



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ- REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL



**NATÁLIA BATISTA DO NASCIMENTO SILVA**

**RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE RAÍZES E SUA RELAÇÃO COM  
ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS CULTIVADOS COM  
CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA PERNAMBUCANA**

**Orientador:** Prof. Brivaldo Gomes de Almeida

**Coorientadores:** Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota;  
Dr. José Coelho de Araújo Filho

**RECIFE-PE**  
**Fevereiro, 2022**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ- REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**NATÁLIA BATISTA DO NASCIMENTO SILVA**

**RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE RAÍZES E SUA RELAÇÃO COM  
ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS CULTIVADOS COM  
CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA PERNAMBUCANA**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. Área de concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida  
Coorientadores: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota;  
Dr. José Coelho de Araújo Filho

**RECIFE-PE  
Fevereiro, 2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S586r Silva, Natália Batista do Nascimento  
Resistência à penetração de raízes e sua relação com atributos físico-hídricos de solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata pernambucana / Natália Batista do Nascimento Silva. - 2022.  
76 f. : il.
- Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.  
Inclui referências e anexo(s).
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2022.
1. Compactação. 2. Qualidade do solo. 3. Penetrometria. I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Título

CDD 620.8

---

## NATÁLIA BATISTA DO NASCIMENTO SILVA

Dissertação intitulada: **Resistência à penetração de raízes e sua relação com atributos físico-hídricos de solos cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata pernambucana**, apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como uma das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, e aprovada em 24 de fevereiro de 2022.

---

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida (UFRPE)  
Presidente da Banca Examinadora  
(Orientador)

### BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Bruno Campos Mantovanelli  
(Universidade Federal do Acre, Centro de Ciências Biológicas e da Natureza)

---

Prof. Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto  
(UFRPE, Departamento de Tecnologia Rural, Área de Engenharia Rural)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por mais todas as bênçãos e por mais um objetivo alcançado.

À minha família, que sempre esteve do meu lado em todos os momentos da minha vida, me apoiando e incentivando.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

Ao meu orientador, Professor Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, pela orientação e dedicação em me atender sempre, pelos conhecimentos transmitidos e pela oportunidade em realizar este trabalho.

Aos meus coorientadores, Professor Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota e Dr. José Coelho de Araújo Filho, pelas sugestões valiosas para conclusão deste trabalho.

Aos professores das disciplinas cursadas, que durante essa fase de pandemia se adaptaram e procuraram fazer o melhor para transmitir os ensinamentos.

Ao técnico do Laboratório de Física do Solo, Eudes Oliveira, pela valiosa ajuda durante a condução do experimento, coleta e realização das análises.

Aos colegas de pesquisa Alison José, Danillo Dutra e Paulo Marques por todo auxílio nas coletas de campo e nas análises em laboratório.

Ao meu namorado, Yann Arruda, por estar ao meu lado em mais uma etapa, me apoiando e incentivando nos momentos mais difíceis. Obrigada por tanto amor, por tornar a caminhada mais leve e por todos finais de semana de ajuda no laboratório.

À banca examinadora composta pelos Professores Fernando Cartaxo e Bruno Mantovanelli pelas valiosas contribuições.

Aos colegas do curso de Mestrado Clayton Andrade e Suelen Nascimento por todo companheirismo e colaboração durante o período de estudos.

À Estação experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC) pela concessão das áreas experimentais, em especial ao Dr. Djalma Simões e Evanílson Paulino pelo apoio para execução dos trabalhos de campo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de estudos.

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

## RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas da economia brasileira e sua produtividade está relacionada ao ambiente de produção. Todavia, esse ambiente tem sido frequentemente alterado, em decorrência da intensa utilização de máquinas pesadas que promovem a compactação do solo e, conseqüentemente, a degradação das condições físicas. Essa degradação tem sido avaliada pelo uso de alguns atributos físicos do solo, tendo maior destaque a resistência do solo à penetração de raízes (RP). Entretanto, há dúvidas sobre o tipo de ensaio e os limites metodológicos que podem ser utilizados para melhor diagnosticar a qualidade estrutural de solos. Neste sentido, esta pesquisa objetivou utilizar a RP para diagnosticar alterações estruturais dos solos cultivados com cana-de-açúcar, a partir de métodos de campo e de laboratório, comparando-se seus resultados em função da umidade e da sua influência no valor crítico da RP (2MPa), definindo-se as relações entre métodos de campo e de laboratório. Para tanto, na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina, localizada na Zona da Mata pernambucana, foram selecionadas três subáreas com base na textura dos solos cultivados com cana-de-açúcar sob diferentes tempos de uso, para determinação da RP *in situ*, utilizando-se um penetrômetro de campo, associada à respectiva umidade. Paralelamente, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em anéis volumétricos com volume de  $\cong 100 \text{ cm}^3$ , destinadas aos ensaios da RP em laboratório, via penetrômetro eletrônico de bancada. Os dados gerados pelos ensaios de RP, em campo e laboratório, foram utilizados para elaboração das equações para estimativa da RP, utilizando-se atributos físicos-hídricos para avaliar suas influências nos valores de RP. Desse modo, foram determinadas: frações granulométricas (método de hidrômetro); densidade do solo (cilindro volumétrico); porosidade total (método da saturação) e distribuição de tamanho de poros (mesa de tensão); condutividade hidráulica saturada - Ksat (permeâmetro de carga constante), além das umidades gravimétrica e volumétrica. Os resultados indicam que os valores de RP, tanto de campo como em laboratório, podem ser usados para diagnosticar áreas degradadas. As equações para simulação da RP são eficientes na estimativa dos níveis de degradação dos solos estudados. As frações areia e argila, macroporos e Ksat, foram os atributos que apresentaram maiores correlações com a RP.

**Palavras-chave:** compactação, qualidade do solo, penetrometria.

## ABSTRACT

Sugarcane is one of the main crops in the Brazilian economy and productivity is related to the production environment. However, this environment has been frequently changed, due to the intense use of heavy machinery that promotes soil compaction and, consequently, the degradation of physical conditions. This degradation has been evaluated using some soil physical attributes, with greater emphasis on soil penetration resistance (SPR). However, there are doubts about the type of test and the methodological limits that can be used to better diagnose the structural quality of soils. Thus, this study aimed to use SPR to diagnose structural changes in soils cultivated with sugarcane, from field and laboratory methods, comparing their results as a function of soil moisture and its influence on the critical of soil resistance to root penetration value (2 MPa), defining the relationships between field and laboratory methods. Therefore, at the Carpina Sugarcane Experimental Station, located in the Floret Zone region of Pernambuco, three sub-areas were selected based on the classification of soils and textural classes to determine SPR *in situ* by field penetrometer, associated with the respective soil moisture. At the same time, soil samples with preserved structure (volumetric cores,  $\cong 100 \text{ cm}^3$ ) were collected for the SPR tests in the laboratory, via a benchtop electronic penetrometer. The data obtained by the SPR tests (field and laboratory) were used to generate the equations for estimating the SPR, using physical-hydric attributes to evaluate their influence on the SPR values. Thus, the following attributes were determined: particle size distribution (hydrometer method); bulk density (volumetric cylinder); total porosity (saturation method) and pore size distribution (tension table); saturated hydraulic conductivity - Ksat (constant head permeameter), in addition to gravimetric and volumetric soil water content. The results showed that SPR values, both infield, and laboratory, can be used to diagnose degraded areas. The equations for SPR simulation are efficient to estimate the degradation levels of the studied soils. The sand and clay, macropores, and Ksat were the attributes that presented the highest correlations with soil penetration resistance.

**Keywords:** compaction, soil quality, penetrometry.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização da área de estudo. ....	26
<b>Figura 2</b> - Demarcação da área experimental, com detalhes para a definição dos limites das áreas de bordadura e útil, com o esboço da disposição dos pontos de coleta.....	27
<b>Figura 3</b> - Penetrômetro de campo.....	28
<b>Figura 4</b> - Coleta de amostras deformadas. (A) Coleta da amostra utilizando trado tipo holandês; (B) Trado preenchido com amostra de solo após coleta; (C) Processo de armazenagem do solo. ....	29
<b>Figura 5</b> - Coleta de amostras estruturadas. (A) Coleta de amostra utilizando amostrador tipo Uhland; (B) Amostrador recém retirado do solo; (C) Retirada de cachimbo do amostrador; (D) Abertura do cachimbo; (E) Retirada do conjunto anel-amostra. ....	30
<b>Figura 6</b> - Preparação das amostras não deformadas. (A) Amostras após a chegada de campo; (B) Processo de retirada do excesso de solo das extremidades do anel; (C) Amostra pronta para realização dos ensaios. ....	31
<b>Figura 7</b> - Penetrômetro eletrônico de bancada .....	32
<b>Figura 8</b> - Ensaios para análise granulométrica dos solos, com detalhes em: (A) Amostras no agitador tipo Wagner; (B) Suspensão solo + calgon em provetas; (C) Medida da densidade da suspensão com calgon com o densímetro de Bouyoucos; (D) Peneiramento úmido da fração areia. ....	36
<b>Figura 9</b> - Valores de resistência à penetração de raízes em campo ao longo da profundidade dos solos estudados: T2, área no Talhão 2; T5, área no Talhão 5; T6, área no talhão 6. ....	54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Especificações do penetrômetro utilizado nos ensaios de campo.....	28
<b>Tabela 2</b> – Classificação Textural e Estatística descritiva para os atributos granulométricos dos solos estudados. ....	41
<b>Tabela 3</b> - Estatística descritiva e teste de médias da densidade dos solos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m. ....	43
<b>Tabela 4</b> - Estatística descritiva e teste de médias da porosidade total do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m. ....	45
<b>Tabela 5</b> - Estatística descritiva para os valores da distribuição de tamanho de poros dos solos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m. ....	47
<b>Tabela 6</b> - Estatística descritiva e teste de médias para condutividade hidráulica saturada do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m. ....	49
<b>Tabela 7</b> - Estatística descritiva e teste de médias para umidade e resistência à penetração de raízes do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m.....	52
<b>Tabela 8</b> – Modelagem das equações referentes às curvas de resistência à penetração, determinadas a partir dos dados de campo ( $RP_C$ ) e de laboratório ( $RP_L$ ). ....	57

