluate the growth factors, mortality and regeneration of sugarcane roots and the effects of soil management on the crop. The experiment was carried out in an experimental area at Usina Jalles Machado, in Latossolo Vermelho, located in the municipality of Goianésia. The design used was in randomized blocks, with three varieties of sugarcane (RB987935, RB985476 and RB034045) with 3 repetitions each. For the purpose of comparing soil management, deformed and undisturbed soil samples were collected, and various physical aspects of the soil were analyzed, such as soil density, macro and microporosity, gravimetric humidity, weighted average diameter and geometric mean diameter, in addition to chemical analysis in the soil. 0-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40 and 0.80-0.90 m layers. The results were subjected to analysis of variance and analyzed by Tukey's test at 5% probability when significant. Soil chemistry analyzes showed that macros and micronutrients are at adequate levels of development, as well as pH. The results of soil physics, demonstrated that the evaluated layer of 0.10-0.20 m, presented higher results of soil density and resistance to penetration, which is limiting to root development. The root development of the studied varieties occurred in a homogeneous way, without great variations between them, mainly due to the homogeneity of the studied area. Initially in the dry season, the roots showed difficulties to develop, which changed when the rainy season started, regardless of the physical conditions of the soil. Under homogeneous conditions of climate, soil and management, the root system of the sugarcane varieties RB034045, RB985476 and RB987935 develop differently. Among the varieties analyzed, the average values of the attributes of growth and development of the root system of sugarcane present a more homogeneous distribution in depth.

Palavras-chave: sugarcane, root system, soil management, physical soil quality, soil chemistry.

1 INTRODUÇÃO

O cultivo da cana-de-açúcar apresentou um crescimento em expansão de área plantada no território brasileiro. Isto devido à alta valorização econômica da cultura nos últimos anos, tendo em vista a importância sobretudo de dois produtos no mercado: etanol e açúcar. Atualmente a cultura abrange uma área cultivada de aproximadamente 8.409,8 mil hectares em todo território nacional (Laime et al., 2011; CONAB, 2020).

O Estado de Goiás apresenta a segunda maior produtividade (80.070 kg ha⁻¹) e área plantada (965,9 mil ha⁻¹) de cana-de-açúcar do Brasil, sendo superado apenas pelo Estado de São Paulo (CONAB, 2020; IBGE, 2020). Acompanhando a expansão da lavoura de cana-de-açúcar, ao longo dos anos, o Estado de Goiás conquistou a sua importância no cenário nacional com produção, produtividade e área plantada acima da média. A junção de fatores como clima tropical, tipo de solo e topografia, contribuem para o surgimento de cultivares mais produtivas e uma maior adaptação às condições da região, atrelado a mecanização das operações de colheita e plantio e melhorias de manejo (Severiano et al., 2009).

Com a modernização do campo e o avanço da pesquisa na agricultura, a cultura sofreu impactos referentes ao plantio, colheita e cultivo em sua cadeia de produção. Atualmente o cultivo da cultura é essencialmente caracterizado por seu elevado grau tecnológico aplicado ao sistema produtivo, aliando-se a agricultura de precisão, controle biológico e químico de doenças, garantindo assim, elevada produtividade e colaborando com uma produção mais sustentável (Bullock et al., 2007; Cruz & Dalri, 2008; Sanches et al., 2019). Em cultivos altamente tecnificados, como no caso da cana-de-açúcar, é fundamental ter o conhecimento da variabilidade espacial de atributos físicos do solo, o que poderá contribuir para a redução de custos nos sistemas de produção, apoiando a tomada de decisões para que não haja deterioração da estrutura do solo (Pereira et al., 2015; Cavalcanti et al., 2020).

Segundo o banco de dados do IBGE (2021), 50,9% dos solos do Bioma Cerrado são caracterizados como Latossolos, que apesar de geralmente possuírem baixa fertilidade e elevada acidez, apresentam condições favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar (Severiano, 2009; Santos et al., 2013; CONAB, 2020). A expansão da cana-de-açúcar vem submetendo o solo a um constante desgaste, pois o plantio contínuo acelera o processo de degradação do solo, gerando perda de produtividade e conseqüentemente, perdas econômicas (Souza et al., 2006). Com o manejo adequado, haverá uma potencialização da produção e preservação do solo, propiciando assim, elevado ganho econômico (Corá et al., 2004).

A relevância da cultura no Estado de Goiás, também se traduz em referência no estudo da potencialização da cana-de-açúcar no Brasil, com pesquisas lideradas para

diagnosticar e mitigar possíveis prejuízos referentes a práticas de manejo no solo (Souza et al., 2004; Severiano et al., 2009; Castro et al., 2010). O tráfego de maquinário quando em solos com elevado conteúdo de água, é uma das principais fontes de estudo que se relacionam a compactação com a degradação do solo (Ralisch et al., 2008; Severiano et al., 2009; Cavalieri et al., 2011). Nota-se, que as consequências da má execução do manejo do solo, podem causar alterações significativas nos atributos físicos, aumentando a densidade do solo, diminuindo a porosidade, limitando a oferta de água e nutrientes para a planta, ocasionando conseqüentemente, perdas financeiras para reparação da qualidade do solo (Cherubin et al., 2016; Cavalcanti et al., 2020; Esteban et al., 2020).

Com a sustentabilidade em evidência nos mais diversos produtos e o interesse comercial, surge a demanda de aliar alta produtividade, com mitigação dos impactos nas áreas de cultivo da cana-de-açúcar (Guimarães, 2010; Rodrigues Filho & Juliani, 2013). Busca-se então, o alto aproveitamento e rendimento da cultura nos aspectos nutricionais e hídricos, evitando a utilização de adubos em excesso e mantendo o solo úmido, suprimindo a exigência da cultura durante as principais fases de seu ciclo produtivo (Inman-Barber & Smith, 2005).

Segundo Landell et al. (2003), não existe uma metodologia específica para avaliação radicular da cana-de-açúcar, pois deve ser analisada a situação *in situ*, devido a variação de resultado dependendo do manejo e de aspectos físicos do solo. O estabelecimento de uma metodologia para estudo do sistema radicular, implicará no conhecimento de fatores que influenciam seu desenvolvimento e sua distribuição, assim como melhor compreensão de sua dinâmica de crescimento e desempenho de cada variedade (Medina et al., 2002; Smith, 2005; Esteban, 2019).

Nesse sentido, as raízes da cana-de-açúcar têm diferentes demandas para seu pleno desenvolvimento, tais como: o teor de nutrientes, qualidade dos atributos físicos e umidade do solo, que podem influenciar o crescimento radicular da planta. Entretanto, verifica-se poucos trabalhos em que a variação do crescimento radicular da cana-de-açúcar é avaliada, motivado principalmente, pela dificuldade de avaliação e a variabilidade dos resultados obtidos em condição de campo (Otto et al., 2009).

Portanto, aprofundar o conhecimento a respeito do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar associado aos diferentes atributos do solo é crucial. Assim, este trabalho objetivou a avaliar do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho da Depressão Intermontana de Ceres.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

A cana-de-açúcar é uma planta monocotiledônea, tendo como característica a presença de raízes fasciculadas. A planta pertence à família *Poaceae* e possui como híbridos a *Saccharum officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (Jadoski et al., 2010).

A cultura possui seus registros mais antigos no continente asiático, onde foi documentada primeiramente na Nova Guiné e Indonésia, sendo trazida ao Brasil no ano de 1533 por Martim de Afonso, que constatando a evolução e adaptabilidade notável da cultura em solo brasileiro, ampliou o cultivo da cultura em território brasileiro. Devido a importância do açúcar no momento histórico, sua expansão se consolidou como alicerce econômico da época (Machado, 2003).

A cultura apresentou forte impacto econômico na era colonial do Brasil, sobretudo com o surgimento dos engenhos, e que a partir desse momento, foi consolidada a monocultura para exportação, explorando de forma mais vasta o território brasileiro (Miller, 1997). Mesmo com as mudanças de foco econômico ao longo do tempo, o cultivo nunca foi deixado de lado, sendo empregado até hoje e com forte dependência do produto interno bruto brasileiro, elevando o Brasil ao posto de maior exportador mundial açúcar (CONAB, 2020). A contínua expansão da cana-de-açúcar no território brasileiro, é caracterizada por um vasto território de terras agricultáveis e com clima que propicia bom desenvolvimento para a cultura (Miziara & Silva, 2011).

Os estudos acerca do meio ambiente ganharam força, sobretudo com o advento da “sustentabilidade” no ano de 1992, em que foi exigido novos rumos às políticas ambientais, com atento sobre a fauna e a flora, tendo como base a preservação dos recursos naturais. A mitigação de impactos ambientais e a diminuição da poluição, agem como bandeiras da sustentabilidade e impulsionam o desenvolvimento de energias renováveis, como é o caso do etanol, que tem como matéria-prima a cana-de-açúcar (Salla et al., 2009).

Com a alta do preço do petróleo na década de 70, consequência da crise mundial deste combustível fóssil, o governo brasileiro com o intuito de fomentar o mercado interno, desenvolveu o Programa Nacional do Alcool (Pró-Alcool) em 1975, oferecendo incentivos fiscais e empréstimos bancários a produtores de cana-de-açúcar (Andrade et al., 2009). Com a produção do etanol, a produção de energia limpa e renovável, teve impulso no Brasil, e assim surgiram os primeiros veículos movidos a álcool, fomentando a cadeia de produção automotora brasileira. O consumo de veículos movidos a etanol foi um desenlace do país em relação ao

combustível fóssil à época, com predominância de 85% das vendas de veículos no ano de 1985 (IPEA, 2010). Na década de 90 com a revisão das políticas de fomento do Pró-álcool e a redução do preço do barril de petróleo, fizeram com que a produção de etanol fosse destinada para a exportação (Machado, 2003).

Apesar disso, a gasolina ainda deveria possuir obrigatoriamente uma mínima quantidade misturada de álcool anidro, o que ainda sustentava a indústria. Sob as políticas de fomento do governo nos anos 2000, foram lançados carros flexíveis ao combustível no ano de 2003, assim o consumo de etanol voltou a crescer e segue competindo fortemente no mercado de combustíveis com a gasolina. Atualmente, o Brasil é o maior produtor, segundo a CONAB (2020), a produção no ano de 2019/2020 foi de aproximadamente 642,7 milhões de toneladas colhidas.

Para fomento da produtividade e melhorias no sistema produtivo, a pesquisa da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, tem relevante destaque sobretudo em dois centros de estudos, Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e a Planalsucar, atual Rede Intrauniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA). O IAC, teve como primórdio em sua história uma pesquisa em 1892 envolvendo diferentes variedades de cana-de-açúcar. Desde então, o Instituto é uma referência para as áreas de genética, fisiologia, fitopatologia, pedologia, climatologia e fertilidade do solo, lançando variedades produtivas e fomentando o aumento de produção através de cultivares bastante desenvolvidas (IAC, 2021).

Já a Planalsucar, tem sua história iniciada em 1971 e que, com a promulgação da Constituição Federal em 1988, foi incorporada às Universidades Federais, estabelecendo novas perspectivas para o setor canavieiro e para pesquisadores, e que a partir de então, foi criada a Rede Intrauniversitária para o desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA, 2021). Atualmente, as variedades lançadas pela RIDESA contribuem com cerca de 12,3% da matriz energética nacional, estando presente em mais de 65% das áreas cultivadas de cana-de-açúcar (RIDESA, 2021). A Universidade Federal de Goiás, é hoje, umas das Universidades parceiras da RIDESA em projetos de melhoria genética de cana-de-açúcar.

Segundo dados compilados pela CONAB (2020), a área colhida de cana-de-açúcar, foi aumentada em mais de duas vezes de 2005 a 2020, sendo que no ano de 2007, teve expansão de mais de 17% nas áreas agricultáveis para o cultivo da cultura, o que conseqüentemente, aumentou a área colhida. Estes aumentos foram consequência das políticas públicas implementadas pelo governo à época, para consumo sobretudo do etanol, viabilizando também a exportação do produto (Pereira & Paula, 2017). Pós crise econômica estabelecida no ano de

2015, houve queda na produção nacional, reflexo da retração econômica, mas o que não descaracterizou a importância da cultura (CONAB, 2020).

Segundo estimativas do IEA (2020), a produção de açúcar no mundo foi de aproximadamente 174 milhões de toneladas, sendo este índice carregado sobretudo pela produção brasileira de açúcar, que possui a maior área plantada de cana-de-açúcar e destaca-se como segundo maior produtor etanol em escala global. O país é responsável por cerca de 17,3% da produção mundial de açúcar, segundo dados da United States Department of Agriculture (2019). Para o produto interno bruto brasileiro, a cana-de-açúcar representa cerca de 10% do PIB do agronegócio, ultrapassando a cifra de R\$ 150 bilhões em 2017 (CEPEA, 2017; CNA, 2017).

A safra colhida 2019/20 da cana-de-açúcar 2019/20, foi de 8.442 mil hectares, representando uma retração de 2,4% em relação ao ocorrido na última safra, segundo a CONAB (2020). A produção para essa mesma safra 2019/20, foi de 642.717,8 mil toneladas, o que demonstra uma redução em relação à safra passada em 0,7%. A região Sudeste é a maior produtora de cana-de-açúcar do Brasil com área ocupada de 5.200,6 mil hectares, e em seguida, a região Centro-Oeste com 1.819,9 mil hectares (CONAB, 2020).

2.2 EXPANSÃO E PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS

O Bioma Cerrado ocupa cerca de 204,7 milhões de hectares (22% do território nacional) na porção central do Brasil e engloba parte dos Estados da Bahia, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Maranhão, Paraná, Piauí, São Paulo e Tocantins, além do Distrito Federal (Sano et al., 2008; IBGE, 2021). Atualmente apenas 8% do Bioma é protegido legalmente por unidades de conservação (IPAM, 2021), sendo o restante do território ocupado por agricultura extensionista, o que causa perda de biodiversidade, sobretudo pela condição endêmica de diversas espécies da fauna e flora que habitam o Cerrado.

Acompanhando e fazendo parte do processo de expansão, o Estado de Goiás apresentou aumento da área de cultivo da cana-de-açúcar no ano de 2020 (965,9 mil hectares), da ordem de aproximadamente quatro vezes, quando comparado ao ano de 2006 (202,5 mil hectares), demonstrando também produção compatível com aumento do cultivo da cultura (CONAB, 2020). Como reflexo do aumento do cultivo da cultura, atualmente, Goiás responde por aproximadamente 12% da produção total do país, sendo que a safra 2019/20 alcançou 77,3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e produção de 4,7 bilhões de litros de etanol, correspondente a 9,6% da produção nacional de cana-de-açúcar (CONAB, 2020).

Denotando a importância da cultura para o Estado de Goiás, são registradas 37 usinas, de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2019). Segundo Miziara & Silva (2011), o processo de expansão da cana-de-açúcar está ligado a características físicas e da infraestrutura do local a ser ocupado. O processo de expansão do Estado de Goiás ocorre preferencialmente na região Sudoeste, isso devido o impulso de ocupação das fronteiras agrícolas e a competição entre as culturas já instaladas e a cana-de-açúcar. Os dados de produção e produtividade de cana-de-açúcar em Goiás, demonstram que a cultura tem alto grau de importância na produção agrícola do Estado (CONAB, 2020; IBGE, 2020).

O Estado possui atributos que contribuem para o estabelecimento da cultura na região, denotando aptidão agrícola, contribuída pelo tipo de solo predominante e o clima (Castro et al., 2007; Castro et al., 2010; Barbalho et al., 2013). O tipo de solo predominante na região é o Latossolo, estimado em 50,9% (IBGE, 2021), que são solos minerais, altamente intemperizados, bastante profundos, apresentando boa drenagem e porosidade, atreladas a um relevo plano que propicia o cultivo (Santos et al., 2013; LAPIG, 2019).

2.3 DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS

A cana-de-açúcar possui diversas fases de desenvolvimento, dentre elas: brotação, perfilhamento (formação), crescimento dos colmos e maturação (Aude, 1993). É necessário o estudo e conhecimento de cada fase da planta para aplicar o manejo adequado no solo e estabelecer previsão de problemas que podem acarretar em perda de produtividade. Estudos indicam que a mecanização da colheita da cana-de-açúcar traz benefícios econômicos, porém afeta negativamente a longevidade do canavial, e conseqüentemente, sua produtividade, incidindo também sobre o custo com preparo do solo (Ripoli, 2004). Portanto, para solucionar esta queda de produtividade, realiza-se a renovação do canavial para manter alta produtividade, tendo em vista que a média mais alta do Brasil é da região Sudeste com mais de 412 mil toneladas, sendo que o período médio da cultura em campo é de cinco cortes (Soares et al., 2011; CONAB, 2020).

A brotação leva cerca de três a cinco semanas para ocorrer. O perfilhamento aumenta à medida que a temperatura chega a 30 °C e ocorre o máximo de perfilhamento aos quatro meses após o plantio. Esta fase pode ser influenciada por diversos fatores como o clima, adubação, cultivares e práticas de manejo. (Casagrande, 1991; Aude, 1993). A cana-de-açúcar é considerada uma planta C4, caracterizada por altas taxas fotossintéticas (Teramoto, 2003) decorrentes de uma evolução para diminuir os efeitos da perda de CO₂ atmosférico. A fase de

crescimento dos colmos, ocorre após a formação de todo perfilhamento, aproximadamente de 120 dias até 270 de produção. Como regra geral, a maturação inicia com 270 dias e pode durar até três meses. Assim que a planta completa seu ciclo, diminui a produção de glicose e sacarose e paralisa o seu crescimento, iniciando a concentração de açúcar (Aude, 1993).

O clima está entre os fatores que afetam diretamente o desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar (Ide & Oliveira, 1986; Alexander, 1973; Barbieri, 1993; Scarpari & Beauclair, 2004). Relaciona-se ao clima os fatores de precipitação e temperatura. A temperatura relaciona-se diretamente com o desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo 21 °C temperatura base para a germinação e 32 °C a temperatura considerada ótima para o cultivo (Barbieri et al., 1977). Três são os fatores preponderantes que co-existem para estimulação do florescimento, sendo eles: comprimento do dia, umidade do solo e variedade (Barbieri et al. 1977; André, 2010).

Para Barbieri et al. (1977), a cana-de-açúcar requer uma boa quantidade de umidade no solo durante o período de crescimento, e durante o período de maturação, o ideal seria uma redução da água disponível. O excesso de umidade prejudica a brotação das gemas enquanto que o déficit de umidade, pode causar desidratação. Nesse mesmo sentido, a deficiência hídrica prejudica também o perfilhamento, sendo recomendada a irrigação em períodos críticos (Aude, 1993). Pelo fato de a cana-de-açúcar ser uma planta de tipo C4, na fase de formação dos colmos, que apresenta grande eficiência fotossintética, quanto maior a incidência solar, maior será a produção (Gascho & Shih, 1983; Teramoto, 2003). Ainda, a deficiência hídrica pode provocar paralisação do crescimento da planta, sendo que para se ter bom rendimento produtivo, deve-se ter alta produtividade de colmos e de sacarose, que serão comprometidos em caso de deficiência hídrica (Aude, 1993; Silva, 2014).

Apesar de variar de acordo com a região do Estado, os dados médios gerais de temperatura para Goiás é de aproximadamente 23,4 °C e a precipitação média é de aproximadamente 1500 mm por ano (Severiano et al., 2009; Cardoso, et al., 2014). A demanda hídrica ideal para o ciclo da cultura, varia de 1500 a 2500 mm e a temperatura varia de 22 a 30 °C, contemplando o ambiente ideal e necessário para o desenvolvimento pleno da cana-de-açúcar (Doorenbos & Kassam, 1979).

2.4 ATRIBUTOS FÍSICOS, HÍDRICOS E QUÍMICOS DO SOLO

Os aspectos de formação dos solos são descritos por Jenny (1941), como resultante de uma dinâmica que envolvem cinco fatores: clima, organismos, relevo, material parental e

tempo. Sendo assim, a dinâmica do ambiente é o principal responsável pelas alterações químicas e físicas do solo (Rezaei & Gilkes, 2005).

O sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima e com incorporação de matéria orgânica proveniente do manejo, melhoram as condições físicas do solo e propiciam maior potencialidade para longevidade e produtividade do canavial (Souza et al., 2005). Para compreender melhor o comportamento do solo, faz-se necessário estudo dos atributos físicos, pois eles influenciarão diretamente nos processos químicos e biológicos, comprometendo também o desenvolvimento radicular, que em seu pleno crescimento pode contribuir para redução de custos nos sistemas de produção (Souza et al., 2004; Lepsch, 2011; Barbosa et al., 2018). Segundo Vasconcelos et al. (2003), os atributos físicos e químicos influenciam na relação entre comprimento e massa de raízes, afetando diretamente o seu desenvolvimento.

Segundo Teixeira et al. (2017), a densidade do solo se relaciona com a porosidade total (PT), composição orgânica e mineralógica do solo. A densidade dos solos e a porosidade são fatores que interferem no desenvolvimento radicular (Silva et al., 2000), afetando a infiltração da água e reduzindo a produtividade da cultura (Tavares Filho et al., 2001). Para Ros et al. (1997) e Tormena et al. (2002), valores de porosidade abaixo de $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, são considerados restritivos para desenvolvimento de cultura. A densidade do solo é analisada de forma concomitante à granulometria do solo, pois de acordo com a granulometria, atribui-se diferentes níveis críticos à densidade do solo, para Latossolos Vermelhos com caracterização franco-argilosa, os níveis críticos variam de 1,6 a $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ (Arshad et al., 1996; Reinert et al., 2008).

A relação da alteração da densidade do solo, além de poder limitar o desenvolvimento da cultura, pode afetar fatores como, resistência à penetração, diminuição da macroporosidade, redução da aeração, e da condutividade hidráulica, havendo degradação destes aspectos, constata-se prejuízo a produtividade da cultura (Humbert, 1974; Utset & Cid, 2001; Furlani et al., 2003; Soares et al., 2005; Vasconcelos & Garcia, 2005; Braunack, 2006; Costa et al., 2007; Otto et al., 2011; Wang et al., 2020).

A aeração é estritamente necessária para que haja total absorção dos nutrientes do solo pelas raízes, movimentação e armazenamento de água no solo (Queiroz-Voltan, 1998). A umidade do solo é um fator primordial para o desenvolvimento de qualquer cultura, pois controla a aeração, temperatura e resistência mecânica do solo, sendo essas características afetadas pela densidade do solo e distribuição do tamanho de poros (Collares et al., 2006). Tratando-se de cana-de-açúcar, pode afetar a produtividade de colmos e de açúcar em caso de déficit hídrico (Inman-Bamber, 2004; Dantas Neto, 2006; Rodrigues et al., 2009).

A retenção de água no solo influencia diretamente no crescimento da planta, e pode acarretar efeitos negativos, dependendo da limitação do desenvolvimento radicular que pode ser causado por alta densidade do solo, e por consequência, baixa porosidade (Scarpate et al., 2019). Essa característica, depende também de fatores exógenos, como execução ou não de irrigação, do ciclo hídrico e da granulometria do solo, em que partículas mais finas são verificadas como maiores retentoras de água (Reichardt, 1987; Brady, 1989; Costa et al., 2008).

A resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas que mais impõe restrições ao desenvolvimento radicular, variando positivamente com a densidade do solo e negativamente com o conteúdo de água no solo, sendo utilizada como um indicativo do grau de compactação do solo (Beutler et al., 2007; Blainski et al., 2008). O efeito da compactação é atribuído ao intenso tráfego de maquinários e ao manejo do solo, às condições de aumento de densidade do solo, diminuição do diâmetro médio ponderado e da macroporosidade (Roque et al., 2010; Divino et al., 2011).