## LISTA DE EQUAÇÕES

1. Umidade gravimétrica .....	33
2. Umidade volumétrica.....	33
3. Condutividade hidráulica saturada .....	34
4. Fração silte.....	35
5. Grau de flocculação .....	35
6. Porosidade total .....	36
7. Equação de Bouma (1991).....	37
8. Equação de Bouma (1991) simplificada .....	37
9. Macroporos .....	37
10. Mesoporos.....	38
11. Microporos.....	38
12. Densidade do solo.....	38
13. Coeficiente de viés percentual (PBIAS) .....	39
14. Média do Valor Absoluto dos Erros (MAE).....	39
15. Raiz da Média do Quadrado dos Erros (RMSE).....	40

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 Geral .....	15
2.2 Específicos .....	15
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
3.1 Cana-de-açúcar .....	16
3.2 Compactação do solo .....	18
3.3 Resistência do solo à penetração de raízes .....	20
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
4.1 Descrição da área de estudo.....	25
4.2 Metodologia de campo.....	26
4.2.1 Delineamento da área experimental .....	26
4.2.2 Ensaios de resistência do solo à penetração de raízes in situ.....	27
4.2.3 Amostragem do solo .....	29
4.3 Metodologia de laboratório .....	30
4.3.1 Preparação das amostras de solo no laboratório .....	30
4.3.2 Equilíbrio do conteúdo de água nas amostras via mesa de tensão .....	31
4.3.3 Ensaios de resistência do solo à penetração de raízes em laboratório .....	32
4.3.4 Ensaios e caracterização físico-hídrica do solo .....	33
4.3.4.1 Umidade gravimétrica e volumétrica dos solos .....	33
4.3.4.2 Condutividade hidráulica saturada .....	34
4.3.4.3 Análise granulométrica .....	34
4.3.4.4 Porosidade Total.....	36
4.3.4.5 Distribuição de tamanho de poros .....	37
4.3.4.6 Densidade do solo.....	38
4.4 Análise Estatística.....	38
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>41</b>
5.1 Análise granulométrica.....	41
5.2 Densidade do solo .....	43
5.3 Porosidade total e distribuição de tamanho dos poros.....	45
5.4 Condutividade hidráulica saturada dos solos .....	48
5.5 Resistência do solo à penetração de raízes .....	52
5.5.1 Modelagem das equações referentes às curvas de resistência à penetração ..	57
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>62</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil vem sendo protagonista em pesquisa e desenvolvimento tecnológico voltado à produção de cana-de-açúcar (BNDES, 2016). Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021), atualmente, o país é o maior produtor mundial dessa cultura, com 654,8 milhões de toneladas colhidas na safra de 2020/2021.

A larga produtividade do setor sucroenergético demanda elevado rendimento operacional, e dessa forma, a cana-de-açúcar é cada vez mais cultivada sob práticas agrícolas mecanizadas. O intenso tráfego de máquinas e implementos nos canaviais durante o plantio e a colheita, tem proporcionado problemas de manejo da cultura, uma vez que promove alterações na qualidade estrutural dos solos e intensifica seu processo de compactação (CAMILOTTI *et al.*, 2005; USABORISUT, 2011). De acordo com Silva e Silva (2012), 85% do sistema radicular da cana-de-açúcar está localizado até 50 cm de profundidade, sendo que aproximadamente 60% encontram-se na camada de 20 a 30 cm. Devido a isso, essa é uma das culturas mais afetadas pela compactação, podendo ter reduções superiores a 50% no volume de macroporos do solo (LIMA *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Segundo Reichert *et al.* (2007) quando o solo é compactado, há um aumento da sua resistência à penetração de raízes, e sua porosidade total é reduzida, com perdas dos poros com diâmetros maiores, que podem ser destruídos ou transformados em poros menores. Os autores comentam ainda que esses processos promovem o aumento do conteúdo volumétrico de água e da capacidade de campo, pois a água ficará retida em poros menores, com elevada energia matricial. Com isso, haverá uma diminuição da aeração, da taxa de infiltração de água e da condutividade hidráulica do solo saturado, o que reduzirá a disponibilidade de água às plantas.

A compactação é uma das mais relevantes causas da degradação do solo, sendo seus efeitos avaliados por alguns atributos físicos, como a densidade do solo ( $D_s$ ), porosidade total ( $P_t$ ) e resistência do solo à penetração de raízes ( $R_P$ ). Desses atributos, o mais utilizado é a  $R_P$ , por está relacionada à diversos atributos do solo indicadoras do grau de compactação, como textura, porosidade, estrutura, estabilidade de agregados e teor de água (RIBON; TAVARES FILHO, 2008). Além disso, a  $R_P$  está diretamente relacionada ao crescimento das plantas, permitindo

que sejam identificadas as condições nas quais poderá ocorrer impedimento ao crescimento radicular e, conseqüentemente, ao desenvolvimento da parte aérea das mesmas.

A determinação da resistência do solo à penetração é realizada mediante a inserção de uma sonda cônica (agulha), de tamanho padronizado e velocidade constante de penetração no solo, processo realizado por meio de equipamento denominado penetrômetro ou penetrógrafo. Esse equipamento simula a resistência que o solo oferece à penetração das raízes e permite inferir se há ou não o processo de compactação do solo, permitindo se avaliar o grau e a profundidade da camada compactada no perfil do solo (ALMEIDA *et al.*, 2012; MOLIN *et al.*, 2012; CAMPOS *et al.*, 2013; OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2015).

Com relação aos ensaios para a quantificação da RP, estes podem ser realizados *in situ*, via penetrômetro de campo; ou em condições de laboratório, com penetrômetros de bancada. Embora na literatura haja a premissa de que os métodos de campo têm maior representatividade na determinação da RP, as metodologias não são claras quanto ao momento de sua determinação, nem em qual profundidade deve ser avaliada. Em condições de campo, o controle da umidade é mais difícil; e em laboratório, embora tais condições possam ser controladas, não há na literatura um consenso sobre que umidade, isto é, conteúdo de água equilibrado à determinada tensão, os ensaios devem ser realizados.

O estabelecimento de valores críticos de RP, acima dos quais ocorre restrições ao desenvolvimento radicular, é um grande desafio. Alguns autores têm adotado 2,0 MPa como limitante ao crescimento radicular e à produtividade da maioria das culturas (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2010). Entretanto, ainda não existe um consenso a respeito desse valor, pois diversas variáveis influenciam na sua interpretação, entre elas o tipo de solo e a espécie cultivada (WATANABE *et al.*, 2000; SILVA *et al.*, 2012), e o conteúdo de água no solo (BUSSCHER, 1990).

Dessa forma, existe uma amplitude de resultados que podem ser considerados críticos quando relacionados ao desenvolvimento e crescimento das raízes das plantas. Para solos com teores elevados de areia, Sene *et al.* (1985) consideraram críticos os valores de RP que variaram de 6,0 a 7,0 MPa. Já para solos com elevado teor de argila, valores de RP acima de 2,5 MPa são considerados críticos ao desenvolvimento das plantas. Entretanto, de acordo com Secco *et al.*

(2009), em virtude da RP estar diretamente relacionada à umidade do solo, tem sido difícil estabelecer, em condições de campo, valores críticos de RP. Ainda segundo estes autores, com o aumento da umidade do solo, a RP pode mudar rapidamente de uma possível condição limitante para outra não-limitante.

Experimentos que envolvem a determinação da resistência do solo à penetração de raízes não são raros (KLEIN *et al.*, 1998; ROSOLEM *et al.*, 1999; WATANABE *et al.*, 2000; ASSIS *et al.*, 2009; VAZ *et al.*, 2011; CAMPOS *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2015; VOGEL *et al.*, 2017; ARRUDA *et al.*, 2021), porém o entendimento da relação entre os dados de campo *versus* os de laboratório, com o objetivo de se avaliarem nuances em seus valores, devidas à degradação de solo pelo manejo com cana-de-açúcar, ainda carece de pesquisas, principalmente na região Nordeste do Brasil.

Desse modo, pode-se perceber que a aplicação de metodologias mais adequadas, para determinação do valor crítico da RP em solos cultivados com cana-de-açúcar, tendem a gerar informações que poderão ser usados mais adequadamente no manejo do solo, o que elevará, provavelmente, a produtividade da cana na área, podendo-se, no futuro, extrapolar para outras áreas similares.

Assim, o estudo de limites críticos para RP em solos sob cultivo de cana-de-açúcar, requer uso de áreas representativas de uma região, com elevado destaque na produção dessa cultura. Das áreas de uso e ocupação do solo em Pernambuco, Carpina tem se destacado no cultivo da cana-de-açúcar, principalmente pela presença da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC). Desde a extinção do PLANALSUCAR, a EECAC foi incorporada à UFRPE e tem sido referência nas pesquisas sobre a cultura, interagindo com outros centros de pesquisas, como a EMBRAPA e Programas de Pós-graduação.

## 2. OBJETIVOS

Tendo em vista os diferentes métodos e condições para determinação da resistência do solo à penetração de raízes e respectivos pressupostos, esta pesquisa teve como objetivos:

### 2.1 Geral

Avaliar as alterações estruturais dos solos de classes texturais contrastantes, cultivados com cana-de-açúcar, a partir de ensaios de campo e de laboratório, para determinação da resistência do solo à penetração de raízes (RP), avaliando-se a influência da umidade no valor crítico de penetração (2 MPa), para obtenção dos limites metodológicos para cada método. Além disso, será avaliada a relação entre a RP e os atributos físico-hídricos do solo e sua influência na identificação dos diferentes estágios de alterações estruturais dos solos estudados.

### 2.2 Específicos

Determinar a RP em duas condições: *in situ*, utilizando penetrômetro de campo; e em laboratório, via penetrômetro de bancada.

Determinar a umidade de campo, simultaneamente, nos mesmos locais dos ensaios de RP *in situ*; além de determinar a RP em condições de laboratório, utilizando-se amostras coletadas em anel volumétrico, com umidades volumétricas equilibradas sob diferentes potenciais ( $\theta_\psi$ ), obtendo-se a curva RP *versus*  $\theta_\psi$ .

Determinar o limite crítico da RP para os ensaios em laboratório, utilizando-se a curva da RP *versus*  $\theta_\psi$ , e confrontar esse valor com os dados de campo.

Determinar os atributos físico-hídricos do solo: textura; porosidade total e distribuição de tamanho de poros; condutividade hidráulica saturada, e avaliar suas influências nos limites críticos da RP e, conseqüentemente, identificar os níveis de degradação dos solos estudados.



### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta de ciclo semi-perene, pertencente à família das gramíneas e ao gênero *Saccharum*. De origem asiática, a cultura foi introduzida no Brasil durante o período colonial, firmando-se desde então como uma das maiores fontes de riqueza agrícola do País, principalmente, devido às favoráveis condições climáticas e grande disponibilidade de terras apropriadas para o cultivo. Atualmente, em razão do interesse mundial em diminuir a dependência pelos combustíveis fósseis e diversificar a matriz energética, visando atenuar o aquecimento global (SILVA *et al.*, 2009), a cana-de-açúcar vem ganhando destacada importância socioeconômica.

Hoje, o Brasil ocupa a liderança mundial da produção de cana-de-açúcar. A safra 2020/2021 destinou cerca de 8,6 milhões de hectares ao plantio da cultura, resultando em um volume de aproximadamente 654,5 milhões de toneladas colhidas, destinados à produção de 41,2 milhões de toneladas de açúcar e 29,7 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2021). O país destaca-se também como o maior exportador mundial, sendo responsável pela exportação de 32,2 milhões de toneladas de açúcar para mais de 140 países, das quais 42% foram comercializadas para China, Argélia, Bangladesh, Indonésia e Índia (CONAB, 2021).

Além de ser utilizada como matéria prima para produção dessas duas commodities de elevado peso na balança comercial nacional, a cana-de-açúcar também é utilizada como fonte de biomassa para geração de energia elétrica. Em 2020, a produção de bioeletricidade a partir da cana foi de 22,6 mil GWh, representando 82% de toda a geração de energia elétrica a partir de biomassa e configurando-se como a quarta fonte mais importante da matriz elétrica brasileira (UNICA, 2021).

A região Centro-Sul se destaca como a principal produtora de cana-de-açúcar do país, sendo responsável pelo fornecimento de 654,8 milhões de toneladas no ciclo 2020/21. O maior destaque nessa região é o estado de São Paulo, maior produtor do país, que respondeu por 54,1% da quantidade produzida na mesma safra (CONAB, 2021). No Nordeste, Alagoas é o estado que responde pela maior área cultivada, representando 33,3% da área regional na safra 2020/2021, e pela maior parcela da produção de cana, aproximadamente 33%. Por outro lado,

Pernambuco ocupa o sétimo lugar no ranking nacional e a segunda colocação na região Nordeste. Na mesma safra, foram colhidas 11,8 milhões de toneladas de cana no estado, o que representa o montante de aproximadamente 1,8% e 23% da produção nacional e regional, respectivamente (CONAB, 2021).

Os canaviais cultivados nas regiões Centro-Sul e Nordeste se diferenciam por diversos aspectos, dentre eles está a disponibilidade hídrica para o cultivo, que é significativamente menor no Nordeste (ANA, 2019). Clemente *et al.* (2017), argumentam que o menor rendimento da cana-de-açúcar nessa região, quando comparado a outras regiões do Brasil, deve-se principalmente à má distribuição das chuvas, onde os níveis de precipitação pluviométrica são inferiores à demanda hídrica da cultura. Assim, verifica-se que, embora a cana apresente boa resistência ao estresse hídrico, seu crescimento e desenvolvimento é beneficiado sob condições hídricas favoráveis, com ganhos de produtividade, longevidade e qualidade (ANA, 2019).

Segundo Korndörfer *et al.* (1989), quanto maior a deficiência hídrica mais importante torna-se o volume e a distribuição do sistema radicular. Isso porque quanto menor a disponibilidade de água, maior a capacidade da cultura em explorar os recursos mais profundos do solo em busca desse líquido e de nutrientes (SMITH *et al.*, 2005). Validando esse argumento, Baran *et al.* (1974) comparando a distribuição de raízes de cana-de-açúcar em solos irrigados, verificaram que as raízes foram mais profundamente distribuídas sob irrigação menos frequente. Por outro lado, em solos com pouca disponibilidade de água, a profundidade do sistema radicular é fortemente restrita à compactação, que impede a penetração de raízes em profundidades maiores no solo. Dessa forma, com menor volume de solo a ser explorado, menor será a tolerância à seca por parte das culturas.

Em termos gerais, o sistema radicular de cana-de-açúcar pode atingir entre dois e seis metros de profundidade (CURY *et al.*, 2014), a depender das condições edafoclimáticas. O tamanho e a distribuição das raízes indicam se o cultivo será realizado com sucesso ou não, uma vez que quanto maior o desenvolvimento desse sistema por área ou volume, maior o rendimento do cultivo. Isso se deve ao fato de que, além de garantir a absorção de água e nutrientes, as raízes da cana desempenham papel fundamental na sustentação da planta, regeneração de soqueiras e de resistência ao ataque de pragas (AQUINO *et al.*, 2015), sendo também parte fundamental na produção de açúcar (KORNDÖRFER *et al.*, 1989).

Nesse contexto, percebe-se que o conhecimento do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar é essencial para a definição e uso adequado de técnicas de irrigação, principalmente na Região Nordeste.

### **3.2 Compactação do solo**

O manejo do solo, embora tenha a finalidade de criar condições estruturais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas, pode, sem uma avaliação prévia das suas potencialidades e limitações, promover a degradação dos recursos naturais (ALMEIDA *et al.*, 2020). Diferentes indicadores físicos relacionados com a estabilidade estrutural do solo têm sido utilizados para quantificar os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo, tal como, a compactação (HORN; LEBERT, 1994; RICHART *et al.*, 2005).

A compactação do solo refere-se ao processo de redução de volume de solos não saturados devido à aplicação de uma pressão externa, a qual é causada principalmente por ação antrópica, decorrente do manejo inadequado ou contínuo uso de meios mecânicos, como pressão gerada por tráfego de máquinas e implementos agrícolas (OTTO *et al.*, 2011; CASTRO *et al.*, 2013; KUNZ *et al.*, 2013; LIMA *et al.*, 2013; ORTIGARA *et al.*, 2014; CHAMEN *et al.*, 2015).

Diversos trabalhos confirmam a relação entre o uso de máquinas e implementos agrícolas e as alterações nas propriedades físicas do solo. Dentre eles, encontra-se o de Esteban *et al.* (2019), que verificaram o impacto da colheita mecanizada, com e sem gestão controlada do tráfego, em um solo sob cultivo de cana-de-açúcar. Estes autores constataram que o tráfego controlado proporcionou circunstâncias mais favoráveis às condições físicas do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Jimenez *et al.* (2020), que ao analisarem o impacto de sucessivas colheitas mecanizadas em solos cultivados com a mesma cultura, comprovaram a deteriorização da qualidade física do solo.