A utilização de práticas conservacionistas no solo, contribuem para a manutenção e preservação dos atributos físicos e químicos do solo, possibilitando maior rendimento da cultura. Segundo Reinert & Reichert (2006), a estrutura do solo pode ser compreendida como arranjo das partículas em agregados. O uso e manejo do solo, influenciam em sua estrutura, observando-se que em áreas de mata nativa, a estrutura é preservada pelo acúmulo de matéria orgânica e estabilidade dos agregados, isto, quando comparado a solos com presença de culturas extensivas (Argenton et al., 2005).

As raízes das plantas e a matéria orgânica influenciam na estabilização dos agregados do solo, assim como o sistema de cultivo e as características do solo (Oades, 1984; Silva 1998; Vasconcelos et al., 2010). A agregação do solo pode ser afetada pela exploração do sistema radicular da planta, promovendo a aproximação das partículas (Calonego & Rosolem, 2008). Para Souza et al. (2005), tecendo um comparativo entre sistemas de produção de cana-de-açúcar, em relação a não incorporação da palhada e ao sistema de queimadas, o sistema de cana crua com incorporação de palhada proporciona aumento na produção de colmos, maior estabilidade de agregados, macroporosidade e menores valores de resistência à penetração.

O uso do solo ao longo do tempo, promove exaurimento de seus atributos químicos, exigindo correções necessárias, desde que bem manejadas. As características químicas associam-se sobretudo ao efeito da acidez no solo, que é considerada limitante para o desenvolvimento radicular, restringindo a absorção de águas e nutrientes. A aplicação de calcário no solo, promove melhorias, podendo eliminar a presença de alumínio no solo, que é tóxico para a cultura, porém, pode se observar perdas, especialmente pela baixa solubilidade do

calcário e a sua não incorporação no solo (Cassol, 1995; Caires et al., 1998). A utilização da vinhaça no solo, subproduto da cana-de-açúcar, traz benefícios às características químicas, promovendo melhorias a disponibilidade de nutrientes no solo, sobretudo macronutrientes, como o potássio, contribuindo também para melhorar as condições físicas do solo e em incrementos de produtividade da cultura (Neves et al., 1983; Silva et al., 2014).

O estado de Goiás possui como solo predominante o Latossolo, que apresenta boas condições físicas para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar (Galinkin et al., 2003; Santos et al., 2013; Silva & Castro, 2015). Essa classe de solo apresenta alto grau de intemperismo, e como resultantes, baixa reserva nutricional para as plantas, necessitando assim de correções. A sua gênese está relacionada a origem mineral, em áreas de relevo plano, em que raramente a declividade ultrapassa 7% (Santos et al., 2018). Como características gerais, esses solos são profundos, bem drenados e com baixa troca de cátions, geralmente ácidos e com alta saturação por alumínio (IBGE, 2015; IAC, 2020).

2.5 SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo Sampaio et al. (1987), nos primeiros 0,20 m da superfície do solo, concentram-se aproximadamente 75% das raízes da cana-de-açúcar. Para compreender melhor o sistema radicular da cana-de-açúcar, é importante estudar o que ocorre além da parte aérea, levando em consideração a área de subsuperfície do solo. Existem discordâncias relacionadas aos métodos de avaliação de crescimento radicular, justamente porque é difícil delimitar o crescimento das raízes e existem vários fatores que podem vir a afetar seu desenvolvimento, tais como: propriedades químicas, físicas e biológicas, além de aspectos exógenos como a umidade do solo, aeração e eventuais irrigações (Inforzato & Alvarez, 1957). Pode haver também prejuízo financeiro em caso de acidez e saturação do solo por alumínio elevada, pois necessitará de correções para adequação à planta (Raij et al., 1991; Van Den Berg et al., 2000; Oliveira et al. 2010).

A inibição do desenvolvimento radicular causada por compactação e eventual degradação do solo, é relatada em diversos estudos como prejudicial para crescimento da planta (Alvarez et al., 2000; Bangita et al., 2012; Castioni et al., 2018; Barbosa et al., 2019; Esteban et al., 2019; Guimarães Júnnyor et al., 2019; Awe et al., 2020). Por isto, compreender como se dá o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar é essencial para se alcançar altas produtividades, sobretudo em áreas com baixa disponibilidade hídrica e carência nutricional no solo (Otto et al., 2011).

Observa-se que as principais funções do sistema radicular são sustentação da planta, absorção, transporte de água e nutriente, e a manutenção de reservas da planta (Vasconcelos & Garcia, 2005). O crescimento da planta é relacionado basicamente a disponibilidade hídrica do solo, genótipo e idade da planta, segundo estudos (Kornodofer, 1989; Libardi & Lier, 1999; Medina et al., 2002). A relação da planta com o ambiente não se limita apenas ao crescimento radicular. Com a mortalidade das raízes, são formados bioporos, que consistem em uma estrutura que se torna uma via para drenagem do solo (Smith, 2005).

A disponibilidade hídrica do solo tem relação direta com a morte ou renovação do sistema radicular da cana-de-açúcar, em caso de renovação, as raízes se mantêm em atividade após um tempo de corte da cana-planta, e durante esse período, de forma lenta e gradual, são substituídos por novas raízes (Faroni & Trivelin, 2006). O estudo do sistema radicular é importante para adequar o manejo e proporcionar à cultura, uma estabilidade de desenvolvimento durante todo o seu ciclo, com disponibilidade hídrica e de nutrientes necessária (Strudley et al., 2008; An-Vo et al., 2019; Singels et al., 2019; Mazarei et al., 2020; Yuguda et al., 2020).

Por fim, a presença de alguns invertebrados do solo, os quais são expostas a cultura em campo, como o cupim, podem afetar a produtividade do canavial, se alimentando do sistema radicular, de toletes e das gemas, provocando falhas na brotação e reduzindo a longevidade do canavial (Dinardo-Miranda, 2005). Segundo Faroni (2004), a identificação e acompanhamento do desenvolvimento de raízes, é essencial para compreender o ambiente de produção e direcionar o manejo de forma adequada, gerando maior produtividade e longevidade dos canaviais.

2.6 O SISTEMA MINIRHIZOTRON

Os estudos para avaliação de crescimento radicular *in situ* têm avançado bastante, principalmente relacionados a imageamento, porém sem definição de uma metodologia específica (Silva-Olaya et al., 2016). O conhecimento do sistema radicular da planta, analisando a sua distribuição no solo para compreender sua dinâmica de desenvolvimento, permite melhor planejamento de manejo e contribui para programas de melhoramento genético de plantas, compreendendo formas eficazes de aproveitamento da água disponível (Stone et al., 2001). As restrições do solo que afetam o desenvolvimento radicular da planta devem ser objetos de estudo, pois afetam de forma significativa a produção comercial da cana-de-açúcar, impossibilitando melhorias no manejo do solo e da água, acarretando perdas monetárias (Smith et al., 2005).

Para alcançar os maiores níveis de produtividade e rendimento da cana-de-açúcar, van den Berg (2000) constatou que quanto maior o volume de raízes por camada de solo, maior é o rendimento da cultura. Diversos estudos do sistema radicular da cana-de-açúcar (Vasconcelos et al., 2003; Faroni, 2004; Otto et al., 2009) levam em consideração aspectos físicos relacionados à compactação do solo, fator extremamente limitante ao seu desenvolvimento.

O sistema minirhizotron consiste em um imageamento executado através da instalação de um tubo de acrílico transparente no solo, para avaliar características físicas da planta, como o crescimento do sistema radicular (Faget et al., 2010). Esta metodologia de estudo possui eficácia na observação e quantificação das dinâmicas radiculares, atuando de forma não prejudicial ao desenvolvimento das raízes, de forma que possa ser devidamente analisado o seu crescimento e mortalidade (Johnson et al., 2001; Crocker et al., 2003; Gaul et al., 2008; Muñoz-Romero, 2010; Muñoz-Romero et al., 2011; Amato et al., 2012; Faget et al., 2012; Muñoz-Romero, 2012; Yan et al., 2017).

Comumente são utilizados para esta análise, tubo transparente em conjunto com um sistema digital para aquisição de imagens e seu armazenamento. A fonte para a visualização das raízes, consiste na utilização de um sensor de imageamento, que consiste em um scanner de raíz *in situ* que captura imagens em 360° de forma que não destrua as raízes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na Usina Jalles Machado, situada no município de Goianésia - GO. As coordenadas geográficas da Usina Jalles Machado são: 15°12'51.7" S 48°59'13.8" W, conforme mapa de localização na Figura 1 (QGIS, 2021), e a altitude de aproximadamente 500 m. O clima da região segundo a classificação de Köppen, é Aw, representado por invernos secos e verões chuvosos. A Figura 2 ilustra os dados obtidos pela estação meteorológica na área de estudo referentes ao período do plantio da cana-de-açúcar à colheita, o quantitativo acumulado de pluviosidade foi de 1778,03 mm, enquanto as temperaturas médias mínima e máxima da área foram consequentemente 16,9 °C e 33,2 °C e umidade média relativa de 74%. O solo da região foi descrito e caracterizado como Latossolo Vermelho Ácrico típico, de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018), e como FERRALSOL, conforme World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2015).

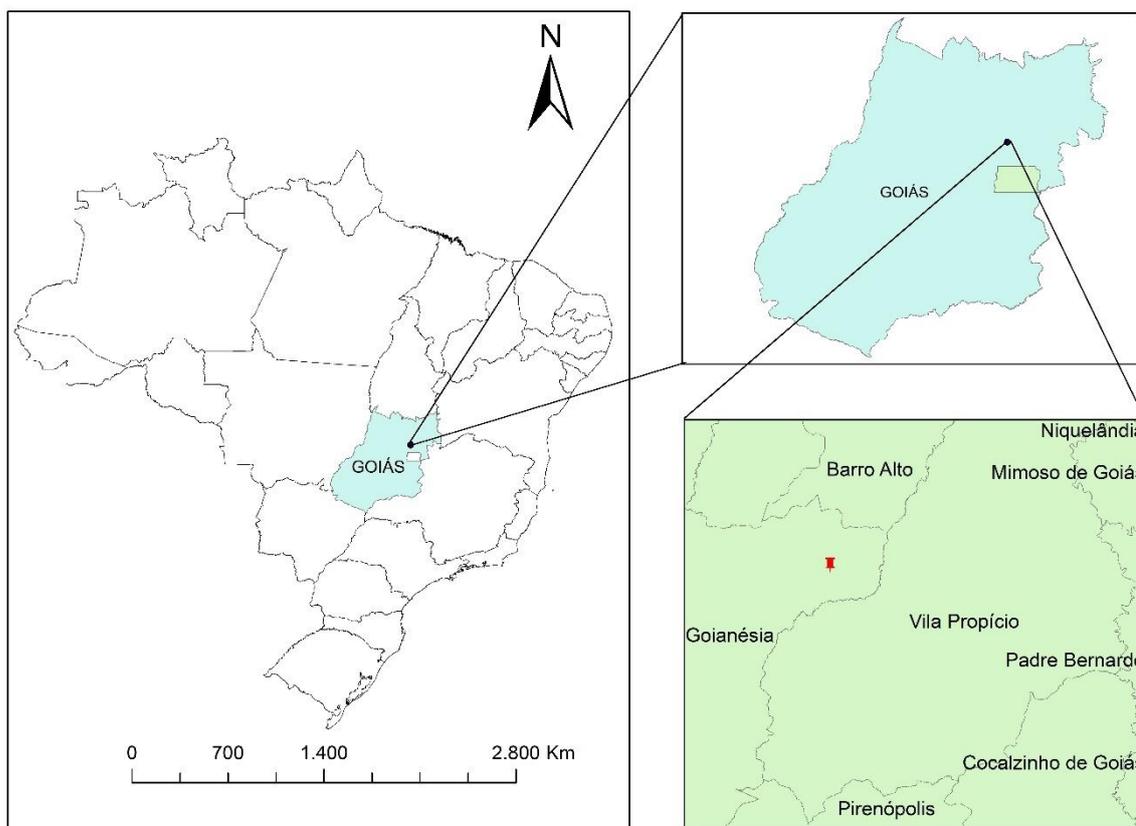


Figura 1. Mapa de localização da área experimental, localizada na Usina Jalles Machado em Goianésia – GO.

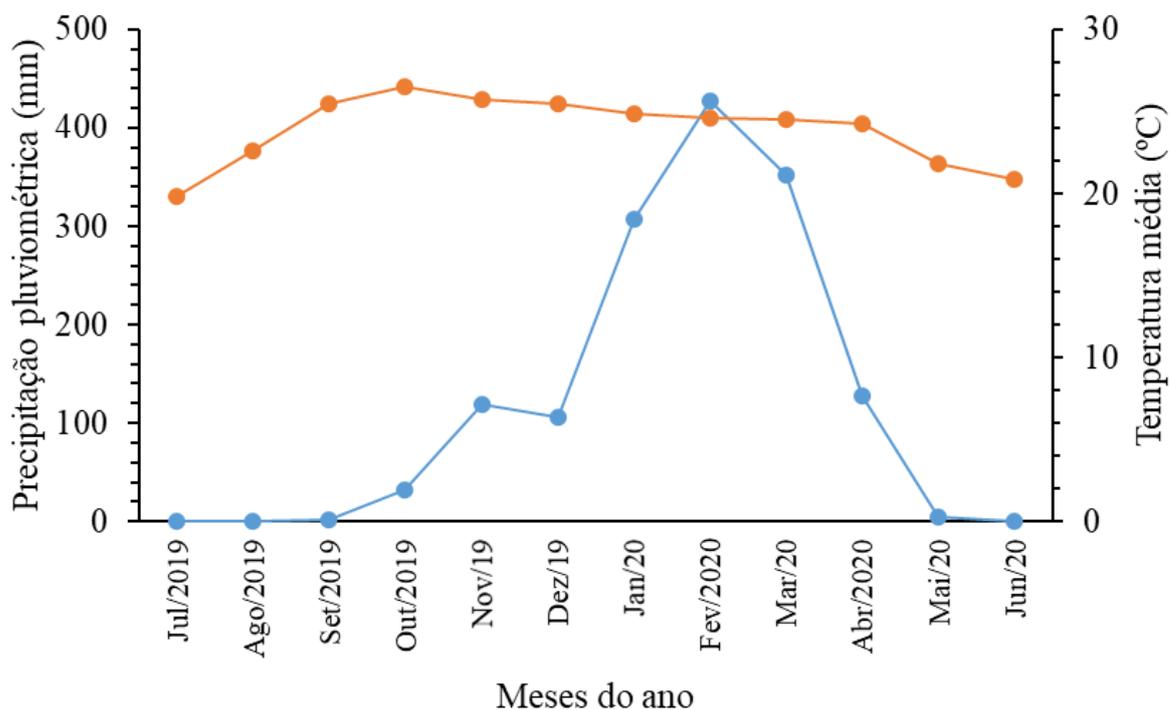


Figura 2. Precipitação pluviométrica mensal (mm) e temperatura média (°C) da área de estudo, para o período entre Julho de 2019 a Junho de 2020.

De acordo com dados fornecidos pela empresa, os registros datam a abertura inicial da área para cultivo de culturas, a aproximadamente 40 anos. A área de instalação do estudo foi pré-definida pela RIDESA, parceira no desenvolvimento do projeto. O histórico mais recente para preparo da área experimental é: eliminação de soqueira com aplicação de glifosato na proporção de 3 L ha⁻¹; aplicação de calcário dolomítico a lanço na superfície do solo, na proporção de 1.500 kg ha⁻¹ antes de cada replantio; aplicação 800 kg ha⁻¹ de superfosfato simples a lanço na superfície do solo; aplicação de 1.000 kg ha⁻¹ de gesso agrícola na superfície do solo antes do replantio; revolvimento do solo com grade pesada (32 discos) acoplada a trator; realização de subsolagem com subsolador (haste de 0,80 m) a aproximadamente 0,50 m de profundidade. Por último, utilização de grade niveladora para homogeneizar o terreno. Na sequência, como prática de rotação de cultura, a área foi plantada com *Crotalaria spectabilis* no mês de Novembro de 2018. Na segunda quinzena do mês de Fevereiro de 2019, a área com crotalária foi cortada com roçadeira mecânica acoplada a trator e espalhada de forma homogênea na superfície do solo. Logo após, foi realizado a abertura de sulcos de aproximadamente 0,30 m de profundidade na área, sobre a palhada remanescente, com aplicação da adubação de plantio efetivada em linha do formulado 11-52-00 (fosfato monoamônico). O plantio das variedades RB034045, RB985476 e RB987935, foi realizado

manualmente em cada parcela no dia 07 de Março de 2019. Também foi realizado a aplicação de 60 mm de lâmina de água via irrigação, trinta dias após efetivado o plantio em toda área experimental. Com o término do primeiro ciclo da cana planta, foi efetuada a colheita manual da cultura no mês de Junho de 2020. Após a colheita foi efetuada uma irrigação de salvamento de 60 milímetros com a barra de irrigação em autopropelido, no mês de Julho de 2020.

As variedades estudadas apresentam ciclo médio de aproximadamente 500 dias até o primeiro corte, são elas: RB985476, RB034045 e RB987935. Os valores médios em ton. cana ha⁻¹ (TCH) e o valor econômico relativo estão expostos na Tabela 1. O delineamento utilizado na realização do experimento foi o de blocos casualizados, com três repetições por área (as áreas são representadas pelas variedades estudadas).

Tabela 1. Valores médios da tonelada de cana por hectare (TCH) e valor econômico relativo (VER) das três variedades estudadas.

Variedade	TCH (ton. de cana ha ⁻¹)	VER (em mil reais ha ⁻¹)
RB034045	119,26	9,34
RB985476	116,85	10,00
RB987935	100,74	8,34

3.2 COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO EM CAMPO

Amostras de solo com estrutura deformada de aproximadamente 2,00 kg foram coletadas no mês de Setembro, em mini-trincheiras abertas ao lado de cada planta, nas profundidades 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60, 0,80-0,90 m. Na sequência, foram devidamente identificadas, acondicionadas em sacos plásticos e levadas para o laboratório para realização das análises químicas, físicas e hídricas necessárias.

Amostras de solo com estrutura indeformada (Figura 3) para determinação das curvas de retenção de água no solo (CRA), foram coletadas em anéis volumétricos de aço inoxidável com volume aproximado de 100 cm³, com auxílio de um amostrador de Uhland. As amostras foram coletadas em mini-trincheiras abertas ao lado de cada planta. Na sequência, todos os anéis coletados foram identificados, preparados e envolvidos em filme plástico para conservação da unidade. Foram colhidas três subamostras de anéis em quatro profundidades: 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60, 0,80-0,90 m, totalizando ao final, trinta e seis subamostras.



Figura 3. Coleta de anéis volumétricos em campo. a) anéis volumétricos após a coleta. b) pesquisador manuseando equipamento para realizar a coleta.

Para determinação da agregação do solo, monólitos de aproximadamente 2,00 kg de solo (Figura 4), foram coletados nas mini-trincheiras próximas a cada planta, nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60, 0,80-0,90 m. Ao final do processo, cada amostra foi devidamente identificada e envolvida em filme de pvc e plástico bolha, e em seguida, acondicionadas em caixas plásticas e levadas para laboratório para realização das análises necessárias. Todas as amostras deformadas e indeformadas foram coletadas no campo, na primeira quinzena do mês de Setembro de 2019.



Figura 4. Monólitos de solo coletados em campo.

3.3 TESTES DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

Os testes de resistência do solo à penetração foram realizados na área do experimento nas profundidades entre 0,00-0,70 m de profundidade, na primeira quinzena do mês de Setembro de 2019. Foi utilizado um penetrômetro de impacto, conforme Figura 5. Foram realizadas duas repetições nas proximidades da planta de cada variedade selecionada, totalizando dezoito testes. O equipamento utilizado foi o penetrômetro de impacto, tipo Stolf. A metodologia para análise foi realizada de acordo com Stolf (1991), conforme Equação 1:

$$Pr \text{ (MPa)} = 0,56 + 0,689 \times N \quad (1)$$

em que: Pr= resistência à penetração em MPa; N= número de impactos.

Quando processada a penetrometria, foram concomitantemente analisadas as amostras de umidade gravimétrica, para melhor aferição da quantidade de água no solo e sua relação com a resistência do solo à penetração.



Figura 5. Leitura da resistência a penetração em campo. a) pesquisador manuseando penetrômetro. b) pesquisador realizando leitura da resistência à penetração em campo.

3.4 TESTES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CAMPO

A permeabilidade do solo em campo foi avaliada por meio de um permeâmetro de Guelph (Reynolds & Elrick, 1987), conforme Figura 6. Para utilizar o permeâmetro, foi feito um furo no solo com um raio (R) de 3 cm e carga hidráulica (H) única de 3 cm, variando conforme a velocidade de infiltração da água no solo. Foram realizadas, ao todo, nove medições, uma para cada repetição de cada variedade, na primeira quinzena do mês de Setembro de 2019. A Equação 2 foi utilizada para obtenção da condutividade hidráulica saturada de campo (K_{fs}):

$$K_{fs} = CQ/2\pi H^2 + C\pi R^2 + 2\pi H/a \quad (2)$$

em que: K_{fs} é dado em cm s^{-1} ; Q é a vazão média da água infiltrada no solo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); H é a carga hidráulica (cm); R é o raio do furo (cm); A é o parâmetro associado à textura e à estrutura do solo (cm^{-1}); C é fator adimensional estabelecido em função da relação H/R.



Figura 6. Coleta de dados através do permeômetro de Guelph no campo.

3.5 ANÁLISES LABORATORIAIS

3.5.1 Análises químicas

Para as leituras de pH, 10 g de solo (terra fina seca ao ar) foi pesada e adicionada em copo plástico de 100 mL⁻¹. Foi adicionado 25 mL⁻¹ de água destilada, logo após, foi agitado e deixado em repouso por 60 s. Após este repouso, foi agitada a amostra e mergulhado os eletrodos para leitura do pH. Para obtenção do pH do solo, foi utilizada solução CaCl₂, e na sequência, a concentração de íons H⁺ na solução do solo foi obtida, segundo Teixeira et al. (2017).

O fósforo disponível, correspondente à fração utilizada pelas plantas, foi calculado segundo Teixeira et al. (2017). Foi pesado 10 g de solo e adicionado 100 mL de solução extratora Mehlich⁻¹, agitado durante 5 min e deixado para descanso durante uma noite. Após,

foi adicionado 10 mL de solução ácida de molibdato de amônio diluído e aproximadamente 30 mg de ácido ascórbico em pó. Depois de novamente agitado, procedeu-se a leitura da densidade ótica no espectrofotômetro-UV-Vis usando filtro vermelho.

Foi utilizado 10 g de massa de solo para análise dos cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} . Para as determinações de laboratório, foram utilizados 100 mL de solução de KCl 1 mol L^{-1} , pipetadas para Erlenmeyers de 125 mL em três alíquotas de 25 mL. Para determinação do Ca^{2+} e Mg^{2+} , foram adicionados 3 mL de KOH a 10% e adicionado 30 mg de ácido ascórbico e 30 mg do indicador ácido calconcarbônico + sulfato de sódio; após, foi titulado com solução padronizada de ácido etilenodiaminotetracético contendo 0,0125 mol L^{-1} até o vermelho virar azul. Para o Al^{3+} , foi utilizado a padronização da solução de NaOH com 0,025 mol L^{-1} , em 25 mL obtido da extração de KCl, foram adicionadas três gotas de azul de bromotimol e titular com solução padronizada de NaOH, até que a coloração alterasse de amarelo para verde-azulada. Todos os procedimentos foram realizados segundo Teixeira et al. (2017).

Para as análises de K^+ e Na^+ , foi pesados 10 g de solo e colocados em Erlenmeyer de 125 mL, após foi colocado 100 mL de solução extratora Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} e H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}); após, passou-se o extrato obtido no fotômetro de chama para realizar a leitura. Para análise do sódio e potássio, foram pesados 5 g de solo e colocado em Erlenmeyer de 125 mL e juntado com 75 mL de solução de acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} pH 7,0. Após foi agitado durante 10 minutos e pipetado 25 mL da solução sobrenadante obtida e transferida para um Erlenmeyer de 125 mL; ao final para determinação, foi adicionado três gotas da solução de fenolftalaína e titulado com solução padrão de 0,025 mol L^{-1} até o desenvolvimento da cor rósea. Os procedimentos foram realizados conforme Teixeira et al. (2017).