A magnitude da compactação do solo gerada pelo tráfego depende bastante das características do maquinário agrícola. Feitosa *et al.* (2015), Riggert *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2016) defendem que as dimensões e o tipo estrutural da máquina, a área e a pressão de contato entre o pneu e o solo, a velocidade de deslocamento e a intensidade de tráfego sejam alguns dos fatores que interfiram nas modificações da estrutura física do solo. No entanto, segundo Guimarães Júnnyor *et al.* (2019), além desses agentes externos, as condições do próprio solo devem ser levadas em

consideração. Logo, elementos como o tipo e a textura do solo e o teor de matéria orgânica podem influenciar na suscetibilidade à compactação (LOPES *et al.*, 2011).

Juntamente aos fatores citados anteriormente, o manejo do solo realizado em condições de umidades inadequadas também tem ocasionado sua degradação. De acordo com Hillel (1980), quando o solo dispõe de baixo conteúdo de água, torna-se mais resistente à compactação, em razão da rigidez da sua matriz e do alto grau de vínculo entre as partículas. Por outro lado, com o aumento de sua umidade, ocorre a formação de um pequeno filme de água entre seus agregados, o qual reduz a coesão e o atrito entre eles, o que facilita o rearranjo das partículas, levando à compactação. Nesse sentido, Reichert *et al.* (2010) apontam que a umidade é a principal responsável por controlar a intensidade das deformações durante a realização das operações agrícolas, sendo a compactação máxima atingida quando a umidade do solo for crítica para esse processo. Corroborando esse entendimento, estudos realizados por Sampietro *et al.* (2015) mostraram que operações realizadas com máquinas para colheita florestal, em solo mais seco, proporcionaram menor degradação da qualidade física do solo, por estar menos úmido, comparadas com as operações realizadas em solos com maior conteúdo de água.

A presença de camadas compactadas tem sido avaliada pela resistência mecânica do solo à penetração, devido à sua relação com diversos atributos do solo, indicativos desse tipo de degradação (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2016). Similarmente, Sá *et al.* (2016) afirmam que a compactação do solo também pode ser avaliada com base nas alterações em sua densidade. Segundo Hosseini *et al.* (2015) o impacto nessa propriedade é o resultado mais visível e tangível da compactação do solo, uma vez que durante o processo ocorre uma reorganização estrutural das partículas, acarretando na diminuição do espaço poroso do solo, tornando-o assim mais denso.

Pilatti *et al.* (2016) argumentam que além da redução do volume de poros ocupado pelo ar, o surgimento de camadas compactadas determina um aumento na retenção de água. Em decorrência disso, observa-se uma diminuição da taxa de infiltração de água no solo, com consequente aumento das taxas de escoamento superficial e de erosão hídrica (SANTIAGO; ROSSETTO, 2019). Várias propriedades físicas do solo são alteradas pela compactação. Além do aumento da densidade e redução da infiltração da água, há o aumento da resistência do solo à penetração de raízes, redução da aeração e alterações de outros atributos do solo, como a

condutividade hidráulica e a permeabilidade (CHIODEROLI *et al.*, 2012; SHI *et al.*, 2012; VALADÃO *et al.*, 2015; CHERUBIN *et al.*, 2016).

De acordo com Mazurana *et al.* (2013) a compactação do solo tem sido apontada como um dos principais fatores limitantes da qualidade física do solo nas áreas agrícolas, visto que em solos compactados, o crescimento das plantas é menor em decorrência do aumento da resistência mecânica ao desenvolvimento das raízes. Este fato resultará em menor volume de solo explorado, diminuição da concentração de oxigênio, menor disponibilidade de água e absorção de nutrientes por parte das plantas (KELLER *et al.*, 2017; COLOMBI *et al.*, 2018); o que, conseqüentemente, prejudica a fertilidade do solo e a produtividade das culturas.

As propriedades físicas do solo são afetadas pela compactação, praticamente, em todas as fases do desenvolvimento vegetal, desde a germinação até o desenvolvimento radicular e da sua parte aérea (MONTANARI *et al.*, 2012). Sob essa perspectiva, percebe-se que a cana-de-açúcar, por envolver o uso de máquinas agrícolas em todas as etapas de cultivo, pode apresentar maiores restrições ao seu desenvolvimento em função das limitações impostas ao crescimento radicular, que são intensificadas pelo ciclo repetitivo de cultivo e colheita mecanizada. Dessa forma, verifica-se quão necessários são alguns cuidados visando-se atenuar o problema de compactação. Dentre as diversas possibilidades, Ferrari *et al.* (2018) recomendam o preparo do solo de modo menos intenso possível (tráfego leve), devendo-se evitar trabalhar sobre o solo úmido, além da redução da pressão de contato das máquinas sobre o solo, realizando o planejamento adequado de safra.

### **3.3 Resistência do solo à penetração de raízes**

A resistência do solo à penetração de raízes (RP) configura-se como um parâmetro físico eficiente na identificação de alterações estruturais dos solos e de áreas com diferentes estágios de compactação. Este atributo tem sido frequentemente utilizado para se avaliar a qualidade física do solo, por ser sensível às alterações promovidas pelo manejo e ter relações diretas com o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e, conseqüentemente, com a produtividade (SMITH *et al.*, 1997; VALADÃO JÚNIOR *et al.*, 2014; ZHUO *et al.*, 2020). Além disso, é um atributo cujo ensaio é rápido e de fácil execução, podendo ser correlacionado com

outros atributos que também são usados para se avaliar a compactação do solo (VALICHESKI *et al.*, 2012; VALADÃO JÚNIOR, 2013; OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2016).

A RP pode ser definida como um indicador que descreve a força física que o solo exerce sobre o crescimento radicular das plantas ao longo do perfil. Para culturas monocotiledôneas, como é o caso da cana-de-açúcar, esse indicador é de extrema relevância, principalmente nas camadas superficiais, devido à arquitetura do seu sistema radicular que é dominado por raízes adventícias, caracterizadas por se originarem no caule e se desenvolverem próximas à superfície do solo. Consequentemente, por serem mais expostas às condições do solo superficial, podem apresentar maiores custos metabólicos de exploração do mesmo e menores taxas de alongamento (COLOMBI *et al.*, 2018).

Souza *et al.* (2021) alegam que a RP é influenciada por alguns atributos do solo, como densidade do solo, textura, agregação, cimentação, conteúdo de matéria orgânica, mineralogia e teor de água do solo. No entanto, esses mesmos autores defendem que, embora todas essas propriedades afetem a RP, a densidade e, em particular, o conteúdo de água do solo, têm os maiores impactos sobre o atributo. Bartzen *et al.* (2019) alertam que a dependência da RP com a umidade do solo pode levar a erros no diagnóstico de compactação do mesmo, super ou subestimando-a. Segundo os autores, solos secos possuem maior resistência à penetração das raízes, mas isso não significa que estejam compactados, pois a compactação pode ser apenas momentânea nas condições em que haja coesão máxima entre as partículas. Da mesma forma, em situações de solo muito úmido, regiões compactadas podem não ser detectadas, pois o aumento do conteúdo de água no solo tende a reduzir os valores de RP (VAZ *et al.*, 2011).

Alguns autores recomendam que a RP seja medida com o teor de água próximo à capacidade de campo, sendo este um ponto de referência para o estabelecimento de valores críticos de RP. Entretanto, segundo Assis *et al.* (2009), o período em que o solo permanece na capacidade de campo é curto, de modo que, com a secagem do solo, sua resistência pode rapidamente variar de níveis não impeditivos para impeditivos. Assim, as medições da RP dependem de um fator principal: o teor de água no solo no momento do ensaio. Isto explica a grande variabilidade nos valores da RP determinada em campo, que pode ser devida às práticas de cultivo, ou apenas pela variação da umidade do solo no momento do ensaio. Desse modo, é recomendado que a determinação da RP do solo seja

efetuada simultaneamente com a respectiva umidade, gerando assim resultados com maior representatividade e confiabilidade.

Quanto à influência da textura sobre a RP, de acordo com Lins *et al.* (2021), solos argilosos são mais susceptíveis à compactação quando comparados aos solos arenosos devido às interações de manejo, umidade, plasticidade e coesão. Segundo os autores, quanto mais argila presente no solo, menor o tamanho médio dos poros e maior a resistência à penetração, considerando uma determinada densidade. Sob o mesmo ponto de vista, Ampoorter *et al.* (2012) argumentam que para avaliar a influência da textura do solo no grau de compactação, o teor de água do solo deve ser levado em consideração. Eles comentam que à medida que a umidade aumenta nos solos, de texturas médias à finas, a coesão entre as partículas do solo diminui e os solos atingem a vulnerabilidade máxima para compactação em um teor de água crítico. Já os solos com texturas mais arenosas têm coesão de partícula mínima em teores de água no solo muito baixos ou muito altos, podendo ocorrer a compactação nesses estágios. Neste sentido, Lima *et al.* (2017), analisaram o efeito do tráfego de pneus de máquinas pesadas em dois Latossolos, um franco-argilo arenoso e um solo argiloso, e constataram que o grau de compactação foi maior no solo com maior conteúdo de argila.

O aumento da RP pode causar efeitos prejudiciais ao sistema radicular das culturas, devido à estreita relação entre porosidade do solo e o crescimento radicular, com maior crescimento de raízes onde há maior número e continuidade de macroporos (HATANO *et al.*, 1988). À vista disso, Torres e Saraiva (1999) comentam que, geralmente, os solos arenosos têm altos valores de macroporosidade, e, dependendo dos teores de matéria orgânica e da atividade biológica, tendem a proporcionar condições satisfatórias ao crescimento das raízes. Por outro lado, para os solos argilosos, a situação é mais complexa, pois em condições não naturais, o cultivo e o manejo do solo afetam a estabilidade e a continuidade da macroporosidade, diminuindo drasticamente os maiores espaços porosos, como fendas, estruturas mais frágeis e bioporos. Com a diminuição desses poros, a RP passa a ter valores mais elevados. As raízes da maioria das espécies apresentam dificuldades em penetrar poros com diâmetro menor que o seu, momento no qual a taxa de extensão radicular é reduzida (TORRES; SARAIVA, 1999). Nestes casos, as raízes precisam exercer forças maiores que 0,02 MPa, para alargar os poros do solo, e continuarem seu desenvolvimento. Entretanto, embora

esse valor crítico, fisiologicamente medido, seja baixo (0,02 MPa), os valores de RP, para solos, adotados na literatura são bem maiores, sendo 2,0 MPa o mais utilizado como padrão (TORMENA *et al.*, 1998).

Segundo Tavares Filho (2016) essa diferença pode ser explicada pelo fato da maioria dos penetrômetros apresentarem diâmetro da agulha maior que as raízes, que estão em crescimento e se alongando, o que faz com que a penetração da haste do penetrômetro exerça maior pressão no solo durante o ensaio, registrando-se maiores valores de RP. O autor ainda comenta que, além do fato das raízes procurarem espaços de maior fraqueza durante o seu crescimento, a ponta das raízes tem, normalmente, camadas de mucilagem, que reduzem o coeficiente de fricção da superfície de contato com o solo, fazendo com que os valores fisiológicos para RP sejam menores em relação aos do penetrômetro.

Assim, a faixa dos valores de RP pode variar, como em Rosolem *et al.* (1999), que sugerem valores entre 1,5 e 4,0 MPa. Porém, esses valores, e por consequência as restrições, podem variar muito de acordo com a textura, as condições estruturais do solo, o manejo do solo e a cultura implantada (TAVARES FILHO, 2016). Para a cana-de-açúcar, por exemplo, não há um consenso quanto à variação desses valores limitantes. Balcazar *et al.* (2014), analisando solos coesos no município de Goiana, em Pernambuco, encontraram o valor máximo de 7,70 MPa. Por outro lado, Sá *et al.* (2016), ao conduzirem um estudo em Latossolo Vermelho em Bom Jesus de Goiás, GO, definiram 3,80 MPa como a resistência do solo crítica à penetração de raízes.

O equipamento utilizado para determinar a RP são chamados de penetrômetros ou penetrógrafos. Esses instrumentos medem a resistência oferecida pelo solo à penetração de uma ponta cônica (agulha), que pode simular a resistência que o solo oferece à penetração das raízes (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2015; ARRUDA *et al.*, 2021). Existem no mercado vários tipos e modelos de penetrômetros, desde os mais simples até os mais práticos, em relação a coleta e capacidade de armazenamento dos dados, que se distinguem de acordo com seu princípio de penetração, podendo-se citar: bancada ou campo, manual ou automático, estático (penetrógrafo) ou dinâmico (de impacto), com ou sem registro eletrônico de dados (BAESSO *et al.*, 2020).

Devido à diversidade de modelos de equipamentos, a reprodução dos dados pode trazer diferenças com relação ao número de resultados obtidos (VOGEL *et al.*,



2017), dificultando sua comparação, tanto em campo como em laboratório. De acordo com Molin *et al.* (2012), a área e projeção da ponteira, bem como a velocidade de penetração, são os principais fatores que implicam na diferença de leituras obtidas em diferentes penetrômetros. Além desses, Baesso *et al.* (2020) citam que a leitura desses equipamentos também pode ser influenciada por atributos físicos do solo como textura, estrutura, umidade, matéria orgânica e até pelo tipo de instrumento.

Neste sentido, Roboredo *et al.* (2010) compararam a diferença entre um penetrômetro de impacto, largamente usado em campo, e um penetrômetro eletrônico automático, e verificaram que os valores do penetrômetro de impacto foram maiores. Os autores atribuíram tal diferença ao princípio de funcionamento dos aparelhos, alegando que o primeiro superestima as leituras de resistência nas maiores profundidades, devido ao atrito entre a haste e a parede do poço de acesso do penetrômetro, que se encostam quando o corpo de prova, em queda livre, dissipa sua energia pela haste na direção do solo. Analogamente, Vogel *et al.* (2017) compararam os valores de RP determinados por meio dos penetrômetros de impacto e eletrônico, constatando que houve similaridade no comportamento entre eles, apesar dos resultados obtidos com o penetrômetro de impacto se correlacionaram melhor com os atributos físicos do solo.

A determinação da resistência do solo à penetração de raízes no campo é bastante laboriosa, com elevado custo, devido à demanda de tempo e mão-de-obra. Já no laboratório, além dos problemas de custo e morosidade, há também a inexatidão dos resultados (RIBEIRO *et al.*, 2002). Nesse sentido, uma alternativa para a obtenção da RP de maneira mais simplificada seria o desenvolvimento de modelos matemáticos que estimassem seus resultados a partir de parâmetros físicos do solo facilmente determinados. Dessa forma, como a RP é bastante sensível à mudanças no conteúdo de água do solo, e esse caracteriza-se por ser de fácil obtenção, torna-se possível o uso de modelos a partir dos quais se possa determinar a RP para um valor de umidade de referência, podendo-se observar qual a umidade crítica para que não haja valores restritivos ao desenvolvimento radicular.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

Nesta seção, apresenta-se uma breve descrição das características da área de estudo e, também, a metodologia utilizada nos ensaios de campo e de laboratório. Em campo, os experimentos foram conduzidos na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina, localizada no município de Carpina-PE. A metodologia utilizada nesse ambiente consistiu na amostragem de solos e na execução dos ensaios de resistência do solo à penetração de raízes (RP). Por outro lado, os ensaios sob condições controladas foram efetuados nas instalações do Laboratório de Física do Solo do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Campus Dois Irmãos, Recife - PE. Além da determinação da RP, a metodologia de laboratório correspondeu aos ensaios de determinação da umidade e dos atributos físico-hídricos do solo, como análise granulométrica, condutividade hidráulica saturada, porosidade total, distribuição de tamanho dos poros e densidade do solo.

### **4.1 Descrição da área de estudo**

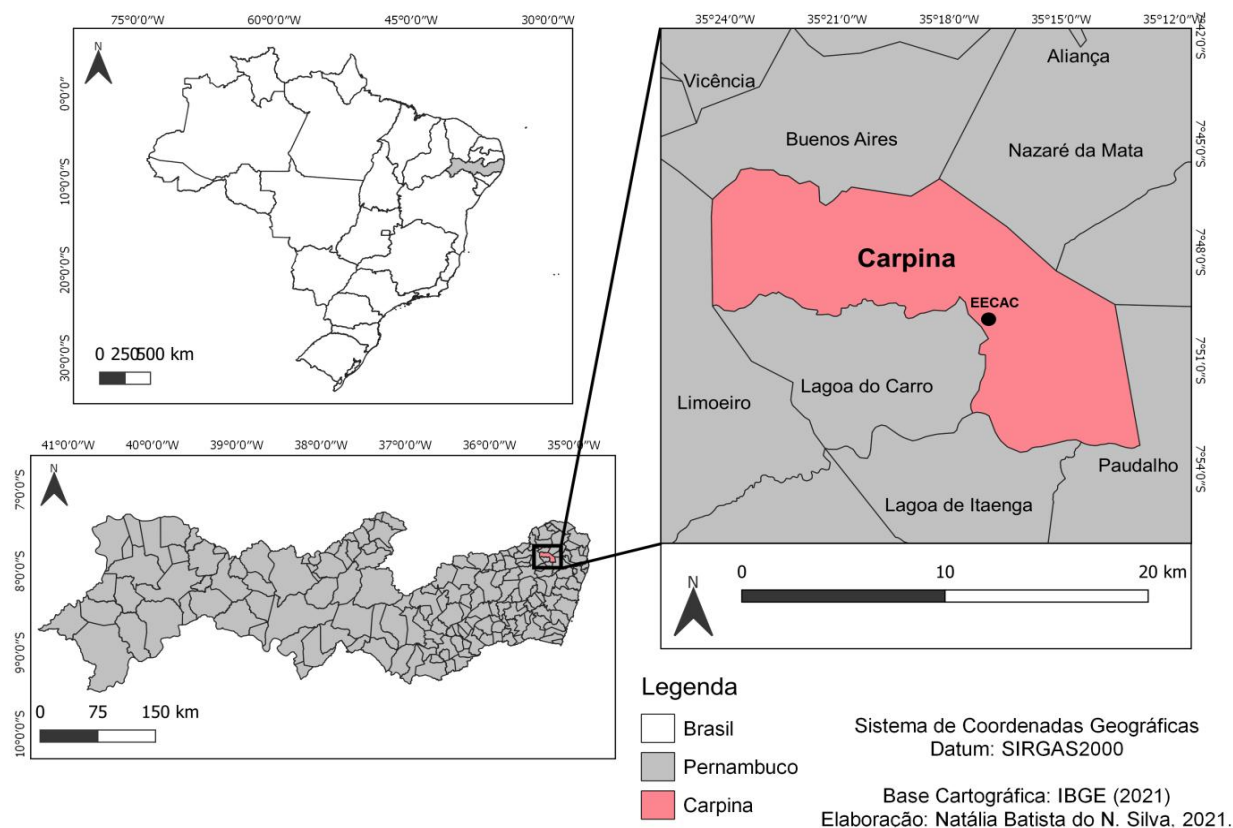
O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina – EECAC (Figura 1), localizada no município de Carpina, Pernambuco, microrregião da Mata Setentrional Pernambucana.