A soma de bases trocáveis (SB) foi calculada somando os teores das bases Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ , em $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. A CTC total (a pH 7,0), foi calculada pelo total de cargas negativas que o solo pode adsorver, e determinado pela soma entre o valor da soma de bases trocáveis e a acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$). Todos os procedimentos foram obtidos, conforme segundo Teixeira et al. (2017). Para análise dos micro elementos, foram pesados 5 g de solo e colocado em Erlenmeyer de 50 mL, posteriormente, adiciona-se 25 mL de solução extratora Mehlich-1; após, foi agitado por 5 minutos, e filtrado imediatamente após a suspensão. A partir dessa filtração, os micronutrientes são determinados por espectrometria de absorção atômica de chama, utilizando lâmpadas para cada elemento. Todos os procedimentos foram realizados, conforme Teixeira et al. (2017).

3.5.2 Umidade, granulometria e densidade de partículas do solo

Para determinação da umidade gravimétrica, as amostras de solo foram acondicionadas em latas de alumínio, e na sequência realizadas as suas pesagens. Após, cada amostra foi transferida para estufa a 105 °C, e deixada por 24 h. Passado esse tempo, foi retirada a amostra da estufa, esperou-se esfriar e foi pesada. O cálculo é representado pela Equação 3 (Donagema et al., 2011):

$$U_g = (a-b)/b \quad (3)$$

em que: U_g : unidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$); a: massa da amostra úmida (g); b: massa da amostra seca (g).

Para realização das análises granulométricas foi utilizado o método do densímetro, segundo Claessen et al. (1997). Após separação de 50 g de solo em copo plástico, é adicionado 100 mL de água e 25 mL de solução de hidróxido de sódio, agitou-se o conteúdo e o deixou em repouso a noite. Posteriormente o conteúdo é transferido para copo metálico utilizando um jato de água, permanecendo volume de aproximadamente 300 mL. O copo é então agitado, sendo 15 min para solos argilosos e 5 min para arenosos. O conteúdo foi então passado por uma peneira de 20 cm de diâmetro e malha de 0,053 mm e o material foi lavado; a areia retida nesta peneira foi lavada e transferida para lata de alumínio, pesada e foi para estufa a 105 °C, após secagem, realiza-se novamente pesagem para obter peso da areia grossa e areia fina. Agitou-se então o conteúdo em suspensão durante 20 segundos. Para a prova em branco, foi utilizado dispersante (hidróxido de sódio), e complementado o volume, após, foi agitado durante 20 segundos. Após 90 minutos de sedimentação, foi transferido o volume da suspensão para copo de plástico de 300 mL. Então, este conteúdo foi transferido para proveta de 250 mL e agitado, em seguida foi executada leitura com o densímetro. A análise foi feita em laboratório (Figura 7) e os cálculos das frações granulométricas foram obtidos mediante as Equações 4, 5, 6 e 7:

$$\text{Teor de argila} = (\text{leitura densímetro} + \text{leitura da prova em branco}) \times 20 \quad (4)$$

$$\text{Teor de areia fina} = \text{areia fina (g)} \times 20 \quad (5)$$

$$\text{Teor de areia grossa} = [\text{areia fina (g)} + \text{areia grossa (g)}] - \text{areia fina (g)} \times 20 \quad (6)$$

$$\text{Teor de silte} = 1000 - \text{teor} [\text{argila (g)} + \text{areia fina (g)} + \text{areia grossa (g)}] \quad (7)$$



Figura 7. Procedimentos de laboratório para execução da análise granulométrica.

Para determinação da densidade de partículas (Teixeira et al., 2017), foi aferido em balão volumétrico de 50 mL com água deionizada e desareada. Foi utilizado 20 g de solo para esta análise, que foi colocado em recipiente de massa conhecida, secado em estufa a 105 °C, e obtida amostra da massa seca. A amostra é então transferida para o balão aferido de 50 mL. Foi então adicionado álcool etílico até cobrir a amostra, observando se há formação de bolhas, caso haja, deve-se agitar bem para eliminá-las; por fim, é anotado o volume de álcool gasto. Foi utilizado uma pipeta para transferir o líquido para o balão (Figura 8) e o cálculo realizado pela Equação 8:

$$D_p = m_a / (v_t - v_u) \quad (8)$$

em que: D_p = densidade de partículas do solo, em g cm^{-3} ; m_a = massa da amostra seca a 105 °C, em g; v_t = volume total aferido do balão, em mL; v_u = volume utilizado para completar o balão da amostra, em mL.



Figura 8. a) e b): Procedimentos de laboratório para determinação da densidade de partículas do solo.

A Tabela 2 expressa os valores médios das análises granulométrica, grupamentos texturais e densidade de partículas do solo obtidos em laboratório, nas quatro camadas de solo estudadas.

Tabela 2 Valores médios da análise granulométrica, grupamento textural e densidade de partículas do solo nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60, 0,80-0,90 m.

Camada (m)	Areia	Silte	Argila	Grupamento textural	Densidade de partículas
	g kg ⁻¹				g cm ⁻³
0-0,10	390	270	340	Franco-argiloso	2,67
0,10-0,20	376	277	347	Franco-argiloso	2,69
0,40-0,60	343	303	354	Franco-argiloso	2,72
0,80-0,90	310	336	354	Franco-argiloso	2,74

3.5.3 Curva de retenção de água no solo

Para obtenção da curva de retenção de água no solo (CRA), foi utilizada metodologia de Teixeira et al. (2017). As amostras coletadas no campo foram saturadas por capilaridade em uma bandeja plástica durante 24 horas, conforme mostrado na Figura 9, utilizando um pano para proteger a amostra e não perder solo. Após isso, foi realizado pesagem inicial das amostras e levadas à mesa de tensão de areia, com potenciais matriciais equivalentes

a -10, -30 e -60 hPa. As amostras foram pesadas depois de cada análise, após saírem da mesa de tensão.



Figura 9. Amostras de solo em cilindro em processo de saturação.

Depois dessa sequência de potenciais, as amostras foram colocadas sobre placas porosas na Câmara de Richards, conforme Figura 10, seguindo o padrão de pesagem após análise em determinado potencial matricial. Os anéis foram analisados sob os seguintes potenciais matriciais: -100, -330, -800, -4.000, -10.000, e -15.198,75 hPa. Ao final do processo de dessorção da água, foi obtida a densidade do solo (D_s , em g cm^{-3}) pelo método do anel volumétrico, com massa do solo seco obtida na estufa a 105 °C. A curva de retenção de água do solo foi obtida pela seguinte Equação 9, conforme van Genuchten (1980):

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^{-m} \quad (9)$$

em que: θ – umidade do solo (g g^{-1}); θ_r – umidade residual (g g^{-1}) determinada no potencial de -15.198,75 hPa; θ_s – umidade de saturação (g g^{-1}); ψ – potencial mátrico (hPa); e α , m , n – valores empíricos da equação (adimensionais).

A saturação efetiva foi obtida pela diferença da umidade de saturação e a umidade gravimétrica correspondente ao potencial de -15.198,75 hPa (Santos et al., 2011).

A porosidade total do solo foi calculada pela Equação 10 (Santos et al., 2011):

$$PT = 1 - D_s / D_p \quad (10)$$

em que: PT é porosidade total, D_s é a densidade do solo e D_p é a densidade de partículas.

A macroporosidade foi calculada segundo a Equação 11 (Santos et al., 2011):

$$Ma = (PT - \theta_{-60 \text{ hPa}}) \quad (11)$$

em que: Ma é macroporosidade, PT é porosidade total do solo e $\theta_{-60 \text{ hPa}}$ é a umidade gravimétrica medida no potencial de -60 hPa.

A microporosidade efetiva foi calculada segundo Santos et al. (2011) mediante a diferença da umidade gravimétrica a -60 hPa e a umidade a -15.198,75 hPa. O índice de vazios e poros bloqueados foram calculados conforme Libardi (2000), o índice de vazios pelo resultado da porosidade total calculada dividido por 1, menos a porosidade total calculada e os poros bloqueados foram obtidos pela subtração da porosidade total calculada, menos a porosidade total determinada. A capacidade de campo foi obtida na umidade correspondente ao potencial $\theta_{-60 \text{ hPa}}$ conforme Oliveira et al. (2003) e o ponto de murcha permanente foi obtido no potencial de $\theta_{-15198,75 \text{ hPa}}$, conforme Savage et al. (1996).



Figura 10. Câmara de Richards com amostras indeformadas.

3.5.4 Estabilidade de agregados em água

A estabilidade dos agregados do solo, foi determinada por via úmida, através do peneiramento de amostras de solo em água, após pré umedecimento lento dos agregados, por capilaridade. Os agregados, após preparados, foram transferidos para dois conjuntos de seis peneiras: > 2,00 mm (Ag1), 1,00-2,00 mm (Ag2), 0,50-1,00 mm (Ag3), 0,25-0,50 mm (Ag4), 0,105-0,25 mm (Ag5), e < 0,105 mm (Ag6) de diâmetro de malha (correspondente ao material de solo que passa pela peneira de 0,105 mm), sendo submetidos à agitação vertical (42 ciclos por min) durante 15 min, imersos em recipiente com água. O solo retido em cada peneira foi acondicionado em recipientes de alumínio para secagem em estufa a 105 °C, durante 24 h, em seguida foram pesadas e calculadas a massa e a porcentagem de agregados estáveis em cada uma das classes de diâmetro de agregados (Teixeira et al., 2017). Os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) foram obtidos de acordo com a Equação 12:

$$DMP_u = \sum (x_{iu} \cdot w_{iu}) \quad (12)$$

em que: DMP_u é diâmetro médio ponderado por via úmida; Xi_u é diâmetro médio das classes (mm); Wi_u é a proporção de agregados em cada classe em relação ao total (%).

3.6 ACOMPANHAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR E AQUISIÇÃO DE DADOS

Para cada uma das três variedades avaliadas (RB985476, RB034045 e RB987935), foi instalado um tubo de acrílico imediatamente ao lado de cada planta, sendo três plantas selecionadas por variedade (três repetições), perfazendo um total de nove tubos instalados para aquisição do imageamento do sistema radicular da cana-de-açúcar para este estudo.

Para a instalação de cada tubo de acrílico, foi necessário a utilização de um trado confeccionado com as dimensões do tubo para perfuração do solo, conforme Figura 11. A distância média da planta e o tubo foi de 0,15 m. Cada tubo apresenta dimensões aproximadas de 1,00 m de comprimento e 70 mm de diâmetro, sendo que 0,80 m do tubo foram inseridos dentro do solo, para que fosse possível a realização das leituras via escaner. O escaner possui hastes de segurança (cerca de 20 cm), que são determinantes para a gradação das profundidades estudadas.



Figura 11. Trado holandês para abertura dos furos e instalação dos tubos de acrílico no solo.

Após a instalação dos tubos de acrílico no solo, foram executadas três leituras durante o período de desenvolvimento da cultura: a primeira leitura foi realizada em 28 de Novembro de 2019; a segunda leitura foi realizada em 7 de Fevereiro de 2020; e a terceira leitura foi realizada em 9 de junho de 2020. Os dados do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar foram obtidos por leitura direta no campo (Figura 12), gerada em um ângulo de 360°, por meio de um scanner de raízes CI-600. Na sequência, os dados foram analisados no software RootSnap!, conforme Figura 13.



Figura 12. Preparo para coleta de dados do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar através do scanner de raízes.

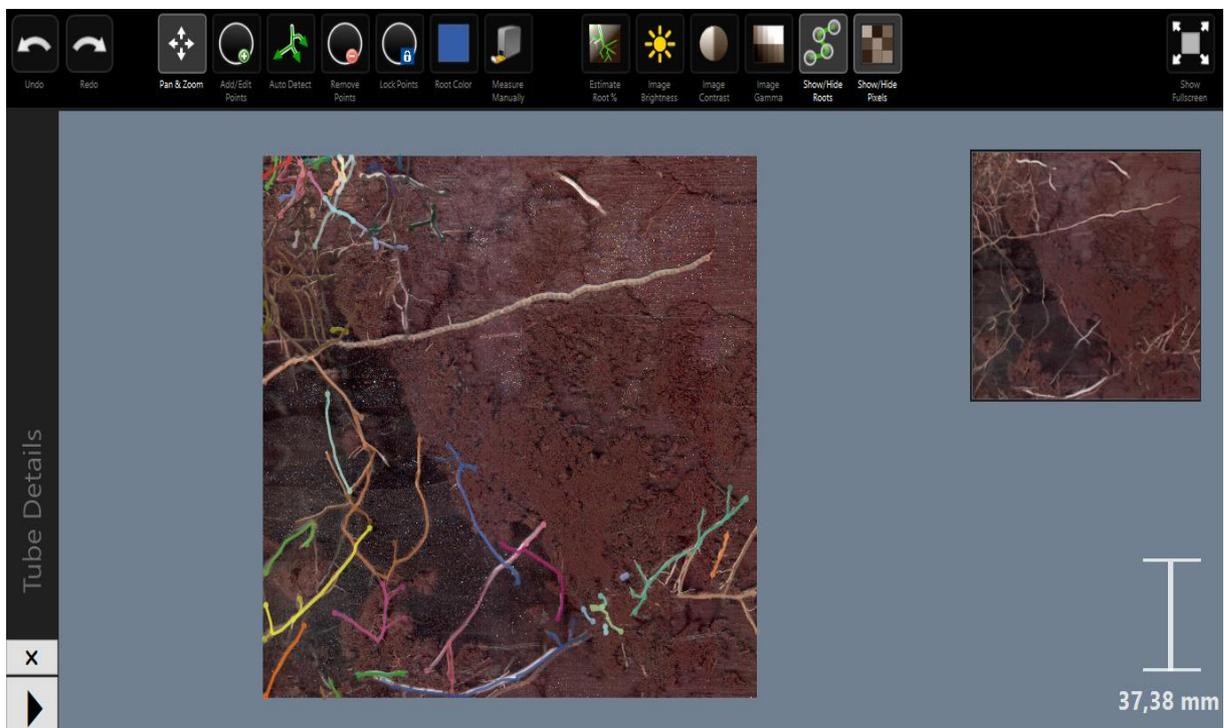


Figura 13. Análise do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar utilizando o software RootSnap!.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para comparação das médias dos atributos químicos, físicos do solo e das médias de comprimento total, área total, volume total e diâmetro médio do sistema radicular da cana-de-açúcar por camadas de solo, os dados foram submetidos ao teste Kolmogorov-Smirnov para verificação da normalidade, e na sequência, após realizada a análise de variância, submetidos ao teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$), utilizando o software R (R CORE TEAM, 2015). As Tabelas e Figuras foram confeccionadas com auxílio do programa Microsoft Excel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Com exceção do sódio e do alumínio, todos os atributos químicos do solo apresentados na Tabela 3, denotam diferenças estatísticas entre as profundidades analisadas. O pH do solo apresenta maior valor na camada de 0-0,10 m (5,43), e o menor valor na camada mais profunda de 0,80-0,90 m (5,27). O cálcio apresenta teor na camada correspondente a 0-0,10 m de 2,80 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, enquanto a camada mais profunda de 0,80-0,90 m de profundidade, apresenta teor de 0,60 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$.

Segundo recomendações de Raij et al. (1996), o teor de cálcio no solo considerado alto é acima de 7 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, teor que é alcançado em todas as profundidades. A deficiência de cálcio no solo, é apontada como uma das mais consideráveis para restrição do desenvolvimento radicular, isto reduziria a produtividade, pois o volume de solo explorado pelas raízes, não seria suficiente para o fornecimento de água durante períodos de estiagem (Ritchey et al., 1982). A definição do regime hídrico da área de estudo em Aw, segundo classificação de Köppen, ilustra que a região passa por períodos de seca, e que se constatado a má formação da planta para buscar água nas partes mais profundas do solo, irá refletir na redução da produtividade.

O magnésio tem seus maiores teores na camada de 0-0,10 m, com 1,30 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, e menores na camada de 0,80-0,90 m com 0,43 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. A deficiência de magnésio pode ser fator de inibição na absorção do cálcio, fósforo e potássio (Rosetto, 2004; Zambrosi, 2012). O magnésio é componente da molécula de clorofila, participa da função enzimática e é parte vital para estruturação da planta e configuração dos ácidos nucleicos (Mengel & Kirkby, 2001). A inibição da relação do magnésio com o fósforo, pode prejudicar a ativação de enzimas envolvidas na transferência de fosfato (Taíz et al., 2004). O desenvolvimento estrutural da planta é prejudicado pela ausência do magnésio, encurtando os colmos e reduzindo seu diâmetro (Orlando Filho, 1983).

Tabela 3. Atributos químicos do solo nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60 e 0,80-0,90 m de profundidade.

Camada	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H+Al	K ⁺	P	S	CTC	V	COT	Zn	B	Cu	Fe	Mn
(m)	CaCl ₂	(cmol _c dm ⁻³)				(mg dm ⁻³)			(cmol _c dm ⁻³)	%	(g dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)					
0-0.10	5,43a	2,80a	1,30a	0,01a	0,00a	2,07b	61,43a	14,40a	18,20b	6,33a	66,94a	10,25a	1,57a	0,22a	0,47a	23,13b	15,03a
0.10-0.20	5,33ab	1,77ab	0,83ab	0,01a	0,00a	2,23b	33,80ab	7,60ab	28,93ab	4,93ab	53,81a	8,12b	1,13ab	0,19a	0,30a	23,77b	9,23ab
0.40-0.60	5,43a	0,90b	0,60b	0,01a	0,00a	2,57ab	26,17b	2,00b	37,83a	4,14b	37,74b	5,22c	0,87bc	0,14b	0,23a	26,63ab	5,63b
0.80-0.90	5,27b	0,60b	0,43b	0,01a	0,00a	2,83a	22,70b	1,23b	19,77ab	3,93b	28,03b	4,06c	0,60c	0,09b	0,23a	28,37a	4,00b

⁽¹⁾ Valores médios analisados dos atributos químicos da área de estudo. Ca, cálcio; Mg, magnésio; Na, sódio; Al, alumínio; H+Al, acidez potencial; K, potássio; P, fósforo; S, enxofre; CTC, capacidade de troca de cátions; V, saturação de bases; C.O.T., carbono orgânico total; Zn, zinco; B, boro; Cu, cobre; Fe, ferro; Mn, manganês. ⁽²⁾ Letras minúsculas diferentes na mesma coluna dentro da mesma camada indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (p <0,05).

O elemento fósforo na camada de 0-0,10 m de profundidade, apresenta teor de 14,4 mg dm⁻³, sendo mais elevado do que a camada mais profunda de 0,80-0,90 m, que possui teor de 1,23 mg dm⁻³. A presença de fósforo como fonte energética para a planta é indispensável no solo, sendo colocada como a mais limitante em caso de ausência, por isto, a adubação conforme foi executada pré plantio para correção dos níveis do solo é essencial (Hinsinger, 2001). Na faixa de 0-0,10 m, a qual o maior teor é encontrado, Sousa & Lobato (2004) caracteriza como médio, equivalente de 12 a 17,9 mg dm⁻³, em acordo com o teor de argila. Os níveis de enxofre no solo estão adequados conforme recomendação de Raij et al. (1996), em que o nível de interpretação alto para a cultura é maior que 10 mg dm⁻³.

O elemento fósforo, apresenta diferenças entre as camadas, sendo que a camada de 0-0,10 m, possui o maior teor, com 14,4 mg dm⁻³, e o menor teor foi encontrado na camada de 0,80-0,90 m, com 1,23 mg dm⁻³. O fósforo possui importante função nos processos metabólicos da cana-de-açúcar, colaborando no desenvolvimento do sistema radicular e aumentando a produção de colmos, em caso de deficiência deste nutriente, a produção de sacarose pode ser afetada (Simões Neto et al., 2009). Segundo recomendação de Raij et al. (1996), a camada correspondente a 0-0,10 m, está com nível considerado médio (13-30 mg dm⁻³), entretanto as camadas mais profundas estão com níveis considerados baixos (0-12 mg dm⁻³).

Os teores mais altos de potássio foram observados na camada de 0-0,10 m (61,83 mg dm⁻³), e os teores mais baixos, na camada de 0,80-0,90 m, (22,7 mg dm⁻³). A acidez potencial do solo, apresenta maiores valores nas camadas mais profundas do solo, variando entre 0,40-0,90 m de profundidade, em relação às de superfície (0-0,20 m). Na camada de 0,80-0,90 m, observa-se o valor mais alto (2,83 cmol_c dm⁻³), e na camada de superfície 0-0,10 m, o menor valor (2,07 cmol_c dm⁻³). Em trabalho de Orlando Filho et al. (1993), constatou-se que lavouras de cana-de-açúcar com alta produtividade, apresentam relação K/CTC acima de 5%. Esta relação no presente trabalho foi alcançada no perfil do solo estudado, sendo que o nível de potássio está acima do nível crítico de 2,0 mmol_c dm⁻³ sugerido por Rodella et al. (1983).

A acidez potencial (H+Al) prevaleceu com valores baixos, sendo o maior resultado na camada de 0,80-0,90 m, com 2,83 cmol_c dm⁻³. Isto ocorre sobretudo, pelos valores de alumínio (0,0 cmol_c dm⁻³ em todo perfil) que não indicam sua presença. Esse resultado se deve, provavelmente, devido a aplicação de calcário e gesso antes do plantio da área, que tem ação neutralizante no alumínio, conforme Zambrosi et al. (2007) e Rheinheimer et al. (2000). Com as medidas de correção da acidez do solo apresentadas no histórico da área, ocorreu também elevação dos teores de cálcio e magnésio na camada de 0-0,10 m com 5,43. Entretanto, cuidados com aplicação e dosagem de calcário no solo devem ser observados, visto que pode provocar

desequilíbrios nutricionais indesejados, sobretudo, a deficiência de micronutrientes disponíveis às plantas (Vitti, 2005).

Já quanto ao enxofre, esse elemento químico apresenta teores maiores de concentração nas camadas de 0,40-0,60 m ($37,83 \text{ mg dm}^{-3}$), e menor na camada de 0-0,10 m de profundidade ($28,93 \text{ mg dm}^{-3}$). A gessagem realizada na área do experimento, contribuiu com as características físico-químicas do solo, fomentando os teores de cálcio e enxofre, neutralizando os efeitos fitotóxicos do alumínio (Zambrosi et al., 2007). Esta prática também beneficia o sistema radicular, pois pode haver um incremento de biomassa, sobretudo nas camadas mais profundas, permitindo inclusive maior extração de água no solo (Borges, 2012). A penetração das raízes em camadas mais profundas, colabora com o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar que podem penetrar aproximadamente até 0,80 m, conforme descrito por Vasconcelos et al. (2003).

O carbono orgânico total apresenta teores maiores na camada superior (0,10 m), seguindo uma tendência de queda nas camadas consecutivas (a partir de 0,20 m, até 0,90 m de profundidade). Na camada de 0-0,10 m o teor é de $10,25 \text{ g dm}^{-3}$. Já na camada mais profunda (0,80-0,90 m), o teor encontrado é de $4,06 \text{ g dm}^{-3}$. O resultado de carbono orgânico total, segundo Sousa & Lobato (2004), na camada de 0-0,10 m, está na faixa considerada média, entre 9 e 14 g dm^{-3} , isto devido a prática conservacionista de plantio direto e correção do solo executados na área experimental do presente trabalho, tal prática contribui para a solubilização dos nutrientes, assim como absorção e consumo da planta (McBride & Blasiak, 1979; Penatti, 2013). Nas camadas de 0,10-0,20, 0,40-0,60 e 0,80-0,90 m, os valores estão abaixo de 9 g dm^{-3} , e que segundo recomendação de Sousa & Lobato (2004), é considerado baixo.