A área é objeto de estudo desde 1971, quando o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), antigo órgão do Ministério da Indústria e Comércio, criou o Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar – PLANALSUCAR, um centro de pesquisa agroindustrial distribuído pelos Estados produtores de cana-de-açúcar, que visava o melhor desenvolvimento da cultura.

Com a extinção do instituto e seu respectivo programa de pesquisa em 1990, houve sua incorporação por Universidades Federais. No Estado de Pernambuco, a Coordenadoria Regional Norte (CONOR – Carpina), onde atualmente está sediada a EECAC, ficou sob responsabilidade da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE.

As pesquisas geradas na UFRPE por meio da EECAC são conduzidas para o desenvolvimento de inovações tecnológicas, buscando a melhoria dos rendimentos da cultura na região Nordeste.

**Figura 1 - Localização da área de estudo.**



Fonte: Autora (2021).

A EECAC possui uma área de 261 hectares, situando-se a 7° 51' 13" de latitude sul e 35° 14' 10" de longitude oeste do meridiano de Greenwich, com altitude de aproximadamente 184 m e dista aproximadamente 56 km da capital do Estado, Recife-PE. O solo da estação experimental é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2013), cuja caracterização física e química, realizada em amostras coletadas nas camadas 0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de profundidade, encontram-se no Anexo 1. Quanto ao clima, segundo a classificação climática de Köppen, configura-se como tropical chuvoso do tipo As', que se caracteriza por ser quente e úmido, com maiores precipitações no outono/inverno e estação seca no verão.

## 4.2 Metodologia de campo

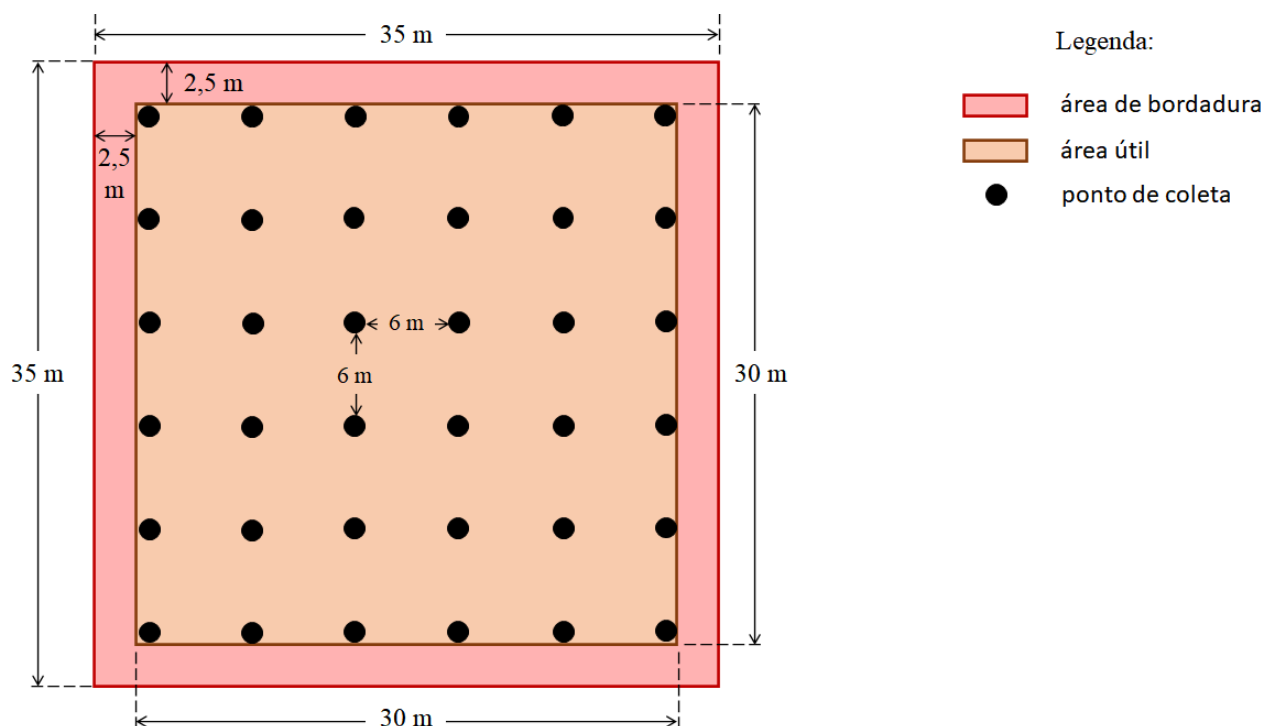
### 4.2.1 Delineamento da área experimental

Na área experimental foram selecionadas três subáreas com base na textura dos solos cultivados com cana-de-açúcar sob diferentes tempos de uso, sendo selecionados: o talhão 6, textura média, em cana soca na 2ª folha de cultivo;

o talhão 5, textura mais argilosa, na 5ª folha de cultivo; e o talhão 2, textura mais arenosa, na 7ª folha de cultivo. O preparo dos solos das áreas para o cultivo consistiu de subsolagem, gradagem e sulcagem, nessa sequência.

Em cada talhão avaliado foi delineado um grid com dimensões de 35 × 35 m, que após definição da área de bordadura, demarcou-se a área útil (30 × 30 m), com intervalos de 6 m entre os pontos de coleta, perfazendo um total de 36 pontos georreferenciados (Figura 2), utilizando-se GPS portátil modelo Garmin 60 CSx® 30.

**Figura 2** - Demarcação da área experimental, com detalhes para a definição dos limites das áreas de bordadura e útil, com o esboço da disposição dos pontos de coleta.



Fonte: Brivaldo Gomes de Almeida (2022).

#### 4.2.2 Ensaios de resistência do solo à penetração de raízes *in situ*

Os ensaios de campo para determinação da RP foram realizados nos 36 pontos de cada área experimental, nas profundidades de 0-30 cm e de 30-60 cm. Foram feitas medições totalmente automatizadas utilizando-se penetrômetro de campo da marca Falker®, modelo Solo Track PLG5300 (Figura 3), cujas especificações técnicas estão na Tabela 1.

Este equipamento mede a força necessária para que uma haste, com ponta em formato de cone, penetre o solo em diferentes profundidades. No presente estudo, em cada ponto realizaram-se leituras de RP (em kPa) entre 0 e 60 cm, a intervalos de 1 cm, até se atingir a profundidade máxima definida. Os valores obtidos

foram registrados, armazenados no equipamento e transferidos para um computador, onde puderam ser analisados, utilizando o software específico, que acompanha o penetrômetro. Posteriormente, foram feitas as médias das leituras para cada ponto nas profundidades 0-30 e 30-60 cm, obtendo-se, dessa forma, o valor da RP para cada camada.

**Figura 3** - Penetrômetro de campo utilizados nos ensaios *in situ* para determinação da resistência do solos à penetração de raízes.



Fonte: Autora (2021); Falker (2022).

**Tabela 1** - Especificações do penetrômetro utilizado nos ensaios de campo.

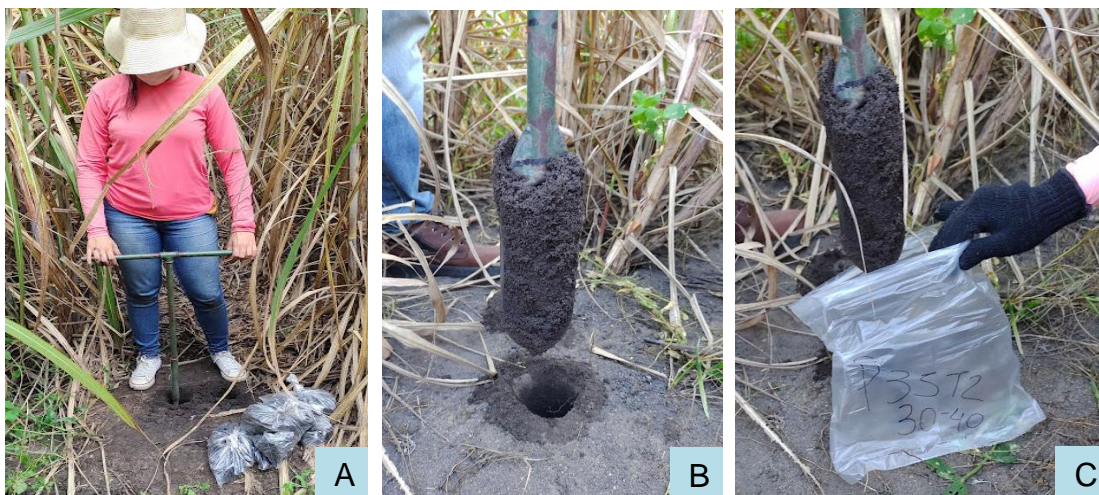
Especificações Técnicas	Descrição
Índice de Cone Máximo	Cone tipo 2 (6.800 kPa)
Resolução da medição de profundidade	1; 2,5 ou 5 cm, configurável
Resolução da medição índice de cone	Cone tipo 2 (7,7 kPa)
Velocidade nominal de inserção	24 mm s <sup>-1</sup>
Força máxima suportada	90 kgf (haste tipo 2)

Vale salientar que, buscando-se eliminar o efeito da variação do teor de água no solo, os dados coletados de RP foram associados à sua respectiva umidade no momento do ensaio, conforme detalhado mais adiante.

#### 4.2.3 Amostragem do solo

Nos mesmos pontos onde foram realizados os ensaios de RP, coletaram-se, simultaneamente, amostras deformadas nas profundidades 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm, utilizando-se trado tipo holandês (Figura 4).

**Figura 4** - Coleta de amostras deformadas. (A) Coleta da amostra utilizando trado tipo holandês; (B) Trado preenchido com amostra de solo após coleta; (C) Processo de acondicionamento do solo.



Fonte: Autora (2021).

Estas amostras foram armazenadas em embalagens previamente identificadas e totalmente vedadas, sendo encaminhadas ao laboratório para obtenção do valor da umidade do solo, no momento do ensaio de RP; sendo uma parte destinada aos ensaios para determinação da granulometria dos solos.

Paralelamente, e o mais próximo possível dos mesmos pontos, foram coletadas amostras estruturadas nas mesmas profundidades, com auxílio de um amostrador tipo Uhland, contendo anel volumétrico em aço inoxidável, com diâmetro e altura de aproximadamente 5 cm ( $\cong 100 \text{ cm}^3$ ). Os anéis foram introduzidos no sentido vertical ao solo até o centro de cada camada, retirando-se duas amostras em cada ponto, sendo uma em cada profundidade (0-30 e 30-60 cm), totalizando 72 amostras por subárea, conforme Figura 5. Após as coletas, esses anéis foram acondicionados em plástico filme para evitar perdas de umidade, sendo posteriormente levados ao laboratório e reservados para os ensaios de determinação da curva RP *versus* umidade volumétrica ( $\theta$ ), obtendo-se também os atributos físicos dos solos, cujos valores são conseguidos com amostras na forma de anéis.

**Figura 5** - Coleta de amostras estruturadas. (A) Via amostrador tipo Uhland; (B) Amostrador recém retirado do solo; (C) Retirada de cachimbo do amostrador; (D) Abertura do cachimbo; (E) Retirada do conjunto anel-amostra.



Fonte: Autora (2021).

### 4.3 Metodologia de laboratório

#### 4.3.1 Preparação das amostras de solo no laboratório

Para a realização da análise granulométrica, as amostras deformadas foram inicialmente misturadas em proporções iguais visando à obtenção de uma fração de solo referente às profundidades de 0-30 e outra de 30-60 cm, uma vez que foram coletados solos em intervalos de 10 cm, até se atingir 60 cm. Em seguida, essas frações foram convertidas à terra fina seca ao ar (TFSA), a partir da secagem à temperatura ambiente, destorroamento com rolos de madeira e passagem em peneiras de malhas com abertura de 2 mm.

A preparação das amostras estruturadas (não deformadas) consistiu em se retirar, com o auxílio de uma espátula, o excesso de solo das extremidades dos anéis, visando-se ajustar e garantir o total preenchimento do volume do anel com o solo, tomando-se o devido cuidado de não compactar a amostra. Posteriormente, a fim de se evitar a perda da massa de solo durante a realização dos ensaios, a base

inferior dos anéis foi envolvida com um tecido poroso, sendo este fixado por meio de uma liga de borracha, como apresentado na Figura 6.

**Figura 6** - Preparação das amostras não deformadas. (A) Condição das amostras (conjunto anel-amostra) para proteção durante o transporte do campo ao laboratório; (B) Processo de retirada do excesso de solo das extremidades do anel; (C) Aspecto do conjunto anel-amostra-pano-liga para realização dos ensaios.



Fonte: Autora (2021).

#### 4.3.2 Equilíbrio do conteúdo de água nas amostras via mesa de tensão

Previamente aos ensaios da RP, realizou-se o controle e a padronização da umidade, onde os conjuntos anel-amostra foram equilibrados em diferentes tensões, equivalentes aos potenciais mátricos ( $\phi_m$ ) de 0, -1, -6 e -10 kPa, aplicados via mesa de tensão, conforme sugerido em Romano *et al.* (2002).

Inicialmente, as amostras foram colocadas em bandejas preenchidas com água desaerada até 0,5 cm do topo do anel e saturadas por capilaridade por um período de 24h. Concluída a saturação (obtida quando a parte superior da amostra apresenta espelhamento), condição em que todos os poros do solo estão ocupados pela água, os conjuntos anel-amostra foram pesados para determinação do conteúdo de água no ponto de saturação (0 kPa).

Finalizada esta etapa, os conjuntos anéis-amostras foram levados à mesa de tensão e cobertos para evitar evaporação durante o processo de aplicação e equilíbrio da tensão selecionada. Para cada potencial a ser aplicado, ajustou-se a coluna de água, de modo a criar uma diferença de nível entre a extremidade do tubo flexível e a base da mesa de tensão, gerando-se sucção correspondente à altura da coluna de água aplicada (centrímetero de coluna de H<sub>2</sub>O = cca). Em cada tensão aplicada o equilíbrio foi verificado depois de cessada a saída de água no dreno, isto é, quando finalizada a drenagem de água dos poros do solo. Após o equilíbrio, os

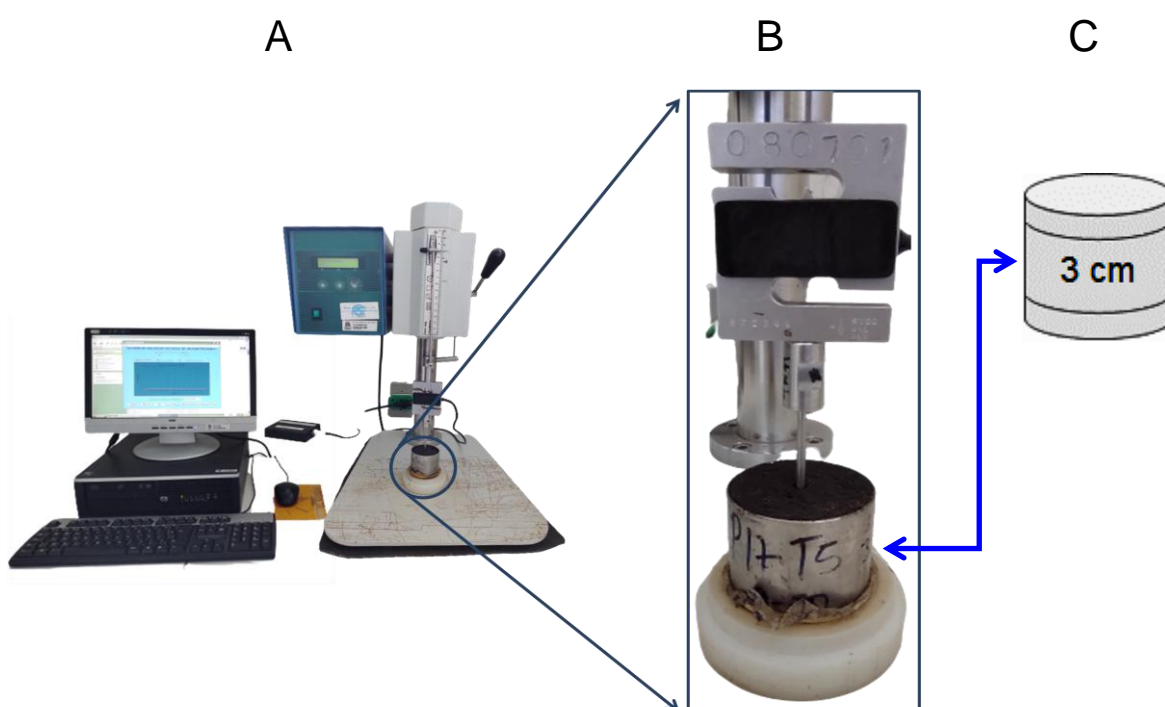


conjuntos anéis-amostras foram pesados e então utilizados para determinação da RP sob umidade controlada, conforme comentado a seguir.

#### 4.3.3 Ensaios de resistência do solo à penetração de raízes em laboratório

Após pesagem nas condições de equilíbrio de cada potencial aplicado, os conjuntos anéis-amostras foram levados ao penetrômetro eletrônico de bancada, para realização dos ensaios de RP. Foi utilizado o modelo MA 933, da marca MARCONI® (Figura 7), que por meio da inserção de uma agulha nas amostras, simula a penetração das raízes no solo. A agulha do equipamento possui uma base em formato de cone, medindo 4 mm de diâmetro e ângulo de inclinação de 30°, que é introduzida no solo na direção perpendicular, com auxílio de um motor elétrico, em velocidade constante de 0,04 mm s<sup>-1</sup>.