A saturação por bases possui valor mais elevado (66,94 %) na camada de 0-0,10 m, e menor valor na camada de 0,80-0,90 m de profundidade (28,03 %). Para a cana-de-açúcar, o recomendado é que o valor prevaleça acima de 60%, conforme Raij et al. (1996). Recomenda-se correção do solo apenas se o valor de saturação por bases na camada de 0-20 cm for inferior a 40%, sendo que índices médios na faixa de 60% colaboram com o desenvolvimento e aprofundamento do sistema radicular da cana-de-açúcar (Oliveira et al., 2007).

A CTC do solo demonstra uma redução de valores da camada superficial para as camadas mais profundas do solo. A camada de 0-0,10 m apresenta o maior valor e a de 0,80-0,90 m de profundidade o menor valor ($6,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $3,93 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente). A capacidade de troca de cátions (CTC) do solo é calculada pela soma dos teores de bases trocáveis no solo: cálcio, magnésio, potássio e alumínio (Veloso et al. 2001), sendo que quanto mais alta a CTC do solo, mais alta sua capacidade de reter cátions. O carbono orgânico presente

no solo também contribui para os valores da CTC, principalmente em solos com baixa atividade na fração argila (Ciotta et al., 2003).

O zinco e o boro possuem resultados com tendência de diminuição no teor desses nutrientes em relação ao aumento da profundidade do solo. A camada de 0-0,10 m apresenta 1,57 mg dm⁻³ de zinco e 0,22 cmol_c dm⁻³ de boro, e a camada 0,80-0,90 m com respectivamente 0,6 e 0,09 mg dm⁻³. O elemento boro, o nível é considerado médio na camada de 0-,10 m, que vai de 0,21 a 0,60 mg dm⁻³, e as demais camadas os valores são considerados baixos, menores que 0,20 mg dm⁻³ Raij et al. (1996). O zinco apresenta teor alto na camada de 0-0,10 m, sendo acima de 1,2 mg dm⁻³, e nas camadas subsequentes os teores são considerados médios, entre 0,6 e 1,2 mg dm⁻³ Raij et al. (1996). A deficiência de boro na cultura da cana-de-açúcar provoca retardamento do crescimento da planta e morte de células apicais, reduzindo novas brotações e crescimento das raízes (Quintana, 2010). O zinco colabora no desenvolvimento e alongamento da planta quando jovem, já sua deficiência pode ocasionar redução do perfilhamento, gerando inclusive colmos mais finos (Teixeira Filho et al., 2013).

O cobre e o manganês, seguem a mesma tendência do zinco e do boro, sendo que na camada de 0-0,10 m possuem nesta ordem 0,47 e 15,03 mg dm⁻³, e na camada de 0,80-0,90 m respectivamente 0,23 e 4,0 mg dm⁻³. A deficiência de cobre e o manganês se relaciona com a diminuição da produção da cana-de-açúcar (Chaves & Farias, 2009). Os teores de cobre, estão em faixa considerada média de acordo com as recomendações propostas por van Raij et al. (1996), correspondente a 0,3 a 0,8 mg dm⁻³. A camada de 0-0,10 m está com nível maior que 1,2 mg dm⁻³, considerado alto por Raij et al. (1996), e as demais camadas estão na faixa considerada média, que vai de 0,6 a 1,2 mg dm⁻³. O manganês está na faixa considerada alta, acima de 12 mg dm⁻³.

O ferro destoa dos demais nutrientes, apresentando maiores teores na camada de 0,40-0,60 m, com 26,63 mg dm⁻³, e menores valores na camada de 0-0,10 m, com valor de 23,13 mg dm⁻³. O ferro nas quatro camadas avaliadas é considerado alto, correspondendo a faixa acima de 5,0 mg dm⁻³. A deficiência do elemento, pode causar redução da clorofila (Yamada & Castro, 2007), o que não é o caso devido aos teores avaliados.

Visando garantir bons valores de produtividade, a análise e aplicação de micronutrientes incorporada ao processo produtivo, faz-se necessária. Em estudo conduzido por Alvarez et al. (1979), parcelas com adição de micronutrientes, obtiveram valores mais altos de produtividade. Esta aplicação também visa corrigir falhas no manejo e correção do solo. A cana-de-açúcar absorve e exporta muitos nutrientes do solo durante seu ciclo (Rosetto, 2005).

4.2 ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DO SOLO

Observa-se que a análise dos valores médios dos atributos físicos do solo (Tabela 4) não apresentam variação estatística, com exceção do atributo de saturação efetiva. Esse resultado é devido ao período de coleta ter sido realizado na época de menor precipitação pluviométrica, conforme Figura 2. A densidade do solo encontrada de $1,43 \text{ g dm}^{-3}$, vinculada à variedade RB987935 e RB985476 é maior do que a vinculada a RB034045, de $1,41 \text{ g dm}^{-3}$. A porosidade total e a macroporosidade apresenta o maior valor na variedade RB985476, respectivamente de 0,48 e $0,22 \text{ g g}^{-1}$. A microporosidade, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, apresentam resultado constante em todo o perfil para as três variedades estudadas, sendo respectivamente 0,11, 0,26 e $0,15 \text{ g g}^{-1}$. A saturação efetiva, os poros bloqueados e o índice de vazios, apresentam maiores valores para a variedade RB985476, sendo de forma conseguinte 0,33, 0,13 e $0,92 \text{ g g}^{-1}$.

Tabela 4. Valores médios dos atributos físicos e hídricos do solo por variedade estudada.

Variedade	Atributos físicos e hídricos ⁽¹⁾										
	Ds (g dm^{-3})	PT	Ma	Mie	θ_s	θ_e	CC	PMP	PB	Ivaz	Ksg (mm h^{-1})
RB034045	1,41a	0,47a	0,21a	0,11a	0,36a	0,32a	0,26a	0,15a	0,11a	0,91a	64,75a
RB985476	1,43a	0,48a	0,22a	0,11a	0,35a	0,33a	0,26a	0,15a	0,13a	0,92a	40,29b
RB987935	1,43a	0,47a	0,21a	0,11a	0,35a	0,32a	0,26a	0,15a	0,12a	0,90a	34,21c
CV (%)	6,62	7,33	11,4	13,75	12,11	9,66	5,35	7,81	13,37	14,37	88,61

⁽¹⁾Ds, densidade do solo; PT, porosidade total; Ma, macroporosidade; Mi, microporosidade efetiva; θ_s , umidade de saturação; θ_e , saturação efetiva; CC, capacidade de campo; PMP, ponto de murcha permanente; PB, poros bloqueados; Ivaz, índice de vazios; Ksg, condutividade hidráulica saturada de campo. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Letras minúsculas iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

A condutividade hidráulica saturada de campo apresenta maior valor ($64,75 \text{ mm h}^{-1}$) para a variedade RB034045, e menor condutividade hidráulica ($34,21 \text{ mm h}^{-1}$) para a variedade RB987935 com. A maior condutividade hidráulica para a variedade RB034045 em relação às demais variedades avaliadas, acompanha também o menor valor de densidade do solo para essa variedade de cana-de-açúcar.

Conforme dados apresentados na Tabela 5, nota-se que há variação estatística apenas nos atributos de capacidade de campo e de poros bloqueados para as profundidades analisadas. Esses resultados permitem inferir que a área de estudo apresenta elevado grau de homogeneidade, propiciando uma condição similar de crescimento para as três variedades estudadas, dependendo assim, de fatores alheios aos estudados para seu melhor desenvolvimento.

Tabela 5. Valores médios dos atributos físicos e hídricos por variedade e por camada de solo.

Variedade	Atributos físicos e hídricos ⁽¹⁾									IVaz
	Ds	PT	Ma	Mie	θ_s	θ_e	CC	PMP	PB	
	(g dm ⁻³)			(g g ⁻¹)						
Camada 0-0,10 m										
RB034045	1,41aA	0,46Aa	0,21aA	0,10aA	0,35aA	0,31aA	0,255aA	0,16aA	0,11aA	0,88aA
RB985476	1,46aA	0,46Aa	0,21aA	0,10aA	0,33aA	0,32aA	0,244aAB	0,14aA	0,12aA	0,86aA
RB987935	1,48aA	0,45Aa	0,20aA	0,11aA	0,32aA	0,31aA	0,246aA	0,14aA	0,13aA	0,82aA
Camada 0,10-0,20 m										
RB034045	1,44aA	0,46aA	0,20aA	0,10aA	0,35aA	0,31aA	0,251aA	0,15aA	0,10bA	0,84aA
RB985476	1,52aA	0,45aA	0,21aA	0,09aA	0,31aA	0,31aA	0,237aB	0,14aA	0,14aA	0,82aA
RB987935	1,47aA	0,45aA	0,20aA	0,11aA	0,34aA	0,30aA	0,252aA	0,15aA	0,11aA	0,82aA
Camada 0,40-0,60 m										
RB034045	1,36aA	0,50aA	0,23aA	0,12aA	0,39aA	0,35aA	0,263aA	0,14aA	0,11aA	0,99aA
RB985476	1,38aA	0,50aA	0,23aA	0,11aA	0,36aA	0,35aA	0,267aAB	0,16aA	0,14aA	1,00aA
RB987935	1,38aA	0,49aA	0,22aA	0,12aA	0,36aA	0,34aA	0,271aA	0,16aA	0,13aA	0,97aA
Camada 0,80-0,90 m										
RB034045	1,42aA	0,48aA	0,20aA	0,12aA	0,35aA	0,32aA	0,279aA	0,16aA	0,13aA	0,93aA
RB985476	1,36aA	0,50aA	0,23aA	0,11aA	0,39aA	0,34aA	0,274aA	0,16aA	0,11aA	1,02aA
RB987935	1,41aA	0,49aA	0,22aA	0,12aA	0,36aA	0,34aA	0,267aA	0,15aA	0,13aA	0,99aA

⁽¹⁾Ds, densidade do solo; PT, porosidade total; Ma, macroporosidade; Mi, microporosidade efetiva; θ_s , umidade de saturação; θ_e , saturação efetiva; CC, capacidade de campo; PMP, ponto de murcha permanente; PB, poros bloqueados; Ivaz, índice de vazios. Letras minúsculas diferentes em coluna dentro da camada e letras maiúsculas diferentes em coluna entre camadas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0.05$).

O maior valor de capacidade de campo foi encontrado na camada de 0,80-0,90, com 0,279 g g⁻¹, e o menor valor na camada 0,10-0,20 m com 0,237 g g⁻¹. O menor valor, de 0,10 g g⁻¹ de poros bloqueados, foi encontrado na camada de 0,10-0,20 m e o maior valor de 0,14 g g⁻¹ foi encontrado na camada de 0,80-0,90 m.

Segundo Santos et al. (2013), o volume de vazios corresponde aproximadamente ao dobro da quantidade de sólidos do solo, sendo assim, é possível observar que em camadas mais profundas (0,40-0,60 e 0,80-0,90 m), os valores de índice de vazios são maiores que em camadas de superfície (0-0,10 e 0,10-0,20 m). Portanto, é possível inferir que o volume de sólidos nestas camadas mais profundas é maior do que nas camadas de superfície. A distribuição de poros no solo é afetada pela compactação, causada sobretudo pela pressão mecânica exercida pelo tráfego de maquinários, como resultante de forma imediata, constata-se a diminuição da porosidade total, com redução dos macroporos e aumento dos microporos (Borges et al., 1999).

Os resultados de ponto de murcha permanente encontrados neste presente trabalho, não apresentaram diferenças estatísticas e foram semelhantes aos encontrados por Amaro Filho et al. (2007) em LATOSSOLO VERMELHO. Quando analisada a capacidade de campo em função das variedades e profundidades, apenas a camada mais profunda (0,80-0,90 m), não apresenta diferença estatísticas, sendo que tem maiores valores de capacidade de campo em relação aos da superfície, ou seja, as camadas mais profundas têm uma capacidade maior de retenção de água do que as mais rasas. Isto ocorre, pois na camada de 0,80-0,90 m, os teores de argila são maiores que das camadas superiores. Segundo Andrade & Stone (2011), existe relação de aumento da capacidade de campo (CC) de acordo com a granulometria, sendo assim, solos arenosos apresentam menor CC em relação a solos argilosos.

A Figura 14 contém os resultados da curva de retenção de água do solo referente a variedade RB034045. Conforme Figura 14a, no potencial matricial de -1 hPa o conteúdo de água no solo é de 0,33 g g⁻¹, e no potencial matricial de -15.198,75 hPa é de 0,12 g g⁻¹. Na Figura 14b, o conteúdo de água no potencial matricial de -1 e -15.198,75 hPa, são respectivamente 0,31 e 0,12 g g⁻¹. A figura 14c ilustra a camada de 0,40-0,60 m, e o conteúdo de água no solo nos potenciais matriciais de -1 e -15.198,75 hPa, são respectivamente 0,36 e 0,14 g g⁻¹. Na profundidade de 0,80-0,90 m (figura 14d), percebe-se que o conteúdo de água no solo é de 0,39 g g⁻¹ no potencial matricial de -1 hPa. Já no potencial matricial de -15.198,75 hPa, essa diferença é acentuada em relação às outras camadas, com aproximadamente 0,18 g g⁻¹ de água no solo. A camada mais profunda (0,80-0,90 m), apresenta os maiores conteúdos de água no solo em comparação com as camadas superiores. Foi verificado que o conteúdo de água no solo nas quatro camadas analisadas, reduziram em concomitância ao aumento das tensões analisadas, conforme Beutler et al. (2002). A tendência de aumento de conteúdo água no solo conforme a profundidade da camada analisada, é corroborada pela maior quantidade de argila identificada, e com aumento da microporosidade do solo de acordo com a profundidade analisada (Schreiner et al., 2010; Carducci et al., 2011).

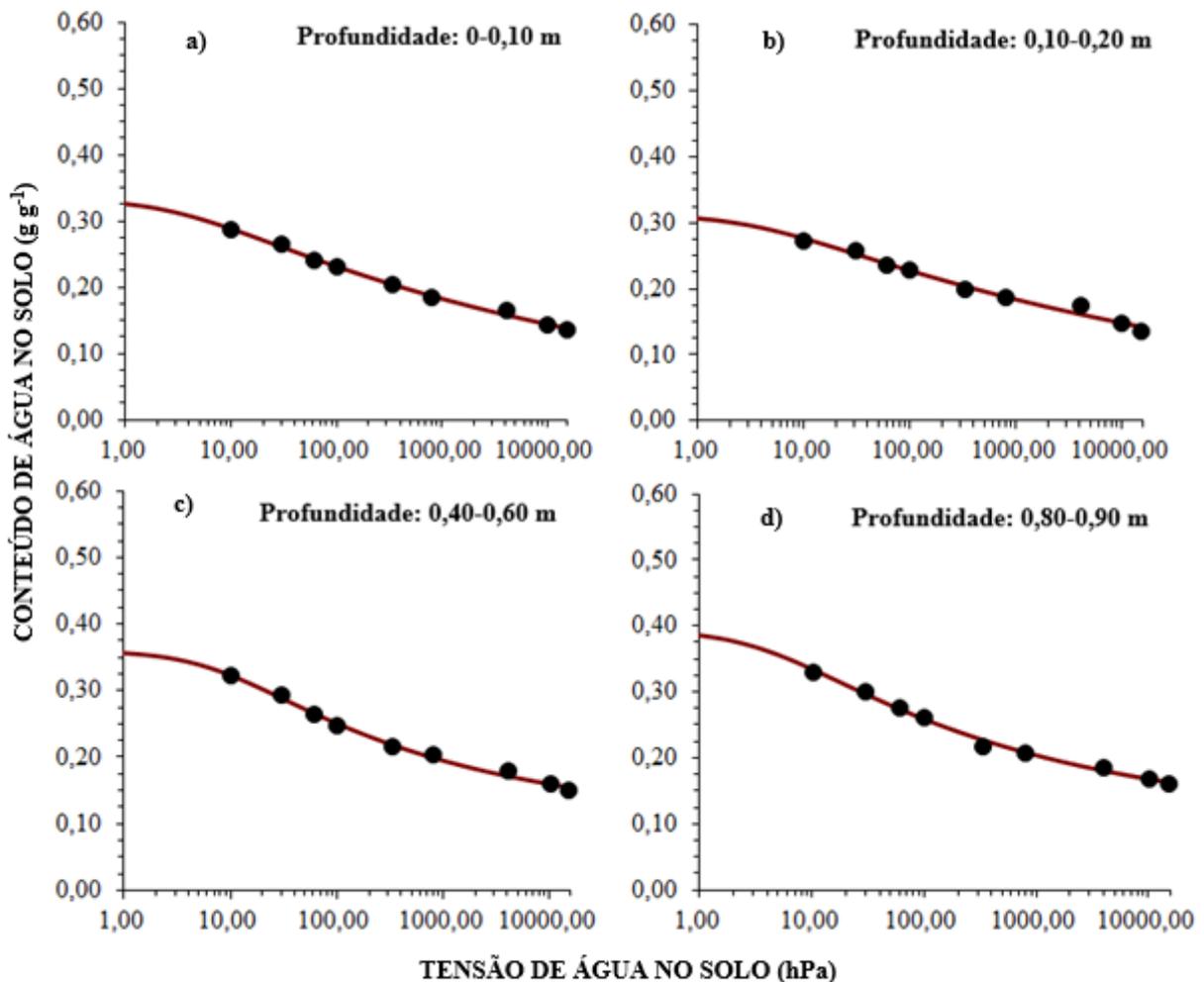


Figura 14. Curva de retenção de água do solo da variedade RB034045. a) camada 0-0,10 m; b) camada 0,10-0,20 m; c) camada 0,40-0,60 m; d) camada 0,60-0,80 m.

A Figura 15 apresenta os dados da curva de retenção de água no solo da variedade RB985476. Na Figura 15a, o conteúdo de água no solo nos potenciais matriciais de -1 e -15.198,75 hPa são respectivamente, 0,35 e 0,14 g g⁻¹. Na Figura 15b, é demonstrado o conteúdo de água de 0,34 g g⁻¹ no potencial matricial de -1 hPa, e aproximadamente 0,13 g g⁻¹ no potencial matricial de -15.198,75 hPa. A profundidade de 0,40-0,60 m, apresenta na Figura 15c, aproximadamente 0,38 g g⁻¹ no potencial matricial de -1 hPa e no potencial matricial de -15.198,75 hPa, o conteúdo de água no solo aproximado é de 0,15 g g⁻¹. A camada de 0,80-0,90 (Figura 15d), apresenta conteúdo de água no solo nos potenciais matriciais de -1 e -15.198,75 hPa de respectivamente, 0,35 e 0,16 g g⁻¹. No potencial matricial de 1 hPa, a camada que apresentou maior conteúdo de água foi de 0,40-0,60 e no ponto matricial de -15.198,75 foi na camada de 0,80-0,90. Conforme Tabela 5, os dados de densidade do solo nas camadas

superiores à de 0,80-0,90 m, apresentam maiores valores, este fator implica em menor capacidade de retenção de água no solo, conforme Tormena et al. (2007).

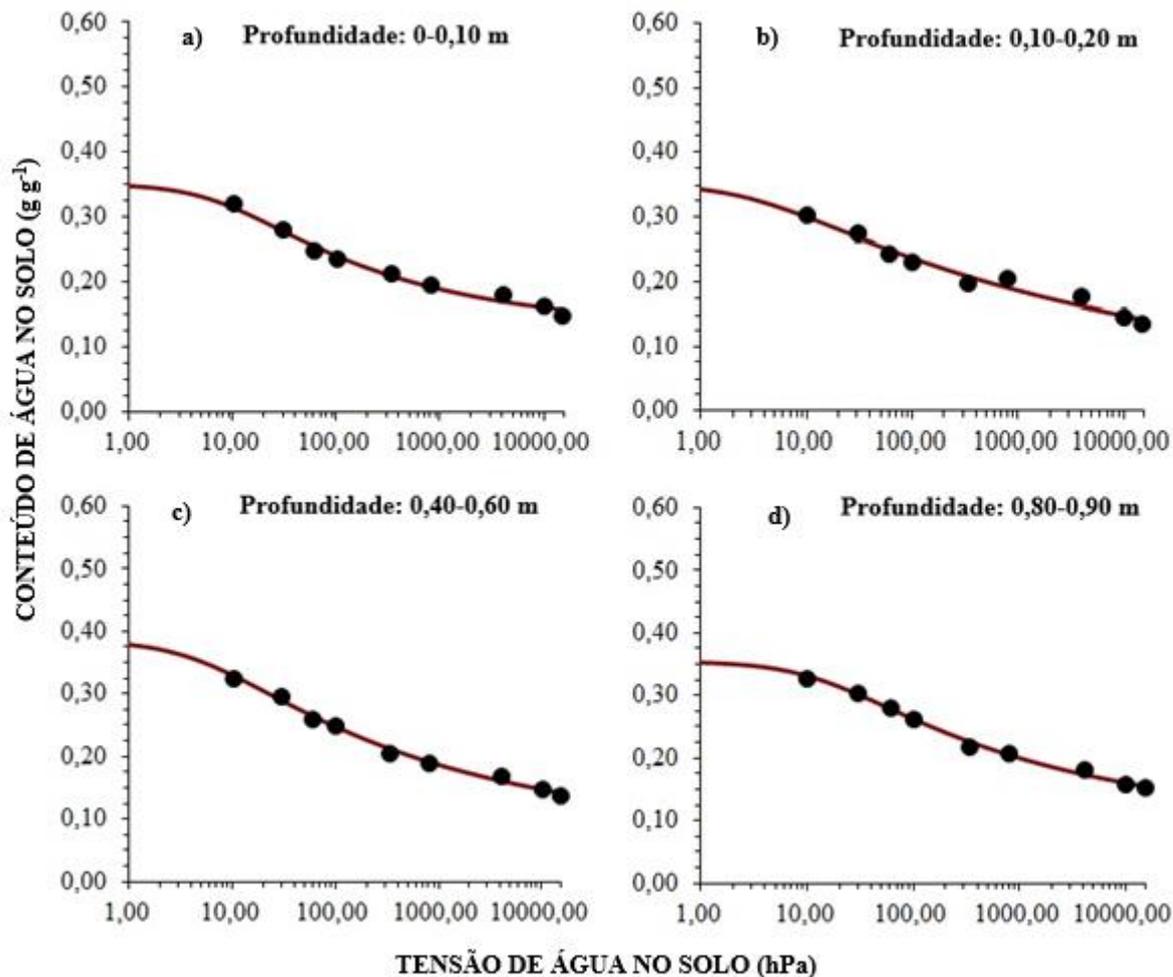


Figura 15. Curva de retenção de água do solo da variedade RB985476. a) camada 0-0,10 m; b) camada 0,10-0,20 m; c) camada 0,40-0,60 m; d) camada 0,60-0,80 m.

A Figura 16, apresenta os dados da curva de retenção da variedade RB987935. A Figura 16a ilustra o conteúdo de água no solo de acordo com os potenciais matriciais de -1 e -15.198,75 hPa, que são respectivamente 0,32 e 0,12 g g⁻¹. Na Figura 16b, o conteúdo de água no solo conforme potenciais matriciais de -1 e -15.198,75 hPa, são respectivamente 0,33 e 0,13 g g⁻¹. A camada de 0,40-0,60 m (Figura 16c) possui aproximadamente 0,36 g g⁻¹ no potencial matricial de -1 hPa, já no potencial matricial de -15.198,75 hPa, o conteúdo de água no solo aproximado é de 0,17 g g⁻¹. Na Figura 16d, o conteúdo de água no potencial matricial de -1 hPa é de 0,36 g g⁻¹, e no potencial matricial -15.198,75 hPa é de 0,16 g g⁻¹. A camada com menor conteúdo de água no solo é a de 0-0,10 m, com aproximadamente 0,31 g g⁻¹ no potencial matricial de -1 hPa e 0,12 g g⁻¹ no potencial matricial de -15.198,75 hPa. A camada que

apresentou maior conteúdo de água foi a 0,40-0,60 m. Conforme Tabela 5, a camada de 0,40-0,60 m apresentou maior capacidade de campo em relação às demais. Este atributo, avalia o limite superior de umidade que determinado solo apresenta, este demonstra relação positiva com a retenção de água no solo (Dalmago et al. 2009; Andrade & Stone, 2011).

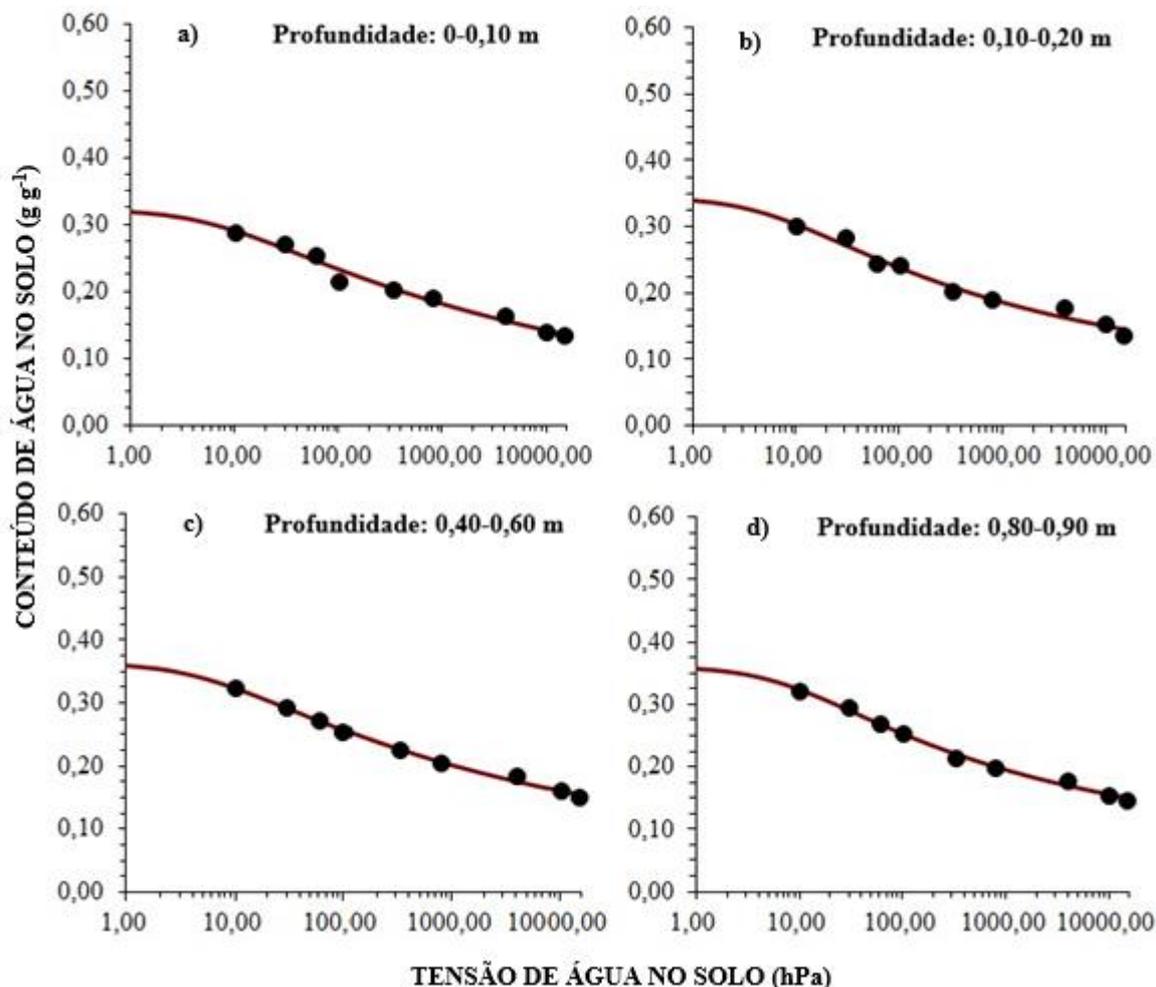


Figura 16. Curva de retenção de água do solo da variedade RB987935. a) camada 0-0,10 m; b) camada 0,10-0,20 m; c) camada 0,40-0,60 m; d) camada 0,60-0,80 m.

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos na análise da distribuição das classes de agregados do solo e do diâmetro médio ponderado via úmida (DMP), apresentando diferenças significativas entre as diferentes camadas de solo avaliadas. A classe Ag1 apresenta a maior porcentagem dos agregados, acima de 46% em todas as camadas, sendo que na camada de 0,10-0,20 m, mais de 54% dos agregados são maiores que 2 mm. A camada de 0-0,10 m, para a classe Ag2, possui a maior porcentagem de agregados proporcionais às outras camadas estudadas, com mais de 16%, e a camada de 0,80-0,90 m possui a menor porcentagem, com 11,65% de agregados dessa classe.

Tabela 6. Distribuição dos valores médios de diâmetro médio ponderado por via úmida das variedades estudadas nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20, 0,40-0,60, 0,80-0,90 m. espaço simples.

Camada (m)	Classe de tamanho dos agregados (mm)						DMP ⁽¹⁾
	Ag1	Ag2	Ag3	Ag4	Ag5	Ag6	
0-0,10	46,22a	16,37a	14,86a	11,53b	6,46b	4,57b	1,57b
0,10-0,20	54,21a	13,41b	13,26b	9,70b	4,98b	4,45b	1,70a
0,40-0,60	50,23a	14,22b	12,57b	10,61b	6,74b	5,63b	1,62b
0,80-0,90	46,00a	11,65b	10,19b	13,56a	10,24a	8,35a	1,47b

⁽¹⁾Ag1, agregados maiores que 2,00 mm; Ag2, agregados entre 1,00 e 2,00 mm; Ag3, agregados entre 0,50 e 1,00 mm; Ag4, agregados entre 0,25 e 0,50; Ag5, agregados entre 0,105 e 0,25 mm; e Ag6, agregados menores que 0,105 mm; DMP, diâmetro médio ponderado. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Letras minúsculas iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Na classe Ag3, a camada de 0-0,10 m se destaca assim como na Ag2, possuindo 14,86% dos agregados, e a classe com a menor quantidade é a de 0,80-0,90 m, com 10,19%. Ao inverso da tendência das classes Ag2 e Ag3, a classe Ag4 mostra que a camada de 0-80-0,90 m apresenta os maiores valores percentuais, com 13,56% e a camada de 0,10-0,20 m o menor valor, com 9,70%. A camada Ag5 segue a mesma tendência da camada Ag4, com a camada de 0,80-0,90 m, com o maior percentual (10,24%), e a camada 0,10-0,20 m o menor percentual (4,98%). A classe Ag6, seguindo a tendência da Ag4 e Ag5, também apresenta o maior porcentual na camada de 0,80-0,90, com 8,35% e o menor percentual na camada de 0,10-0,20 m, com 4,45%. O valor de DMP mais alto está na camada de 0,10-0,20 m, com 1,70 mm, e o mais baixo na camada de 0,80-0,90 m com 1,47 mm.

A camada de 0-0,10 m, apresentou menor porcentagem na classe Ag1, em relação às camadas intermediárias (0,10-0,20 e 0,40-0,60), isto pode ser atribuído ao preparo e revolvimento do solo na área, que causa instabilidade de agregados (Silva et al., 2000). De acordo com os dados da camada 0,10-0,20 e 0,40-0,60 m, é possível notar que ambas possuem maior DMP e percentual de agregados na classe Ag1, resultados semelhantes em Latossolo Vermelho com cultivo de cana-de-açúcar, foram encontrados por (Souza et al., 2005), conferindo maior estabilidade de agregados (Salton et al. 2008).

A sequência de resultados da análise quantitativa de agregados que passaram pela peneira de 0,105 cm, corrobora com os teores de carbono orgânico expostos na Tabela 3, as camadas quanto mais se aprofundam, seguem uma tendência de menor estabilidade. Conforme Lima et al. (2003), o carbono orgânico contribui com a estabilidade dos agregados e para a melhoria da qualidade física do solo, cooperando para melhoria da porosidade, possibilitando

assim, uma maior infiltração e evitando perdas de solo via erosão hídrica (Assis & Bahia, 1998; Matos et al., 2008).

Em trabalho, por Rosetti et al. (2014), a disposição dos agregados na cana-de-açúcar de um ano, seguiu a tendência da disposição dos agregados deste presente trabalho, com presença maciça na peneira maior de 2 mm, acima de 45% para todas as variedades e diminuindo a relação até a última peneira, que vai de 4 a 8% de agregados. A relação existente entre a matéria orgânica e o DMP, contribui para a cimentação e a estabilização dos agregados, conforme Angers (1992), e corroborado por Ceddia et al. (1999).

A Figura 17 ilustra a relação da resistência à penetração e a umidade. O valor mais baixo de umidade gravimétrica apresentado é de 19,22% na camada de 0,40-0,60 m, e o mais alto é de 19,28% na camada de 0-0,10 m. A variedade com maior valor de umidade é a RB987935, com 19,30%. O valor de resistência à penetração mais alto é da camada de 0,40-0,60 m, com aproximadamente 13 MPa, e o valor mais baixo na camada de 0-0,10 m, com 8 MPa. Para as variedades estudadas, a que encontra maior impedimento de resistência à penetração é a variedade RB987935, com 14 MPa e o valor mais baixo é da variedade RB985476 com 6,5 MPa aproximadamente.

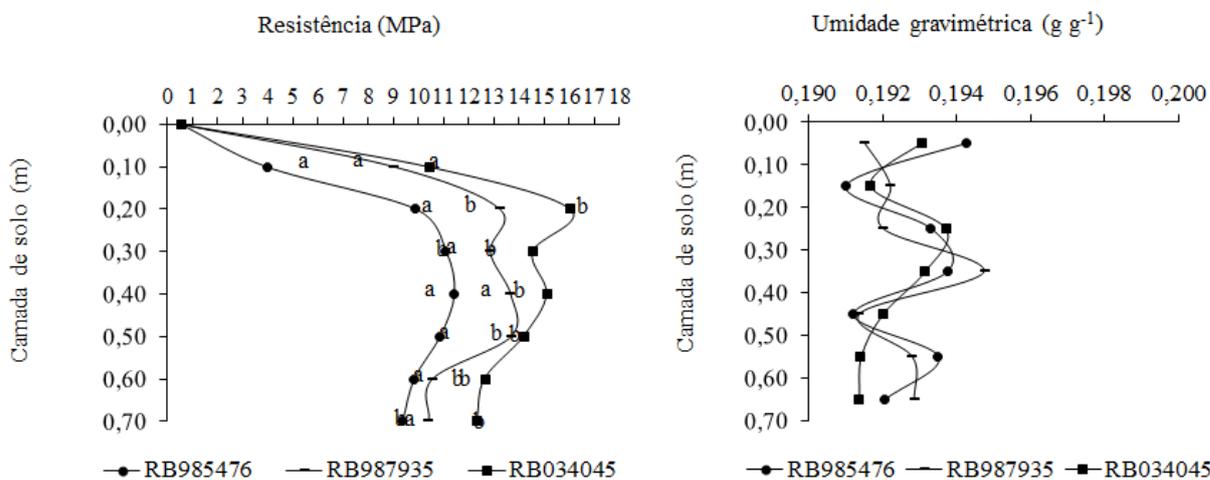


Figura 17. Médias de resistência à penetração e umidade do solo em função das variedades e camadas do solo. Letras minúsculas iguais em profundidade para a mesma variedade não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Comparando as condições extremas de desenvolvimento radicular da variedade RB985476 e da RB987935, a primeira apresenta valor aproximado de 6 MPa, e a segunda cerca de 14 MPa, ou seja, o valor corresponde a mais que o dobro. Cabe ressaltar aqui, que as medidas de resistência à penetração do solo foram realizadas no mês de Setembro do ano de 2019, período compreendido para região, como um dos mais secos do ano (Figura 2), podendo

superestimar os valores da análise. Segundo Sene et al. (1985), para solos franco-argilosos, os níveis críticos de resistência à penetração para desenvolvimento de plantas são superiores a 2,5 MPa, valor que é superado em todas as camadas do perfil do solo, sobretudo 0,10-0,20 m. A camada de 0,40-0,60 m, se destaca por ter os maiores valores médios de resistência à penetração em relação aos de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

Segundo Rosolem et al. (1999), a resistência à penetração é resultante de forças oriundas da compactação, que é definida pela densidade do solo, do teor de água e da granulometria do solo. Estas são análises se relacionam para não sub ou superestimar o Estado de compactação do solo. Para tanto, Tormena et al. (2002) afirmaram que mesmo em condições de alta resistência a penetração, solos úmidos não apresentam impedimento para o desenvolvimento radicular, diferentemente, porém com o secamento do solo, os níveis se tornam altamente impeditivos.

Conforme testes de condutividade hidráulica saturada de campo, expostos na Tabela 4, é denotado que a água tem dificuldade em infiltrar no solo. Isto se deve, principalmente, pela alta resistência à penetração, e densidade do solo, sobretudo na camada de 0,10-0,20 m. A camada de 0-0,10 m apresenta valores menores de resistência à penetração (Pr) devido às práticas mecânicas executadas na área, com subsolagem e grade niveladora, e também a palhada incorporada ao solo (Souza et al., 2005; Satiro et al., 2017).

4.3 ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO RADICULAR

A Tabela 8 contém os atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada. A variedade que apresentou melhor desempenho de desenvolvimento radicular foi a RB034045, o que corrobora com a Tabela 1, referente a produtividade das variedades. A variedade RB034045, nos três períodos de análise, apresenta maiores valores de crescimento médio mensal, com 55,34, 107,13 e 220,25 cm, respectivamente. A variedade que apresentou menores valores de crescimento médio mensal foi a RB987935, com respectivamente 28,18, 55,11 e 175,69 cm. A variedade que apresentou maiores valores de comprimento, área e volume médio total foi a RB034045, com respectivamente 127,57 cm, 343,56 cm² e 310,90 cm³. A variedade RB987935 apresentou os menores valores de comprimento, área e volume médio total, com respectivamente 86,33 cm, 157,34 cm² e 156,51 cm³. A variedade com maior diâmetro médio total foi a RB985476 com 1,17 mm, e a com menor valor foi a RB034045 com 0,81 mm.

Tabela 7. Valores médios do atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada.

127,57	Comprimento médio mensal (cm)			Comprimento médio total (cm)	Área média total (cm ²)	Volume médio total (cm ³)	Diâmetro médio total (mm)
	Novembro	Fevereiro	Junho				
RB034045	55,34a	107,13a	220,25a	127,57a	343,56a	310,90a	0,81c
RB985476	49,44b	66,95b	194,18b	103,52b	158,74b	168,57b	1,17a
RB987935	28,18bc	55,11c	175,69c	86,33c	157,34c	156,51c	0,86b

⁽¹⁾ Letras iguais minúsculas na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (p <0,05).

A Tabela 9 mostra os resultados do crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das três variedades de cana-de-açúcar estudadas (RB985476, RB987935 e RB034045) no mês de Novembro de 2019, para as camadas variando entre 0-60 cm de profundidade. Todos os resultados apresentaram diferenças estatísticas entre si, demonstrando que as variedades se desenvolveram de forma distinta, para condições climáticas, de solo e de manejo similares. Nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, o maior valor do comprimento total de raízes é o da variedade RB034045, com 97,67 cm e 61,67 cm respectivamente, e o menor da variedade RB987935, com 50,00 cm e 24,07 cm. Na camada de 40-60 cm, o maior comprimento total de raízes foi identificado na variedade RB985476, com 27 cm, e o menor na variedade RB034045, com 6,67 cm.

Tabela 8. Valores médios do atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada, em diferentes profundidades para o mês de Novembro de 2019.

Variedade	Camada (cm)	Comprimento total de raízes (cm)	Área total de raízes (cm ²)	Volume total de raízes (mm ³)	Diâmetro médio das raízes (mm)
RB034045	0-20	97,67a	277,67a	350,00a	0,40b
RB985476		77,00b	133,33b	201,83b	0,57a
RB987935		50,00c	85,33c	118,63c	0,40b
RB034045	20-40	61,67a	37,67a	36,50a	0,43c
RB985476		44,33b	23,67b	35,63b	1,07a
RB987935		24,07c	20,33c	10,67c	0,63b
RB034045	40-60	6,67c	6,00c	1,37c	0,37c
RB985476		27,00a	19,33a	7,17a	0,80a
RB987935		10,47b	16,80b	3,13b	0,70b

⁽¹⁾ Letras iguais minúsculas na mesma coluna e na mesma camada avaliada, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (p <0,05).

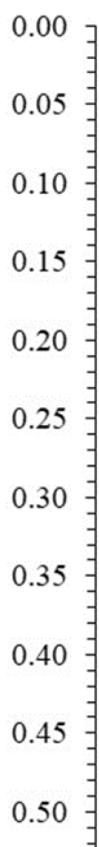
Os valores analisados da área total de raízes para esta avaliação, seguiram a tendência do comprimento total de raízes, e demonstraram que a variedade RB034045 possui maior área total de raízes, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, com 277,67 e 37,67 cm². A menor área total de raízes na camada 0-20 e 20-40 cm, foi observada na variedade RB987935, com 85,33 e 20,33 cm². O maior valor de área total de raízes na camada de 40-60 cm, está associado à variedade RB985476, com 19,33 cm² e o menor valor à variedade RB034045, com 6 cm².

O maior volume total de raízes na camada de 0-20 cm foi da variedade RB034045, com 350 mm³ e o menor da variedade RB987935 com 118,63 mm³. Já na camada de 20-40 cm, o maior volume total de raízes foi detectado na variedade RB034045, com 36,50 mm³ e o menor na variedade RB987935, com 10,67 mm³. O volume total de raízes com maior valor apresentado na camada de 40-60 cm, foi detectado na variedade RB985476, com 7,17 mm³ e o menor volume detectado na variedade RB034045, com 1,37 mm³.

O maior diâmetro médio observado em todas as camadas foi da variedade RB985476, com respectivamente 0,57, 1,07 e 0,80 mm. Já na camada de 20-40 e 40-60 cm, o menor diâmetro médio de raízes foi encontrado na variedade RB034045, com valor de 0,43 e 0,37 mm. As Figuras 18, 19 e 20 ilustram o desenvolvimento radicular das três variedades no mês de Novembro.



Figura 18. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Novembro de 2019. a) Planta 1 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 1 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 1 (repetição) da variedade RB987935.



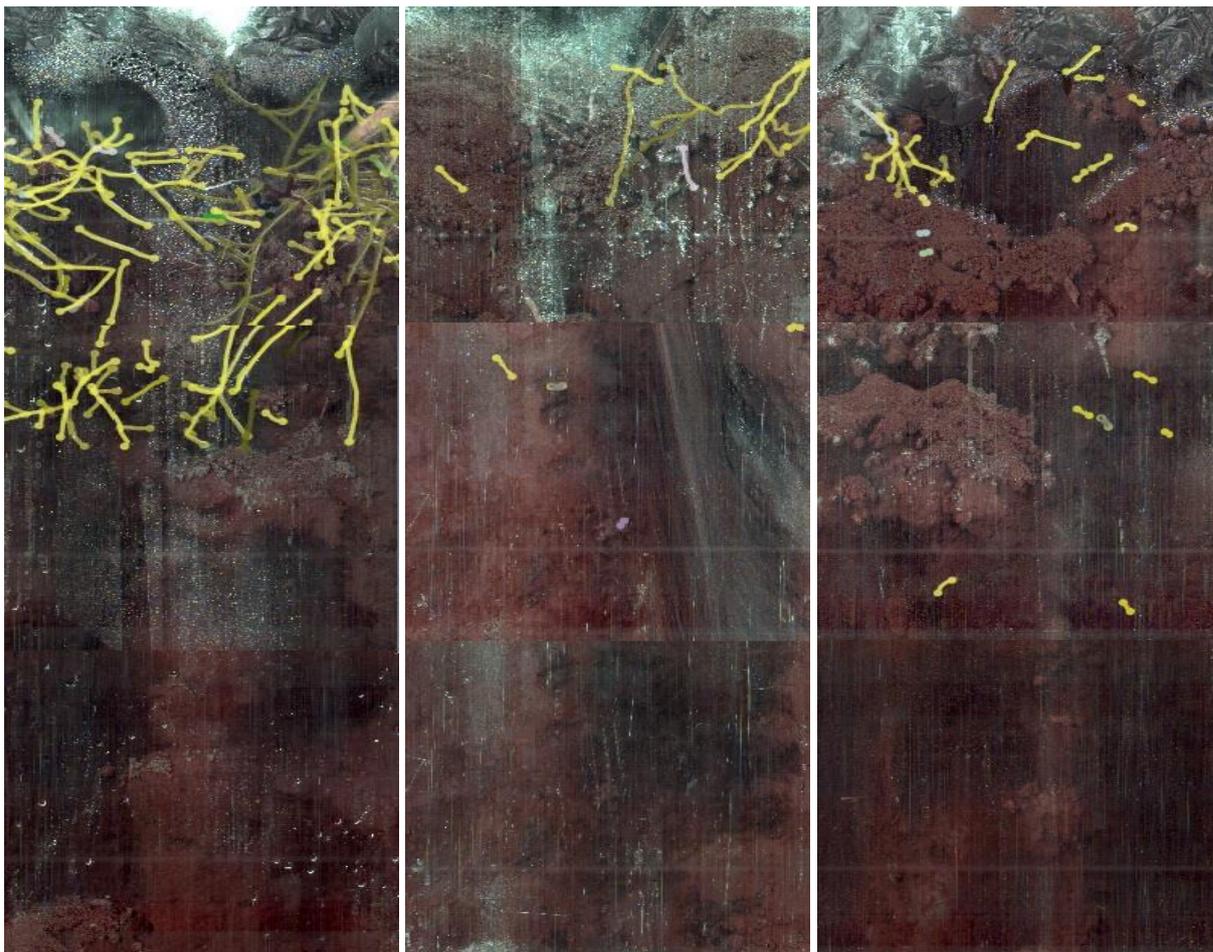


Figura 19. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Novembro de 2019. a) Planta 2 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 2 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 2 (repetição) da variedade RB987935.

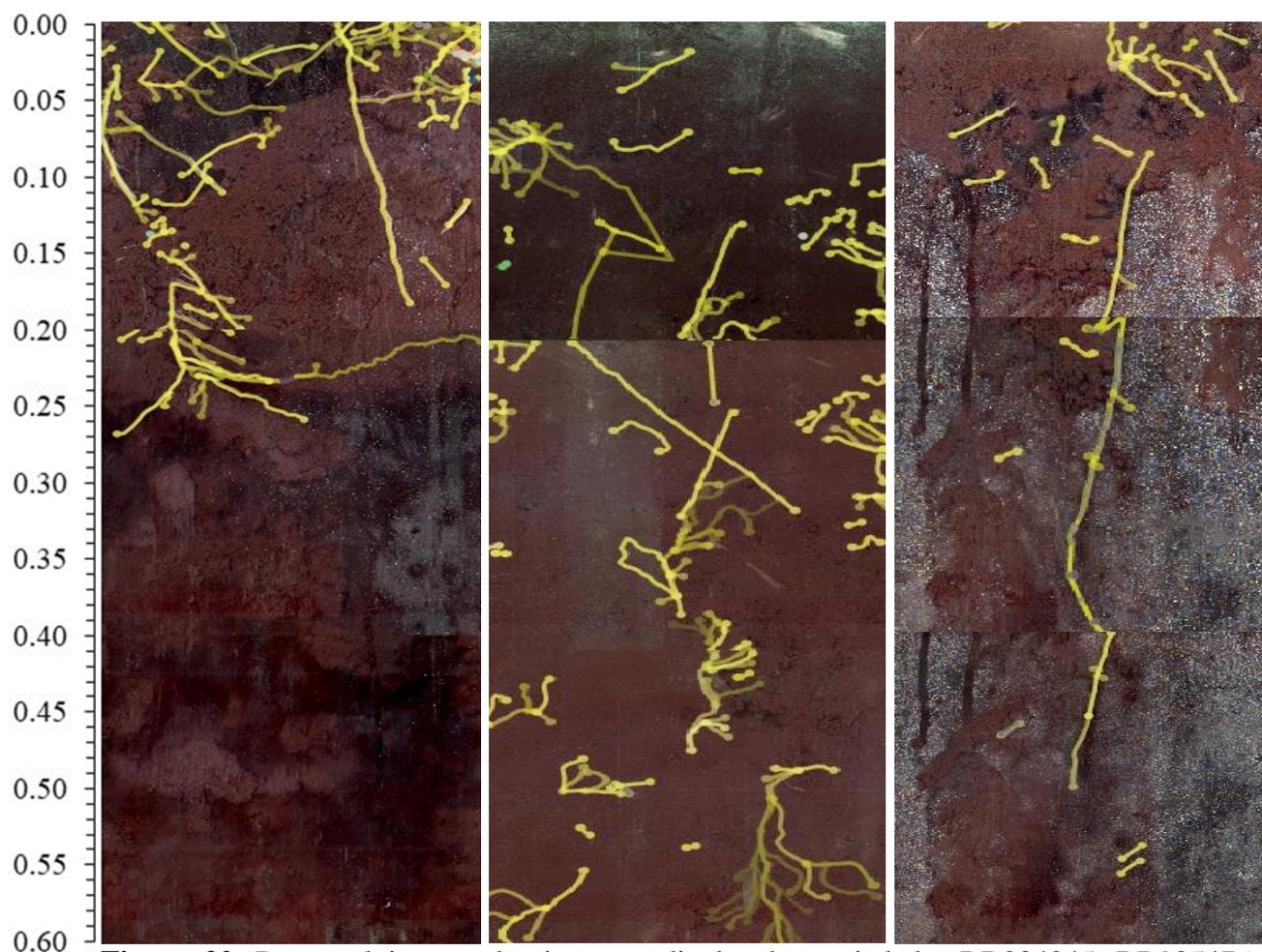


Figura 20. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Novembro de 2019. a) Planta 3 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 3 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 3 (repetição) da variedade RB987935.

A Tabela 10 mostra os resultados do crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das três variedades de cana-de-açúcar estudadas (RB985476, RB987935 e RB034045) da segunda avaliação, no mês de Fevereiro de 2020, para as camadas variando entre 0-60 cm de profundidade. De forma similar à primeira avaliação, todos os atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada, em diferentes profundidades apresentaram diferenças estatísticas. Na camada de 0-20 cm, a variedade RB034045 apresentou maior valor de comprimento total de raízes, com 179,67 cm e o menor comprimento total foi observado na variedade RB987935, com 91,33 cm. Nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, os maiores valores de comprimento total de raízes foram observados na variedade RB034045 (84,38 e 57,33 cm, respectivamente), sendo os resultados menos expressivos encontrados nessas mesmas profundidades da variedade RB987935 (51,00 e 23,00 cm, na ordem apresentada).

Tabela 9. Valores médios dos atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada, em diferentes profundidades para o mês de Fevereiro de 2020.

Variedade	Camada (cm)	Comprimento total de raízes (cm)	Área total de raízes (cm ²)	Volume total de raízes (mm ³)	Diâmetro médio das raízes (mm)
RB034045	0-20	179,67a	451,33a	353,53a	0,97b
RB985476		102,67b	313,67b	269,87b	1,27a
RB987935		91,33c	306,33c	166,67c	0,80c
RB034045	20-40	84,38a	206,33a	240,50a	0,73c
RB985476		66,67b	154,33b	123,03b	1,20a
RB987935		51,00c	131,67c	90,33c	0,87b
RB034045	40-60	57,33a	53,00a	20,23a	1,07a
RB985476		31,51b	27,67b	13,00b	0,97c
RB987935		23,00c	17,00c	10,83c	1,00b

⁽¹⁾ Letras iguais minúsculas na mesma coluna e na mesma camada avaliada, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

A variedade RB034045 apresentou a área total de raízes com maior valor em todas as camadas com respectivamente 451,33, 206,33 e 53,00 cm². O menor valor encontrado nas três camadas, foi da variedade RB987935, com 306,33, 131,67 e 17,00 cm². O volume total de raízes analisado apresentou o maior valor nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, referentes a variedade RB034045, com respectivamente 353,53, 240,50 e 20,23 mm³. Os menores valores foram observados na variedade RB987935 com respectivamente 166,67, 90,33 e 10,83 mm³.

O diâmetro médio de raízes nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, na variedade RB985476 apresentou maiores valores em relação aos demais, com 1,27 e 1,20 mm. O menor valor na camada de 0-20 cm, foi observado na variedade RB987935, com 0,80 mm, já na camada de 20-40 cm, foi observado na variedade RB034045 com 0,73 mm. O maior diâmetro na camada mais profunda (40-60 cm), foi encontrado na variedade RB034045 com 1,07 mm e o menor na variedade RB985476 com 0,97 mm. As Figuras 21, 22 e 23 são resultado do imageamento e análise das raízes das três variedades, no mês de Fevereiro de 2020, nas camadas de 0 a 60 cm.

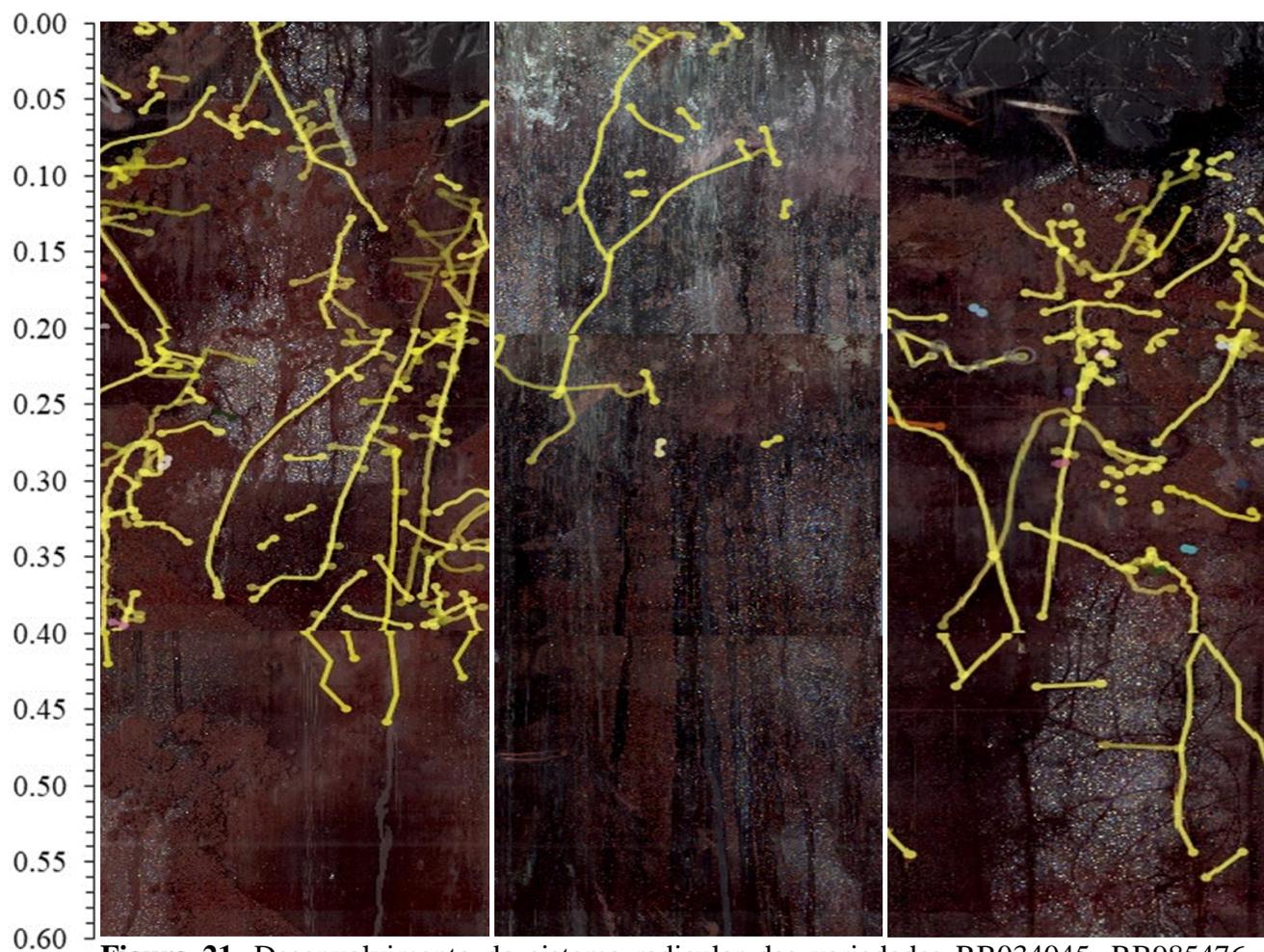


Figura 21. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Fevereiro de 2020. a) Planta 1 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 1 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 1 (repetição) da variedade RB987935.

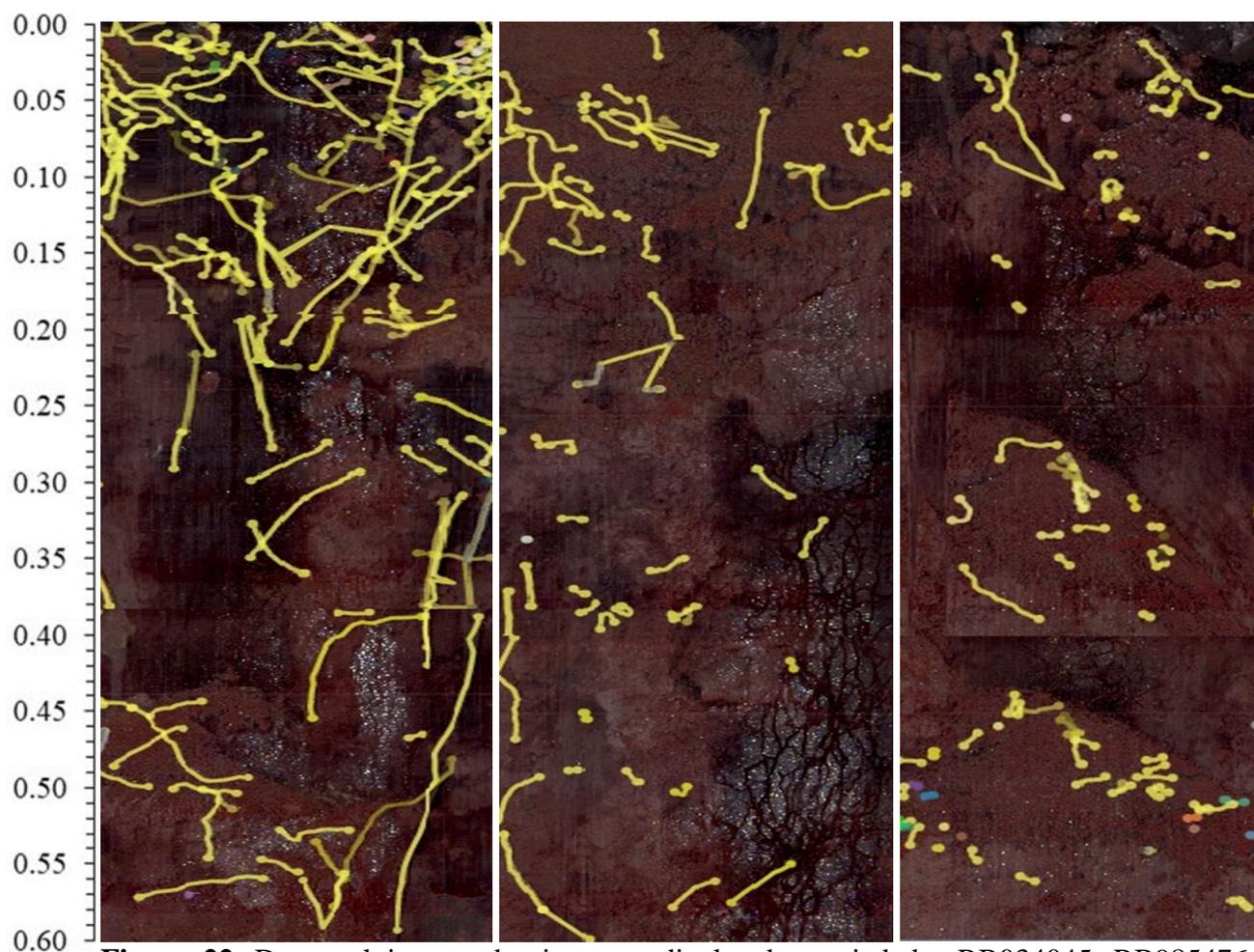


Figura 22. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Fevereiro de 2020. a) Planta 2 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 2 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 2 (repetição) da variedade RB987935.

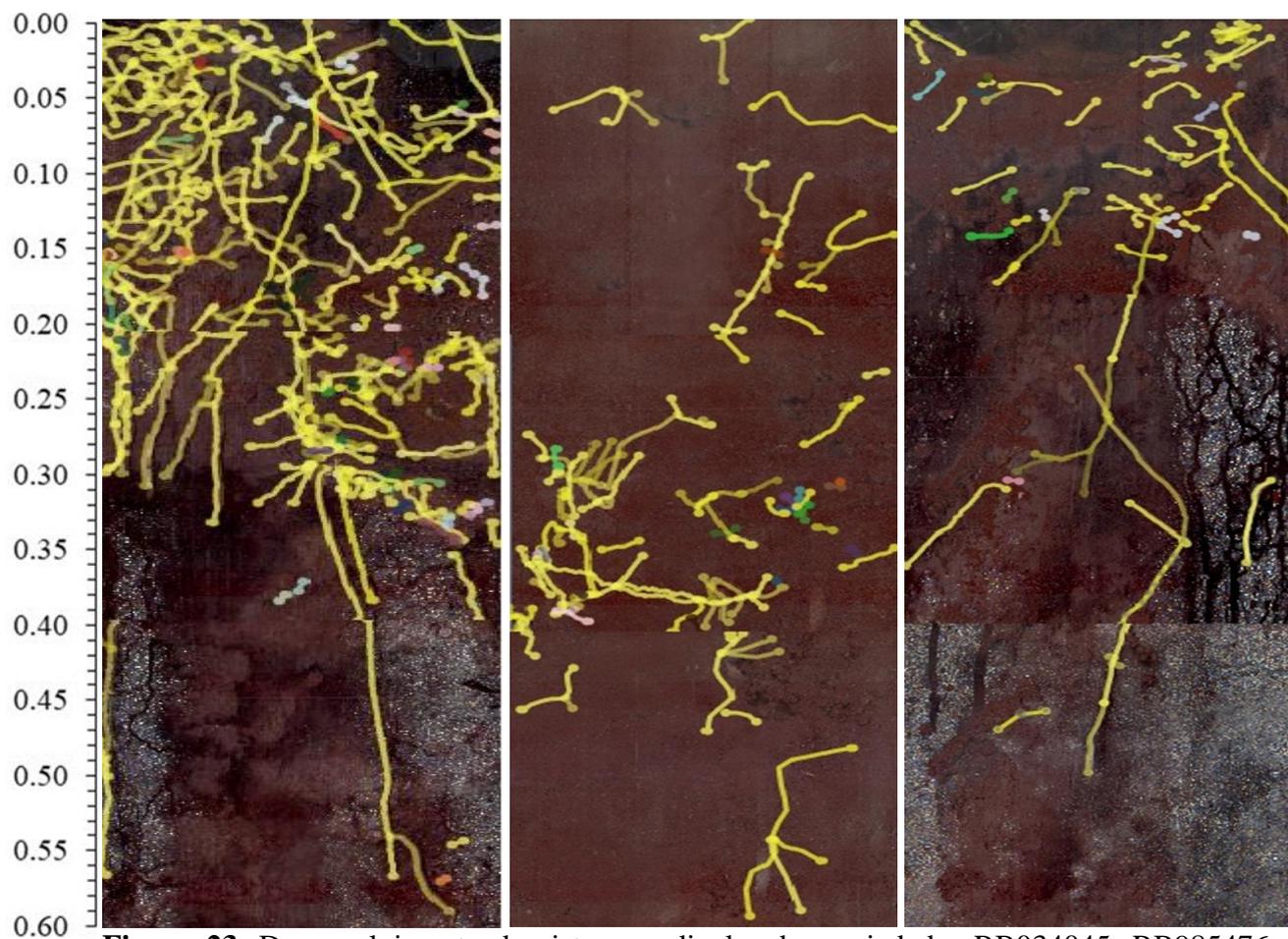


Figura 23. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Fevereiro de 2020. a) Planta 3 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 3 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 3 (repetição) da variedade RB987935.

A Tabela 11 e as Figuras 24, 25 e 26 mostram os resultados do crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das três variedades de cana-de-açúcar estudadas (RB985476, RB987935 e RB034045) da terceira avaliação, realizada no mês de Junho de 2020. Observou-se que como nos meses de Novembro de 2019 e Fevereiro de 2020, a variedade RB034045 apresentou maiores valores de comprimento total de raízes em todas as camadas, sendo respectivamente, 339,00, 215,08 e 107,67 cm. Os menores valores de comprimento total de raízes da camada de 0-20 cm foram observados na variedade RB985476 com 289,53 cm, e na camada de 20-40 m de profundidade na variedade RB987935, com valor de 114 cm. O menor valor desse atributo foi observado na camada de 40-60 cm de profundidade na variedade RB987935 (83,40 cm).

Tabela 10. Valores médios dos atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar analisados por variedade estudada, em diferentes profundidades para o mês de junho de 2020.

Variedade	Camada (cm)	Comprimento total de raízes (cm)	Área total de raízes (cm ²)	Volume total de raízes (mm ³)	Diâmetro médio das raízes (mm)
RB034045	0-20	339,00a	1587,00a	1191,17a	1,07b
RB985476		289,53c	353,67c	443,67c	1,93a
RB987935		329,67b	618,33b	765,67b	1,00c
RB034045	20-40	215,08a	259,00a	407,33a	0,77c
RB985476		203,67b	225,67b	332,37b	1,30a
RB987935		114,00c	195,93c	203,70c	1,00b
RB034045	40-60	106,67a	214,00a	197,50a	1,50a
RB985476		89,33b	177,34b	90,57b	1,41b
RB987935		83,40c	24,33c	38,93c	1,30c

⁽¹⁾ Letras iguais minúsculas na mesma coluna e na mesma camada avaliada, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Em todo perfil de análise, foi observado que os maiores valores de área total de raízes se associam a variedade RB034045, sendo respectivamente 1587,00, 259 e 214 cm². O menor valor nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, foram na variedade RB985476 com 353,67 cm² e RB987935 com 195,93 cm². Na camada de 40-60 cm, o menor valor foi de 24,33 cm², da variedade RB987935.

Assim como na área, o maior volume total de raízes em todas as camadas é da variedade RB034045 com respectivamente 1191,17, 407,33 e 197,50 mm³. O menor valor encontrado na camada de 0-20 cm foi da variedade RB985476 com 443,67. Na camada de 20-40 cm o menor valor observado é da variedade RB987935 com 203,70 mm³. Na camada de 40-60 cm o menor valor encontrado é da variedade RB987935, com 38,93 mm³.

O maior valor de diâmetro médio das raízes na camada de 0-20 cm, é da variedade RB5476 com 1,93 mm, e o menor da variedade RB987935 com 1,00 mm. Na camada de 20-40 cm foi observado maior valor na variedade RB985476, com 1,30 mm e o menor valor na variedade RB034045, com 0,77 mm. Na camada de 40-60 cm o maior valor observado é da variedade RB034045, com 1,50 mm, e menor da variedade RB987935 com 1,30 mm. As Figuras 24, 25 e 26, são resultantes do imageamento e análise radicular das três variedades estudadas, referentes ao mês de Junho de 2020, nas camadas de 0 a 60 cm.

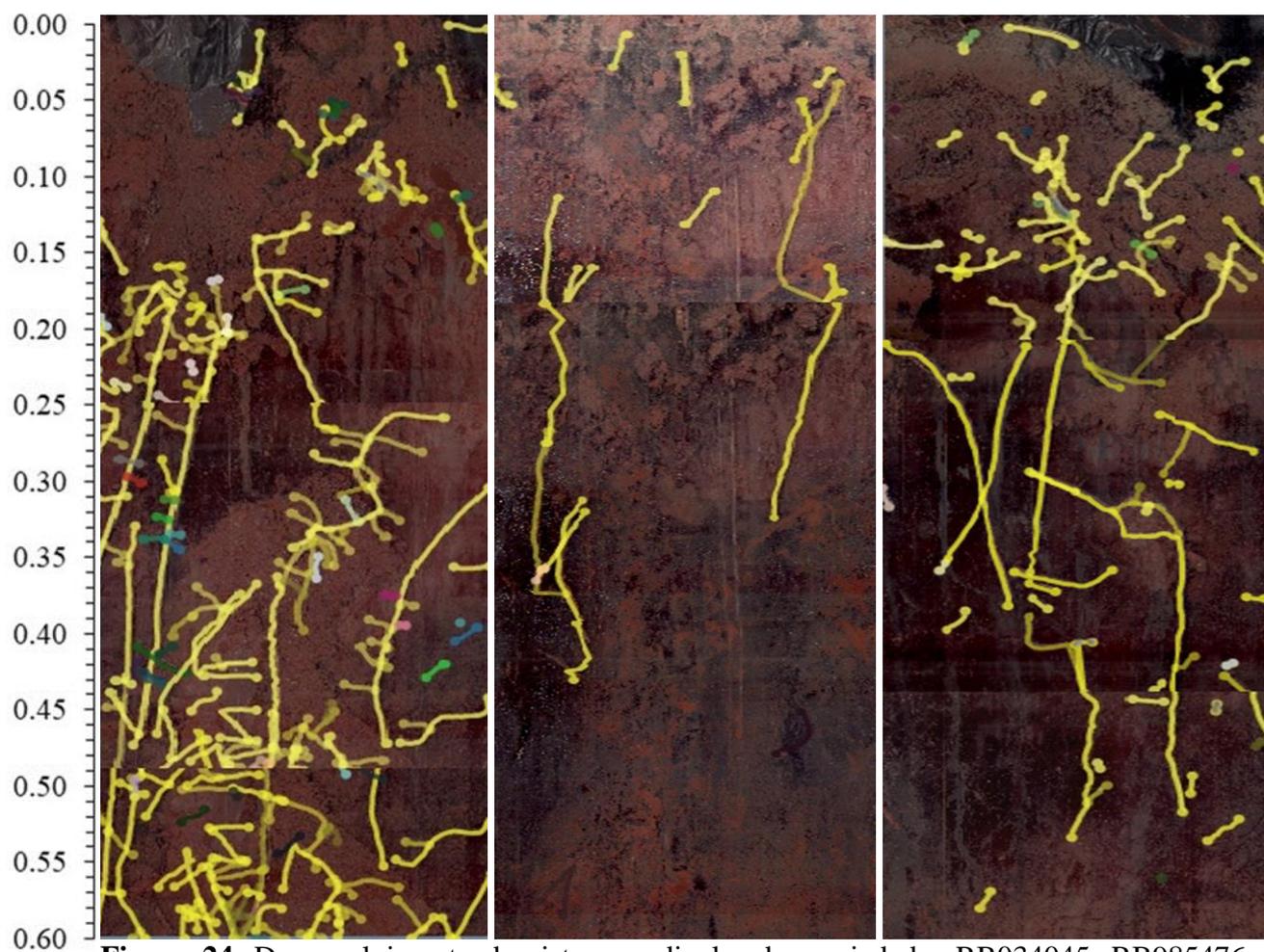


Figura 24. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Junho de 2020. a) Planta 1 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 1 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 1 (repetição) da variedade RB987935.

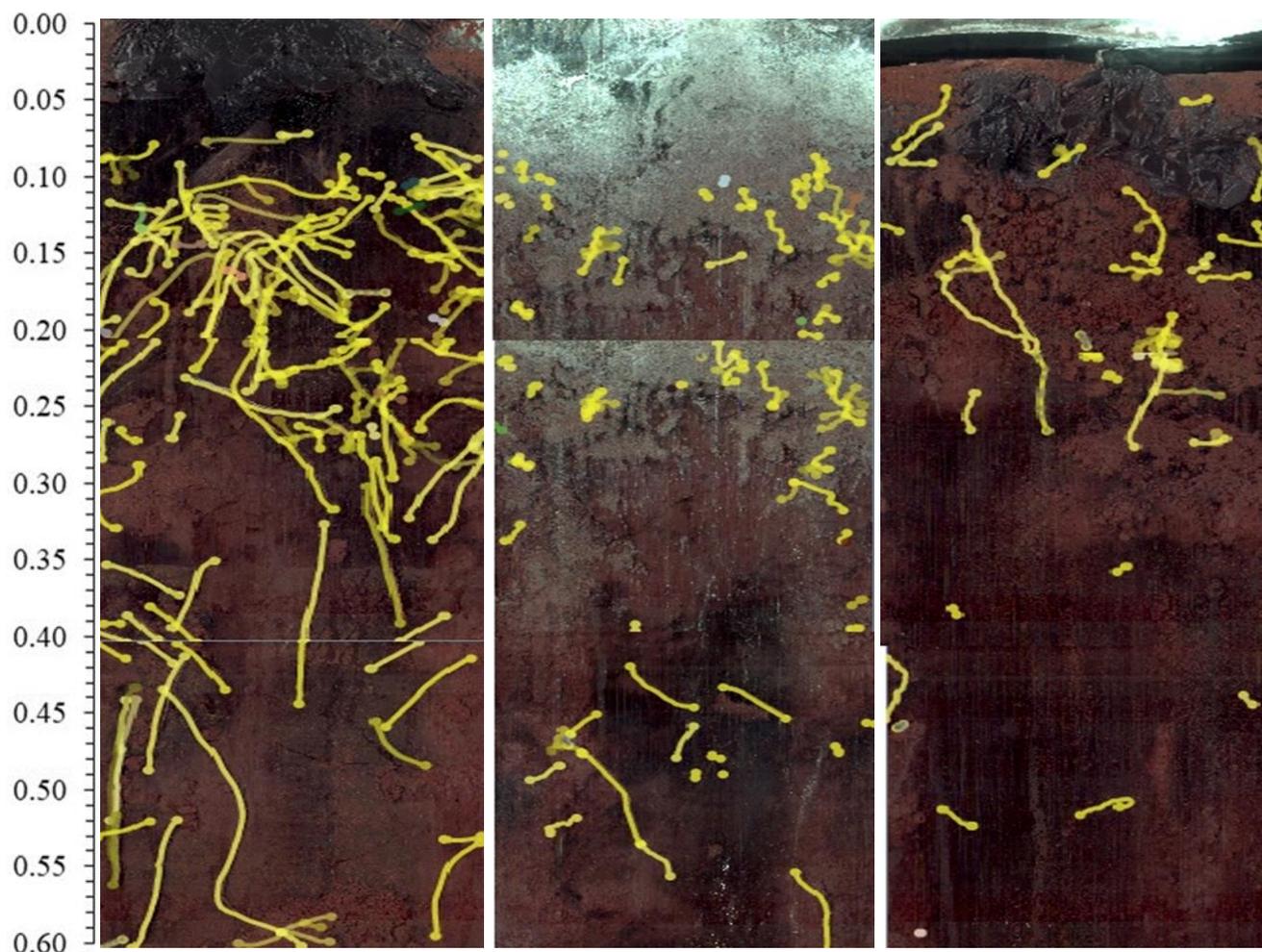


Figura 25. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Junho de 2020. a) Planta 2 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 2 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 2 (repetição) da variedade RB987935.

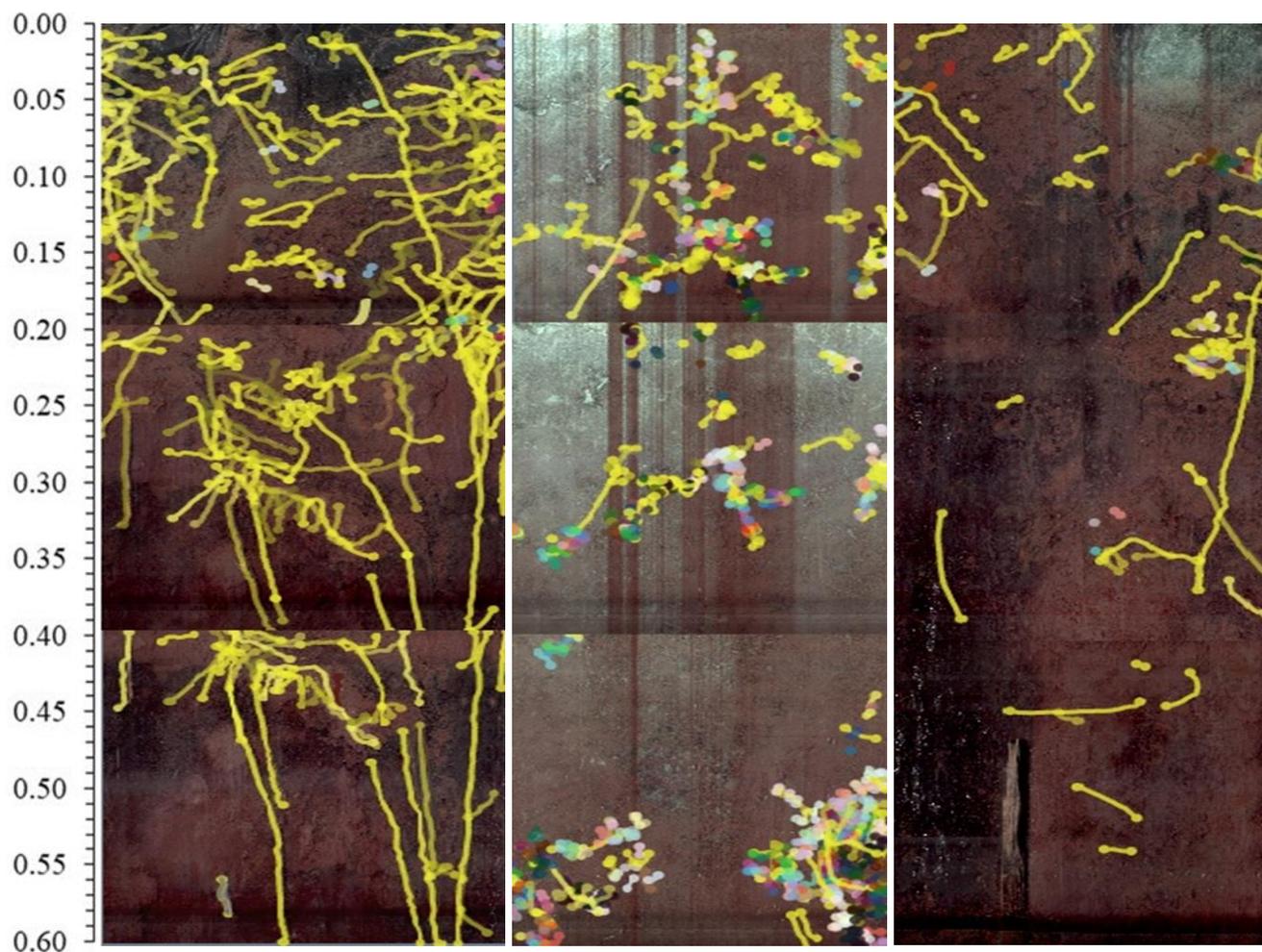


Figura 26. Desenvolvimento do sistema radicular das variedades RB034045, RB985476 e RB987935 na camada de 0-0,60 m de profundidade. Imagens obtidas por escaneamento no mês de Junho de 2020. a) Planta 3 (repetição) da variedade RB034045; b) Planta 3 (repetição) da variedade RB985476; e c) Planta 3 (repetição) da variedade RB987935.

O diâmetro médio das raízes, conforme Tabela 8, durante todo o período de desenvolvimento nos meses de Novembro e Fevereiro, apresenta diferenças, sendo que na variedade RB034045 o diâmetro médio é menor em relação às outras variedades estudadas. Já no mês de junho, a variedade RB034045 apresenta um maior diâmetro. Segundo Faroni & Trivelin (2006), quanto menor o diâmetro da raiz, maior a sua área específica de contato, isto pode ter colaborado com o desenvolvimento radicular da variedade RB034045, que no primeiro mês de avaliação (Novembro), todos os resultados analisados nas três camadas estudadas foram menores em relação às outras variedades, sendo respectivamente 0,40, 0,43 e 0,37 mm. Este diâmetro, propicia maior conexão com a solução do solo para absorção de água e nutrientes, o que explica o fato de que apesar de possuir o menor diâmetro de raízes nos dois primeiros meses, isto não impediu a variedade de ser mais produtiva, inclusive alcançando o maior índice de produtividade entre as estudadas. Foi verificado também que as raízes mais finas possuem

diâmetro semelhante ao dos poros do solo, inferindo que há uma clara relação entre essas duas grandezas (Shierlaw & Alston, 1984).

A variedade RB034045, apresentada na Tabela 4 e 8, se destaca por ter valor médio de condutividade hidráulica de água no solo maior, em relação às outras variedades. Esse fator permite a permeabilidade e infiltração da água, colaborando também com a maior absorção de nutrientes. Resultados obtidos em estudo de Góes et al. (2005) em áreas de cana-de-açúcar apresentaram reduções do fluxo de água no solo nas áreas com a cultura, resultados esses, semelhantes aos encontrados neste estudo.

Conforme Tabela 8, a variedade que mais se destaca no comprimento de raízes é a RB034045. As médias analisadas demonstram que a maior porcentagem de raízes estão alocadas na camada de 0-20 cm ao longo de todo o cultivo, resultado corroborado por Farias et al. (2008). Conforme Figura 2, as condições de clima envolvendo precipitação e temperatura, foram iguais para todas as variedades, sendo que variaram conforme o mês de análise, sendo que em novembro, quando ocorreu a primeira análise do sistema radicular das variedades estudadas, havia uma estiagem prolongada desde o mês de Julho, apresentando ocorrência de precipitação a partir do mês de Outubro com aproximadamente 40 mm registrado.

Ainda, de acordo com dados do sistema radicular na Tabela 8, Corsini & Ferraudo (1999) observaram que o sistema radicular não apresentou desenvolvimento nos meses de Novembro e Dezembro, permanecendo inalterados. Quando é feita a irrigação de salvamento e inicia o período chuvoso, as raízes apresentam um desenvolvimento muito maior em relação ao período seco, assim como foi exposto por Farias et al. (2008), inclusive em relação a profundidade alcançada pelas raízes.

A constatação de que, com o volume de raízes, aumenta-se a produtividade, é confirmada por Van den Berg et al. (2000), ou seja, a produtividade da cultura, tende a aumentar proporcionalmente ao volume de raízes. Observa-se também que quanto mais profunda a camada que as raízes alcançarem, melhor será sua tolerância em períodos de seca, quando há baixa disponibilidade de água (Buso et al., 2009).

Ressaltando a importância do estudo do desenvolvimento radicular, Vasconcelos et al. (2005) afirma que um dos fatores de maior importância na relação planta-água-solo é a arquitetura e distribuição do sistema radicular das plantas, bem como sua dinâmica de crescimento. Faroni et al. (2006) afirmam que o estudo do sistema radicular tem sido postergado devido às variabilidades de condições físicas, químicas e biológicas do solo, as quais influenciam a distribuição das raízes.

Conforme Tabela 10, no mês de Fevereiro houve aumento dos atributos de desenvolvimento e crescimento do sistema radicular de forma considerável nas variáveis estudadas. Esses resultados se justificam a vigência do período chuvoso (Figura 2) e as limitações referentes aos atributos físicos, resistência à penetração e umidade do solo. A homogeneidade dos atributos físico-hídricos e químicos, apresentados nas Tabelas 4 e 5, forneceram análises a respeito da equidade de ambiente para o desenvolvimento das variedades estudadas. Possivelmente, devido a fatores genéticos e externos ao solo, as variedades não obtiveram desenvolvimento uniforme do sistema radicular, sendo que algumas se destacaram mais do que as outras. Esse destaque pode estar atrelado ao próprio crescimento da raiz, que pode ser mais incisivo, inclusive propiciando aumento da qualidade de alguns atributos físicos e hídricos do solo, como porosidade e condutividade hidráulica, importante para aeração, distribuição de água e transporte de nutrientes.

O aumento da densidade do solo na camada de 0,10-0,20 m, pode ser atribuído ao tráfego de maquinários na área, em período de plantio e colheita (Tormena et al., 1998; Torres et al., 2015). Neste sentido, Humbert (1974) constatou que densidade do solo superior a $1,02 \text{ g cm}^{-3}$ causa deformação ou restringe o sistema radicular, e que maior ou igual a $1,46 \text{ g cm}^{-3}$, compromete sua penetração no solo. Por ser um atributo físico alta correlação com as raízes, a densidade do solo é calculada para avaliar compactação e resistência do solo à penetração, sendo possível relacionar ao desenvolvimento radicular (Stolf, 1991; Busscher et al., 2000).

É observado que a macroporosidade do solo, apresenta reduções quando há compactação no solo, e isto indica restrição ao desenvolvimento das raízes de cana-de-açúcar (Avilan, 1978; Dias Jr & Pierce, 1996). Conforme Tabela 5, as maiores restrições ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar ocorrem na camada 0,10-0,20 m, pois os valores de macroporos são menores. Com o aumento da densidade do solo, é notado diminuição da macroporosidade e da porosidade total, implicando em aumento de resistência à penetração. Por outro lado, a microporosidade tende a aumentar (Bertol, 1989; Klein, 2002). Para melhoria dos atributos de macro, microporosidade e densidade do solo, Paulino et al. (2004) recomendam que seja feita escarificação superficial do solo em áreas restritivas.

Os valores de macroporosidade e de microporosidade são maiores nas camadas mais profundas, referentes a 0,40-0,60 m e 0,80-0,90 m. Vasconcelos et al. (2014) observaram que com a diminuição da macroporosidade e aumento da densidade do solo, é reduzida a condutividade hidráulica de água no solo, uma vez que a drenagem está diretamente relacionada com a porosidade. Isto, além de comprometer o crescimento e desenvolvimento do sistema

radicular da cultura, pode implicar em uma susceptibilidade maior da área à erosão, ocasionando perdas de solo e água.

No mesmo sentido, o remanejamento das partículas do solo, causado pelo tráfego de maquinários, é causa constante de compactação, pois diminui o espaço poroso, aumenta a densidade e a resistência à penetração, inclusive em camadas mais profundas, como de 0,40-0,60 e 0,80-0,90 m. Esse fato contribui de forma negativa para o desenvolvimento radicular da cultura em maiores profundidades, limitando produtividade das culturas e a absorção de nutrientes pela planta (Wolkowski, 1990; Hamza, 2005). A granulometria tem papel importante no crescimento das raízes, pois o aumento considerável no teor de argila em profundidade, como ocorreu na camada de 0,80-0,90 m, associado ao aumento da densidade do solo, prejudicam o desenvolvimento radicular e causam maior resistência à penetração, conforme constatado em estudo realizado por Rosolem et al. (1999).

O manejo físico do solo é de fundamental importância, mas pode acarretar em severas limitações à qualidade do solo, traduzidas em perdas econômicas. Por outro lado, caso bem executado e observando as técnicas de manejo para as consequências impostas ao desenvolvimento das raízes, observa-se que, a subsolagem e a gradagem aumentam a porosidade, e conseqüentemente o potencial do crescimento das raízes (Corsini & Ferraud, 1999). A estabilidade dos agregados tem relação direta com o desenvolvimento das raízes, que promovem estabilidade ao solo, conforme mostrado na Tabela 6, as camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m apresentam maiores índices de DMP (Silva & Mielniczuk, 1997), onde se concentram os maiores comprimento total, área total e volume total de raízes das variedades analisadas (Tabelas 9, 10 e 11, respectivamente).

De acordo com Aquino et al. (2015), o simples estudo do crescimento das raízes não pode se limitar apenas a seu crescimento, tem que ser observado fatores de regeneração das raízes, pois este contribui na regeneração das soqueiras, contribuindo ativamente para a absorção de nutrientes, resistência a seca e tolerância ao ataque de pragas. A mortalidade das raízes, é associada ao stress hídrico a que a cultura está submetida durante parte de seu ciclo, devido às condições climáticas da região, podendo as raízes superficiais morrerem a partir de 179 dias em campo, conforme trabalho publicado por Laclau & Laclau, (2009).

O estudo da RIDESA Brasil se dissocia da influência do sistema radicular para analisar a rentabilidade e o potencial econômico das variedades, já que nas Tabelas 9, 10 e 11, as variedades apresentam equidade em seu respectivo desenvolvimento radicular independente das camadas. Para Letey (1985), as condições físicas do solo são intimamente relacionadas ao desenvolvimento das plantas. Portanto, a planta é dependente da qualidade da estrutura do solo

para apresentar maiores rendimentos, inclusive podendo agir para recuperação de solos degradados (Wohlenberg, 2004).

Em trabalho utilizando o mesmo equipamento em cana-de-açúcar, Camargo et al. (2017) observou que a densidade das raízes fica provisionada até a camada de 40 cm, inferindo que se o manejo do solo fosse mais profundo, este adensamento poderia ser observado nas camadas mais profundas. Pode-se identificar resultado semelhante apenas acompanhando a sequência do imageamento, em que, a maioria das raízes encontram-se até a camada de 40 cm, sendo observadas nas camadas mais profundas de 60 cm, apenas após 8 meses de desenvolvimento.

O estudo do sistema radicular ainda é incipiente em informações, enquanto muito se estuda e observa a parte aérea, as raízes ficam em segundo plano, o que torna indispensável denotar a sua importância e a consequência de seu estudo. Não existe ainda estabelecimento de uma metodologia, isto porque depende do Estado “*in situ*” para avaliação (Vasconcelos et al., 2003). Observa-se que com a renovação do canavial, que é executada após a colheita, não há revolvimento do solo para remoção das raízes, elas permanecem para a rebrota e servem como reserva nutricional (Sampaio et al., 1987). Em trabalho sobre o sistema radicular da cana-de-açúcar por Simões et al. (2010), foi constatado que as raízes se concentram entre as faixas 45 e 60 cm, faixas que foram alcançadas neste presente trabalho. Em estudo utilizando o sistema Minirhizotron conduzido por Ido et al. (2006), confirmou ser uma estrutura viável para o estudo do sistema radicular da cana-de-açúcar, o que corrobora a relação das variáveis estudadas do desenvolvimento radicular e os índices de produtividade expostos na Tabela 1.

Pelos resultados expostos nas Tabelas 10 e 11, é possível destacar o desenvolvimento das raízes das três variedades ao longo de seu ciclo, corroborando a literatura da profundidade de seu sistema radicular (Vasconcelos et al., 2003) e perceber que as raízes que se mantém, sobretudo, na camada de 0-20 cm, estendem seu domínio até a faixa de 60 cm. Segundo Sampaio et al. (1987), 75% das raízes estão na camada de 0-20 cm.

Tratando-se de rentabilidade através da análise de produção das diferentes variedades de cana-de-açúcar em relação ao 1º corte, nota-se através da Tabela 1, com resultados fornecidos pela RIDESA, que a variedade RB034045 apresenta melhor desempenho de produtividade, seguido da variedade RB985476. Nota-se que o sistema radicular e a produtividade da cana-de-açúcar são favorecidos pelo plantio direto, adotado na área de estudo, sobretudo por colaborar na retenção de água no solo e fornecimento de matéria orgânica, criando um microclima sobre o solo (Aquino et al., 2015). Os maiores volumes de raízes do solo foram concentrados na camada de 0-20 cm, apresentando uma expansão constante até última

análise no mês de Junho. Em trabalho de Farias et al. (2008), é constatado que a maioria das raízes estão nas camadas mais rasas, sobretudo de 0-15 cm, assim como neste presente trabalho. Segundo Van den Berg et al. (2000), a produtividade da cultura e o volume de raízes são correlatos, sendo que, quanto maior o volume de raízes, maior o rendimento da cultura. A quantidade de raízes no solo influencia na absorção de água e também a atividade microbiana, que tem influência sobre o crescimento da planta (Kornodorfer et al., 1989).

5 CONCLUSÕES

Em condições homogêneas de clima, solo e manejo, o sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar RB034045, RB985476 e RB987935 se desenvolvem de forma distinta, se destacando a variedade RB034045, que apresenta os maiores comprimento médio total de raízes (127,57 cm), área média total de raízes (343,56 cm²), volume médio total (310,90 cm³) e o menor diâmetro médio de raízes (0,81 mm), corroborando com a maior produtividade de cana por hectare (TCH = 119,26 ton. cana ha⁻¹).

Na camada entre 0-0,20 m de profundidade, concentra-se 69,51% da área total de raízes e 67,46% do volume total de raízes (média das três variedades estudadas), enquanto na camada 0,20-0,40 m de profundidade, os percentuais médios da área total de raízes decresce para 21,13% e o volume total de raízes para apenas 25,86%. Por último, a camada variando de 0,40-0,60 m de profundidade mostra a menor proporção de área total e volume total de raízes (9,36% e 6,69%, respectivamente) para a cultura da cana-de-açúcar.

Entre as variedades analisadas, os valores médios dos atributos de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar apresentam distribuição mais homogênea em profundidade, na variedade RB985476, cooperando com o maior valor econômico relativo [VER = 10,00 (em mil reais ha⁻¹)] da cultura para o período de avaliação.

6 REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752 p.
- ALVAREZ, I. A.; CAMARGO E CASTRO, P. R.; NOGUEIRA, M. C. S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 57, p. 653-659, 2000.
- AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, p. 415-422, 2007.
- AMATO, M.; LUPO, F.; BITELLA, G.; BOCHICCHIO, R.; AZIZ, M. B.; CELANO, G. A high quality low-cost digital microscope minirhizotron system. **Computer and Eletronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 80, p. 50-53, 2012.
- ANDRADE, E. T.; CARVALHO, S. R. G.; SOUZA, L. F. Programa do Pró-Alcool e o etanol no Brasil. **Engevista** Niterói, v. 11, p. 127-136, 2009.
- 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, p. 111-116, 2011.
- ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; MARQUES, V. S.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 25, p. 375-382, 2010.
- ANGERS, D. A. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfafa. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1244-1249, 1992.
- AN-VO, D.; MUSHTAQ, S.; REARDON-SMITH, K.; KOUADIO, L.; ATTARD, S.; COBON, D.; STONE, R. Value of seasonal forecasting for sugarcane farm irrigation planning. **European Journal of Agriculture**, Amsterdam, v. 104, p. 37-48, 2019.
- ARRUDA, A. B.; SOUZA, R. F.; BRITO, G. H. M.; MOURA, J. B. Resistência do solo à penetração como parâmetro indicador de subsolagem em áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

In: IV CONGRESSO INTERDISCIPLINAR – RESPONSABILIDADE, CIÊNCIA E ÉTICA, 4., 2017, Goianésia. **Anais**. Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2017. p. 232.

AQUINO, G. S.; MEDINA, C. C.; PORTEIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O. et al. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v. 50, p. 1150-1159, 2015.

ASSIS, R. L.; BAHIA, V. G. Práticas mecânicas e culturais de recuperação de características físicas dos solos degradados pelo cultivo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 19, p.71-78, 1998.

AUDE, M. I. S. Growth stages of sugarcane and its effects on productivity. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, p. 241-248, 1993.

AVILAN, R. L.; MENESES, L.; BLANCO, F.; ARAUJO, Y. Estudio del sistema radicular de la cana de azucar variedad V58-4 en un Mollisol del Estado Portuguesa. **Agronomía Tropical**, Maracay, v. 28, p. 163-174, 1978.

AWE, G. O.; REICHERT, J. M.; FONTANELA, E. Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 196, e104447, 2020.

BANGITA, B.; RAO, R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under sazonal tillage system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 189-190, p. 351-356, 2012.

BARBALHO, M.; SILVA, A.; CASTRO, S. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar na região sul do Estado de Goiás de 2001 a 2011. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, p. 98-110, 2013.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático fisiológico de estimativa**. 1993. 169 f. Tese

(Doutorado em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional Sul – COSUL. **Climatologia**, Araras, v. 3, p. 1-22, 1977.

BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; TENELLY, S.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane plating in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 195, e104383, 2019.

BARBOSA, L. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; NETO, J. R.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 13, p. 15-25, 2018.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação de compactação de LATOSSOLOS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, p. 146-151, 2007.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de LATOSSOLOS sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 829-834, 2002.

BERTOL, I. Degradação física do solo sob a cultura do alho. **Revista Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 2, p. 47-50, 1989.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 975-983, 2008.

BORGES, D. H. A. **Efeito do silicato de cálcio e magnésio e do gesso agrícola no crescimento, produção e potencial hídrico da cana-de-açúcar**. 2012. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2012.

BRADY, N.C. **Natureza e Propriedades dos Solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 878 p.

BRAUNACK, M. V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 103-121, 2006.

BULLOCK, D. S.; KITCHEN, N.; BULLOCK, D.G. Multidisciplinary teams: a necessity for research in precision agriculture systems. **Crop Science**, Amsterdam, v. 47, p. 1765-1769, 2007.

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

BUSSCHER, W. J.; FREDERICK, J. R.; BAUER, P. J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 999-1003, 2000.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de cultura e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1399-1407, 2008.

CAMARGO, L.; PIRES, R. C. M.; SCARPARE, F. V.; OHASHI, A. Y. P. Sistema radicular da cana-de-açúcar cultivada sob diferentes sistemas de preparo do solo. In: XLVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 46., 2017, Maceió, **Anais**. Maceió: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2017. 4 p.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação de Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 77-86, 2011.

CARMO, D. N. **Caracterização, gênese e uso de Latossolos sob Cerrado no município de Rio Parnaíba – MG**. 1977. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura de Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1977.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.

CASSOL, L. C. **Características físicas e químicas do solo e rendimento de culturas após a reaplicação de calcário, com e sem incorporação, em sistemas de preparo**. 1995. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

CASTIONI, G. A.; CHERUBIN, M. R.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 184, p. 301-309, 2018.

CASTRO, S. S.; ABDALA, K.; SILVA, A. A.; BORGES, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no Cerrado e no Estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, p. 171- 191, 2010.

CASTRO, S. S.; BORGES, R. O.; AMARAL, R. Estudo da expansão da cana de açúcar no Estado de Goiás: subsídios para uma avaliação do potencial de impactos ambientais. In: FÓRUM DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA NO CERRADO, 2., 2007, Goiânia. **Anais**. Goiânia: SBPC, 2007. p. 9-17.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 8, p. 40-55, 2014.

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R.; CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest Biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 370, e114353, 2020.

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**, Viçosa, v. 35, p. 1541-1550, 2011.

CEDDIA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 1467-1473, 1999.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, p. 211-218, 2009.

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

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTONOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 1161-1164, 2003.

CLAESSEN, M. E. C.; BARRETO, W. O.; PAULA, J. L.; DUARTE, M. N. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solo, 1997. 212 p.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 1663-1674, 2006.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**: terceiro levantamento, dezembro de 2020 – safra 2020/21. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em 10 de janeiro 2021.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1013-2021, 2004.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em LATOSSOLO Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 289-298, 1999.

COSTA, M. C. G.; MAZZA, J. A.; VITTI, G. C.; JORGE, L. A. C. Distribuição radicular, Estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1503-1514, 2007.

COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 515-523, 2008.

CROCKER, T. L.; HENDRICK, R. L.; RUESS, R. W.; PREGITZER, K. S.; BURTON, A. J.; ALLEN, M. F.; SHAN, J.; MORRIS, L. A. Substituting root numbers for length: improving the use of minirhizotrons to study fine root dynamics. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 23, p. 127-135, 2003.

CRUZ, R. L.; DALRI, A. B. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 516-524, 2008.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRÜGER, C. A. M. B.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de águas às plantas em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 855-864, 2009.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 283-288, 2006.

DIAS JR., M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

DINARDO-MIRANDA, L. L. Nematóides e pragas de solo em cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 110, p. 25-32, 2005.

DONAGEMA, G. K.; CALDERANO, S. B.; CAMPOS, D. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 225 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 33).

ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M. SILVA, R. B.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, Amsterdam, v. 362, p. 114097, 2020.

ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. S.; OLIVEIRA, I. N.; RIBEIRO, N. P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 187, p. 60-71, 2019.

FAGET, M.; LIEDGENS, M.; FEIL, B.; STAMP, P.; HERRERA, J. M. Root growth of maize in an Italian ryegrass living mulch studied with a non-destructive method. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 36, p. 1-8, 2012.

FAGET, M.; LIEDGENS, M.; STAMP, P.; FLÜTSCH, P.; HERRERA, J. M. A minirhizotron imaging system to identify roots expressing the green fluorescent protein. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 74, p. 163-167, 2010.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; NETO, J. D. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, p. 356-262, 2008.

FARONI, C. E. **Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 1007-1013, 2006.

FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Jaguariúna: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. 169 p.

FURLANI, C.E.A.; GAMERO, C.A.; LEVIEN, R.; LOPES, A. Resistência do solo à penetração em preparo convencional, escarificação e semeadura direta em diferentes manejos da cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, p. 579-587, 2003.

GALINKIN, M; MAROUELLI, M. H.; RODRIGUES, D. F.; CHAVEIRO, E. F.; SCÁRDUA, F. P.; LEPSCH, I. F.; DINIZ FILHO, J. A. F. D.; et al. **GeoGoiás**. Goiânia: Agência Ambiental de Goiás, 2003.

GARCIA, C. P. **Efeitos do preparo profundo do solo e da calagem na compactação do solo e na produtividade da cana-de-açúcar**. 2018, 35 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. **Crop-water relations**. 1. ed. New York: Wiley-Interscience, p.445-479, 1983.

GAUL, D.; HERTEL, D.; BORKEN, W.; MATZNER, E.; LEUSCHNER, C. Effects of experimental drought on the fine root system of mature Norway spruce. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, p. 1151-1159, 2008.

GUIMARÃES, L. C.; TURETTA, A. P. D.; COUTINHO, H. L. Uma proposta para avaliar a sustentabilidade da expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Estado do Mato Grosso do Sul. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 22, p. 313-327, 2010

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DISERENS, E.; MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 681, p. 424-434, 2019.

HINSINGER, P. Biology availability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. **Plant and Soil**, Berna, v. 237, p.173-195, 2001.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 121-145, 2005.

HERNANI, L. C. & GUIMARÃES, J. B. R. Efeitos de sistemas de preparo do solo e rotação de culturas em atributos físicos de um LATOSSOLO Roxo. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 14., Temuco, 1999. **Resúmenes**. Temuco, Universidad de La Frontera, 1999. CD-ROM.

HUMBERT, R.P. **El cultivo de la caña de azúcar**. México, Continental, 1974. 719 p.

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

INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo tipo terra roxa legítima. **Bragantia**, Campinas, v. 16, p. 1-13, 1957.

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

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

IAC. INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Introdução centro de cana**. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/cana/index.php>>. Acessado em: 2 out. 2020.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de Biomas do Brasil**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/Biomas2/viewer.htm>>. Acessado em: 1 jun. 2020.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Pedologia** 3. ed., Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2015. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acessado em: 1 jun. 2020.

IEA. INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Cana-de-açúcar: produção e processamento em 2019**. Análises e Indicadores do Agronegócio. v. 15, n. 3. 2020. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14767>. Acessado em: 7 de out. de 2020.

IPEA. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Biocombustíveis no Brasil: etanol e biodiesel**. Comunicados do IPEA, n. 53. Brasília. 2010. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=1791>. Acessado em: 7 de out. de 2020.

JADOSKI, C. J.; TOPPA, E. V. B.; JULIANETT, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*). **Pesquisa Aplicada & Agroecologia**, Guarapuava, v. 3, p. 169-176, 2010.

JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York: Courier Corporation, 1994. 281 p.

JOHNSON, M. G.; TINGEY, D. T.; PHILLIPS, D. T.; STORM, M. J. Advancing fine root research with minihirzotron. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 45, p. 263-289, 2001.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 857-867, 2002.

KORNDÖRFER, G. H.; PRIMAVERSI, O.; DEUBER, R. Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, v. 47, p. 32-36, 1989.

LACLAU, P. B.; LACLAU, J. P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, p. 351-360, 2009.

LAIME, E. M. O.; FERNANDES, P. D.; OLIVEIRA, D. C. S., FREIRE, E. A. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 5, p. 16-29, 2011.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, Berna, v. 1, p. 277-294, 1985.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

LIBARDI, P.L. & LIER, Q.J.V. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: MEDOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS. 1999, Aracaju. **Anais**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999. p.47-56.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. Piracicaba: ESALQ, 2000. 509p.

MACHADO, F. B. P. **Brasil, a doce terra – História do setor**, 2003. Disponível em: <http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/HistoriadoSetor.asp>. Acessado em: 29 mai. de 2020.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, J. C. C. Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1221-1230, 2008.

MAZAREI, R.; MOHAMMADI, A. S.; NASERI, A. A.; EBRAHIMIAN, H.; IZADPANAH, Z. Optimization of furrow irrigation performance of sugarcane fields based on inflow and geometric parameters using WinSRFR in Southwest of Iran. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 228, e105899, 2020.

MCBRIDE, M.B.; BLASIAK, J.J. Zinc and copper solubility as a function of pH in an acid soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 866-870, 1979.

MEDINA, C. C.; NEVES, C. S. V. J.; FONSECA, I. C. B.; TORRETI, A. F. Root system distribution and sugar-cane production under vinasse treatments. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 23, p. 179-184, 2002.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. Principles of plant nutrition. **4. ed. International Potash Institute**, Bern, 1987. 687 p.

MILLER, J. C. O atlântico escravista – açúcar, escravos e engenhos. **Afro-Ásia**, Salvador, n. 19-20, p. 9-36, 1997.

MUÑOZ-ROMERO, V.; BELLIDO, L. L.; LÓPEZ-BELLIDO, R. J. Faba bean root growth in a Vertisol: Tillage effects. **Fields Crop Research**, Amsterdam, v. 120, p. 338-344, 2011.

MUÑOZ-ROMERO, V.; BENÍTEZ-VEGA, J.; LÓPEZ-BELLIDO, L.; LÓPEZ-BELLIDO, R. F. Monitoring wheat root development in a rainfed vertisol: Tillage effect. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, p. 182-187, 2010.

MUÑOZ-ROMERO, V.; LÓPEZ-BELLIDO, L.; LÓPEZ-BELLIDO, R. J. The effects of the tillage system on chickpea root growth. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 128, p. 76-81, 2012.

NEVES, M. C. P.; LIMA, I. T.; DOBEREINER, J. Efeito da vinhaça sobre a microflora do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, p.131-136, 1983.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Berna, v. 76, p. 319-337, 1984.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 773-781, 2003.

OLIVEIRA, M. W.; FREIRE, F. M.; MACÊDO, G. A. R.; FERREIRA, J. J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, p. 30-43, 2007.

OLIVEIRA, C. M. R.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; REIS, E. F.; STURM, G. M.; SOUZA, R. B. Corretivos de acidez do solo e níveis de umidade no desenvolvimento da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, p. 25-31, 2010.

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, SP: PLANALSUCAR, 1983. 369 p.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 201-210, 2011.

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

PAULINO, A. F.; MEDINA, C. C.; AZEVEDO, M. C. B.; SILVEIRA, K. R. P.; TREVISAN, A. A.; MURATA, I. M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 911-917, 2004.

PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência**. São Paulo: Ottoni Editora, 2013. 347 p.

PEREIRA, R. M.; JÚNIOR, J. A.; CASAROLI, D.; SALES, D. L.; RODRIGUEZ, W. D. M.; SOUZA, J. M. F. Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no Cerrado Brasileiro. **Irriga**, Botucatu, v. 1, p. 149-157, 2015.

PEREIRA, W.; PAULA, N. FOMENTO FEDERAL AO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO NO BRASIL: um exame da atuação da FINEP e do BNDES. **Revista de Políticas Públicas**, São Luís, v. 20, p. 805-824, 2017.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; PRADO, H.; MORETTI, F. C. Aspectos estruturais de raízes da cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 57, p. 49-55, 1998.

QUINTANA, K. A. **Irrigação e fertirrigação por gotejamento para cana-de-açúcar na presença e ausência de boro**. 2010, 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015.

RAIJ, B. V. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. 285 p.

RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; SCOPEL, E.; BALBINO, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, p. 381-384, 2008.

REATTO, A.; SILVA, E. M.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; LIMA, J. E. F. W. Validity of the centrifuge method for determining the water retention properties of tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1547-1553, 2008.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria/Centro de Ciências Rurais, 2006. 18p.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em ARGISSOLO VERMELHO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A laboratory and numerical assessment of the Guelph permeameter method. **Soil Science**, Madison, v. 144, p. 282-299, 1987.

REZAEI, S. A.; GILKES, R. J. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. **Geoderma**, Amsterdam, v. 125, p. 145-154, 2005.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; XAVIER, F. M. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 263-268, 2000.

RIDESA. REDE INTRAUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. **História da RIDESA**. Disponível em: <https://www.ridesa.com.br/historia>. Acesso em: 8 out. 2020.

RIDESA. REDE INTRAUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. **Censo-varietal**. Disponível em: <https://www.ridesa.com.br/censo-varietal>. Acesso em: 10 out. 2020.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros Marques Editoração Eletrônica, 2004. 302 p.

RITCHEY, K. D.; SILVA, S. E.; COSTA, V. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Science**, Baltimore, v. 133, p. 378-382, 1982.

RODELLA, A. A.; ZAMBELO JUNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Calibração das análises de fósforo e potássio do solo em cana-de-açúcar - 2ª aproximação. **Saccharum STAB**, São Paulo, v. 28, p. 39-42, 1983.

RODRIGUES, F. A.; LAIA, M. L.; ZINGARETTI, S. M. Analysis of gene expression profiles under water stress in tolerant and sensitive sugarcane plants. **Plant Science**, Amsterdam, v. 176, p. 286-302, 2009.

RODRIGUES FILHO, S. R.; JULIANI, A. J. Sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 27, p. 195-212, 2013.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 744-750, 2010.

ROS, C. O.; SECCO, D.; FIORIN, G. W. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 241-247, 1997.

ROSETTO, R.; DIAS, F. L. F. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar: indagações e reflexões. **Informações Agronômicas**, nº 110, junho, 2005.

ROSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v. 63, p. 105-119, 2004.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 821-828, 1999.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, p. 1610-1622, 2016.

SALLA, D. A.; FURLANETO, F. P. B.; CABELLO, C.; KANTHACK, R. A. D. Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 2516-2520, 2009.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 11-21, 2008.

SAMPAIO, E. V. S. B; SALCEDO, I. H.; CAVALCANTI, F. J. A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III. Conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, p. 425-431, 1987.

SANCHES, G. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; FRANCO, H. C. J. Site-specific assessment of spatial and temporal variability of sugarcane yield related to soil attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 334, p. 90-98, 2020.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 153-156, 2008.

SANT'ANA, G. R. S.; SILVA, A. A.; BORGES, V. M. S.; CASTRO, S. S. Aspectos físico-químicos dos córregos limeira e do lajeado em área de cultivo de cana-de-açúcar, no município de Quirinópolis-GO. **Geoambiente**, Jataí, n. 33, p. 1-22, 2019.

SANTOS, H. G; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R; et al. **Sistema Brasileiro de Classificações de Solos**. 3 ed., Brasília: **Embrapa**, 2018. 355 p.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; NÓBREGA, J. C. A.; LUZ NETO, C. A. Distribuição de poros e sua relação com atributos físico-hídricos em solos de Cerrado e Cerrado/caatinga. In: **Embrapa Cerrados-Artigo (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO

DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. B.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1339-1348, 2011.

SATIRO, L. S.; CHERUBIN, M. R.; SAFANELLI, J. L.; LISBOA, I. P.; ROCHA JUNIOR, P. R.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 11, p. 86-95, 2017.

SAVAGE, M. J.; RITCHIE, J. T.; LAND, W. L.; DUGAS, W. A. Lower limit of soil water available. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.844-851, 1996.

SCARPARE, F. V.; VAN LIER, Q. J.; CAMARGO, L.; PIRES, R. C. M.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; BEZERRA, A. H. F.; GAVA, G. J. C.; DIAS, C. T. S. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 187, p. 110-118, 2019.

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

SCHREINER, D. T.; BRAGA, F. V. A.; VOGELMANN, E. S.; RODRIGUES, M. F.; OLIVEIRA, A. E.; PREVEDELLO, J.; REICHERT, J. M. Efeito da compactação do solo na retenção de água em uma toposequência Argissolos-Gleissolos no RS. In: **XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Uberlândia MG. 2010.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; OLIVEIRA, L. F. C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1419-1427, 2008.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; JÚNIOR, M. S. D. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 159-168, 2009.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, p. 404-413, 2010.

SHIERLAW, J.; ALSTON, A. M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, Berna, v. 77, p. 15-28, 1984.

SHIKIDA, P. F. A. Expansão canavieira no Centro-Oeste limites e potencialidades. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 22, p. 122-137, 2013.

SIMÕES, W. L.; CALGARO, M.; SOUZA, M. A.; FERREIRA, P. P. B. Influência do sistema de irrigação na distribuição de raízes da cana-de-açúcar no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 20., 2010, Uberaba. **Anais**. Uberaba: ABID, 2010.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1487-1494, 2002.

SILVA, A. P. M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 38-43, 2014.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 921-930, 2006.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. Indicadores macro e micromoforológicos da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, p. 169-185, 2015.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural da Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 2485-2492, 2000.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois LATOSSOLOS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 91-95, 1986.

SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de planta na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 113-117, 1997.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistema de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 311-317, 1998.

SILVA, A. A.; MIZIARA, F. Avanço do setor sucroalcooleiro e expansão da fronteira agrícola em Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 399-407, 2011.

SILVA, M. A.; SANTOS, C. M.; VITORINO, H. S.; RHEIN, A. F. L. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 173-181, 2014.

SILVA-OLAYA, A.; PELLEGRINO, C.; CERRI, C. Comparação de métodos de amostragem para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar. **Revista de Ciência Agrícola**, Maceió, v. 34, p. 7-16, 2017.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1-10, 2008.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 840-848, 2009.

SINGELS, A.; PARASKEVOPOULOS, A. L.; MASHABELA, M. L. Farm level decision support for sugarcane irrigation management during drought. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 222, p. 274-285, 2019.

SOARES, M. B. B.; FINOTO, E. V.; BOLONHEZI, D.; CARREGA, W. C.; ALBUQUERQUE, J. A. A.; PIROTTA, M. Z. Fitossociologia de plantas daninhas sob diferentes sistemas de manejo de solo em áreas de reforma de cana crua. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 5, p. 173-181, 2011.

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; FOLONI, L. L. Alteração física e morfológica em solos cultivados com citros e cana-de-açúcar, sob sistema tradicional de manejo. **Ciência rural**, Santa Maria, v. 35, p.353-359, 2005.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C; CAVALCANTE, I. H. L.; JÚNIOR, J. M.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 128-134, 2006.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T. Geostatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, p. 48-56, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 937-944, 2004.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 271-278, 2005.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 229-235, 1991.

STONE, L. R.; GOODRUMM, D. E., JAAFAR, M. N.; KHAN, A. H. Rooting front and water depletion depths in grain sorghum and sunflower. **Agronomy Journal**, Nova Jersey, v. 93, p. 1105-1110, 2001.

STRUDLEY, M. W.; GREEN, T. R.; ASCOUGH II, J. C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, p. 4-48, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; SANTARÉM, E. R. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre, RS: Artmed, 2004. 719 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 577 p.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 211-219, 2007.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L.; SOUZA, Z. M. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 428-437, 2015.

VAN DEN BERG, M.; BURROUGH, P. A.; DRIESSEN, P. M. Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugar cane yield potentials in São Paulo State, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 81, p. 43-55, 2000.

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

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S.; COSTA, Y. D. J.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um LATOSSOLO Amarelo Distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 309-316, 2010.

VASCONCELOS, A. C.; DINARDO-MIRANDA, L. L. **Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematoides**. Adonis, Americana, 2006. 54 p.

VASCONCELOS, A. C. M; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p., 849-858, 2003.

VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. Desenvolvimento Radicular da cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, n. 110, 2005.

VASCONCELOS, R. F. B.; SOUZA, E. R.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, L. S. Qualidade física de LATOSSOLO Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental**, Campina grande, v. 18, p. 381-386, 2014.

VELOSO, C. A. C.; SOUZA, F. R. S.; PEREIRA, W. L. M.; TENÓRIO, A. R. M. Relação cálcio, magnésio e potássio sobre a produção de matéria seca de milho. **Acta Amazônica**, Brasília, p. 193-204, 2001.

VITTI, G. C.; QUEIROZ, F. E. C.; OTTO, R.; QUINTINO, T. A. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. Bebedouro, SP:[sn], p. 15-18, 2005.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; GARCIA, C. M. P.; BENETT, C. G. S.; RODRIGUES, M. A. C.; MAESTRELO, P. R.; CELESTRINO, T. S.; GAZOLA, R. N. Qualidade tecnológica e produtividade agroindustrial de açúcar submetida a adubação com zinco. **Ciências Agrárias**, v. 34, p. 1603-1614, 2013.

TERAMOTO, E. D. **Avaliação de aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) baseados em parâmetros do solo e do clima**. 2003, 96 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Fitotecnia), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência do solo à penetração em LATOSSOLO cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 59, p. 795-801, 2002.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALKSI. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho, após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p.1023-1031, 2004.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 193-202, 2001.

WANG, X. J.; SALE, P.; HAYDEN, H.; TANG, C.; CLARK, G.; ARMSTRONG, R. Plant roots and deep-banded nutrient-rich amendments influence aggregation and dispersion in a dispersive clay subsoil. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 141, p. 107664, 2020.

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.28, no.5, Viçosa, Sept./Oct., 2004.

WOLKOWSKI, R. P. Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth: A review. **Journal of Production Agriculture**, v. 3, n. 4, p. 460-469, 1990.

YAMADA, T.; CASTRO, P. R. C. Efeitos do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 119, p. 1-32, 2007.

YAN, G.; CHEN, F.; ZHANG, X.; WANG, J.; HAN, S.; XING, Y.; WANG, Q. Spatial and temporal effects of nitrogen addition on root morphology and growth in a boreal forest. **Geoderma**, vol. 303, p. 178-187, 2017.

YUGUDA, T. K.; LI, Y.; ZHANG, W.; YE, Q. Incorporating water loss from water storage and conveyance into blue water footprint of irrigated sugarcane: A case study of Savannah Sugar Irrigation District, Nigeria. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 715, p.136886, 2020.

ZAMBROSI, F. C. B. Adubação com fósforo em cana-soca e sua interação com o magnésio. **Bragantia**, Campinas, v. 71, p. 400-405, 2012.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Teores de alumínio trocável e não trocável após calagem e gessagem em LATOSSOLO sob plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 6, p. 487-495, 2007.