**Figura 7** - Penetrômetro eletrônico de bancada. (A) Sistema completo de aquisição de dados; (B) Detalhes da célula de carga e inserção da agulha no solo; (C) Profundidade útil de coleta de dados.



Fonte: Autora (2021).

A RP foi determinada a partir da média das medições realizadas nos três centímetros centrais de cada amostra (Figura 7C), uma vez que foram desprezados os dados de medição do primeiro e o último centímetro, buscando-se evitar o efeito de bordadura.

O aparelho é conectado a um computador para aquisição dos dados, obtendo-se os resultados da RP em MPa, por meio de um software próprio do equipamento. A partir dos valores obtidos, foi possível ajustar uma equação de regressão entre a RP e o conteúdo de água ( $\theta$ ), nas tensões equilibradas.

#### 4.3.4 Ensaio e caracterização físico-hídrica do solo

##### 4.3.4.1 Umidade gravimétrica e volumétrica dos solos

A determinação da umidade gravimétrica ( $U$ ) das amostras deformadas, em cada ponto analisado, foi realizada o mais breve possível após a chegada do campo. Nessas condições, foram pesados 50 g de subamostras dos solo e levados à estufa (105 °C, durante 24h). Após retiradas da estufa, as mesmas foram resfriadas em dessecador, e na sequência pesadas novamente. Os dados obtidos foram aplicados na equação (1), conforme proposto por Viana *et al.* (2017).

$$U_{(\%)} = \frac{\text{massa de água (g)}}{\text{massa de sólidos (g)}} \times 100 \quad (1)$$

Onde: a massa de água foi obtida pela diferença de peso entre a massa da amostra úmida (nas condições do momento da coleta) e a massa da amostra seca à 105° C; assumida como a massa de sólidos.

Como foram coletadas amostras de solo em intervalos de 10 cm, até se atingir 60 cm, ao final do procedimento, para cada ponto, foram feitas as médias dos resultados buscando-se obter o valor da  $U$  referente às profundidades de 0-30 e 30-60 cm, de modo a ser possível a correlação com os valores de RP.

Por outro lado, para obtenção da umidade gravimétrica das amostras estruturadas (conjunto anel-amostra), após o estabelecimento do equilíbrio das tensões aplicadas (1; 6 e 10 kPa), cada uma foi pesada, e, imediatamente após ensaios de RP, foram transferidas para a estufa (105 °C durante 24h). Na sequência, foram equilibradas em dessecador, e pesadas novamente. Com esses pesos, calculou-se a umidade volumétrica ( $\theta$ ), de acordo com os procedimentos descritos em Viana *et al.* (2017), utilizando-se a equação (2).

$$\theta_{(\%)} = \frac{\text{volume de água equilibrado na tensão X (cm}^3\text{)}}{\text{volume do solo (cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (2)$$

Onde: o volume de água equilibrado na tensão X (1; 6 ou 10 kPa) foi obtido pela diferença de peso entre a massa do conjunto anel-amostra equilibrado na tensão X e a respectiva massa seca à 105° C, dividido pela densidade da água (1,0 g cm<sup>-3</sup>), e o volume do solo foi assumido como o do volume do anel volumétrico ( $\pi r^2 h$ ).

#### 4.3.4.2 Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) foi determinada em amostras estruturadas (conjunto anel-amostra) pelo método do permeâmetro de carga constante, seguindo-se o procedimento descrito por TEIXEIRA *et al.* (2017).

Cada conjunto anel-amostra foi inserido no permeâmetro, saturados por capilaridade e, na sequência, submetidos à aplicação de uma carga hidráulica constante com 0,83 cm de altura de coluna de água. A água percolada pelo solo, durante o intervalo de tempo definido, foi coletada em copos plásticos; sendo em seguida, levada a uma balança para determinação de sua massa, sendo posteriormente convertida em volume, pela divisão do valor da densidade da água (1,0 g cm<sup>-3</sup>). Após alcançadas três medições consecutivas com resultados semelhantes, considerou-se atingida a condição de fluxo contínuo, aplicando-se, dessa forma, a equação de Darcy para a obtenção da Ksat, conforme equação (3):

$$K_{sat} = \left( \frac{V_a}{A \times t} \right) \times \left( \frac{L}{L + H} \right) \quad (3)$$

Em que: Ksat é a condutividade hidráulica saturada (cm h<sup>-1</sup>); Va é o volume constante de água que passa pelos poros do solo, desde o topo à base (cm<sup>3</sup>); A é a área da seção transversal do solo (cm<sup>2</sup>); t é o tempo que Va atravessa a amostra (poros), do topo à base (h); L é altura do solo (cm); H é a altura da coluna de água no topo da amostra (cm).

#### 4.3.4.3 Análise granulométrica

Os ensaios para determinação da granulometria dos solos foram realizados utilizando-se amostras de TFSA, segundo o método do densímetro, proposto por Gee e Or (2002) e modificado por Almeida (2008).

Inicialmente, 50g de TFSA, reservados em garrafas plásticas, foram submetidos ao processo de dispersão química, pelo uso de uma solução de 25 mL de carbonato de sódio e hexametáfosfato de sódio (Calgon). Juntamente a esta

solução também foi adicionada água, até o conjunto atingir o peso de 200 g, estabelecido para todas as amostras. Na sequência, as mesmas seguiram para um amostrador tipo Wagner, no qual foi realizada a dispersão física, por meio de agitação lenta (50 rpm), por 16 h. Posteriormente, as amostras foram transferidas para provetas de 1 L, até o volume de 940 mL, agitadas manualmente com uma haste para garantir a homogeneização, e deixadas em repouso por 24 h. Após esse período, mediu-se a densidade do material em suspensão, com o auxílio do densímetro de Bouyoucos, procedendo-se a leitura da argila + dispersante. Em seguida, o restante da suspensão do solo foi passada em peneira (malha de 0,053 mm), procedendo-se a lavagem do material retido com água corrente.

O material retido na peneira foi levado à estufa (105°C por 24 h), e logo depois pesado, sendo determinada a massa de areia total. A determinação do silte contido na amostra deu-se pela diferença entre as frações de areia e argila, usando-se a equação (4).

$$\text{Silte}_{(\%)} = 100 - \left( \text{areia total}_{(\%)} - \text{argila total}_{(\%)} \right) \quad (4)$$

O procedimento para determinação da proporção de argila dispersa em água (ADA) também consistiu em submeter as amostras à dispersão física, no entanto, não houve adição do Calgon, sendo a suspensão composta por solo + água. Com os dados da ADA e da argila dispersa quimicamente (ADQ) foi possível calcular o grau de floculação, conforme a equação (5):

$$\text{GF}_{(\%)} = \left( \frac{\text{ADQ}_{(\%)} - \text{ADA}_{(\%)}}{\text{ADQ}_{(\%)}} \right) \times 100 \quad (5)$$

A sequência dos procedimentos dos ensaios para determinação da granulometria dos solos, da dispersão das amostras no agitador tipo Wagner até a separação da areia total por peneiramento via úmida, é ilustrada na Figura 8.

Para a identificação das classes texturais foi realizada a média das repetições de cada camada, a qual, posteriormente, foi definida de acordo com o triângulo textural (planilha eletrônica para identificação da classe textural de solos).

**Figura 8** - Ensaios para análise granulométrica dos solos, com detalhes em: (A) Amostras no agitador tipo Wagner; (B) Suspensão solo + calgon em provetas; (C) Medida da densidade da suspensão com calgon com o densímetro de Bouyoucos; (D) Peneiramento úmido da fração areia.



Fonte: Autora (2021).

#### 4.3.4.4 Porosidade Total

A porosidade total foi determinada de forma direta, a partir do método da saturação, conforme descrito em Almeida *et al.* (2017a). Essa metodologia se baseia no princípio que o volume de água de saturação equivale ao volume total de poros. Dessa forma, as amostras (conjuntos anéis-amostras) foram saturadas e pesadas nessa condição. A segunda parte de coleta de dados se refere à obtenção do peso dos conjuntos anéis-amostras secos em estufa a 105°C. Entretanto, esse último dado só foi obtido após realizados os ensaios na mesa de tensão (umidades equilibradas a 1; 6 e 10 kPa), cujos resultados são usados para determinação da distribuição de tamanho de poros (macro, meso e microporosidade). Assim, na sequência, a porosidade total foi calculada a partir da equação (6):

$$Pt_{(\%)} = \left( \frac{V_{\text{poros}} (\text{cm}^3)}{V_{\text{solo}} (\text{cm}^3)} \right) \times 100 \quad (6)$$

Em que: Pt é a porosidade total (%);  $V_{\text{poros}}$  é o volume de poros ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre a massa do conjunto amostra-anel saturado e a massa do conjunto amostra-anel seco a 105 °C, convertendo-se a massa resultante em volume pela divisão da densidade da água ( $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ );  $V_{\text{solo}}$  é o volume do solo ( $\text{cm}^3$ ), assumido como o volume do anel volumétrico ( $\pi r^2 h$ ).

#### 4.3.4.5 Distribuição de tamanho de poros

Os ensaios para determinação da distribuição de tamanho dos poros foram realizados utilizando-se a mesa de tensão, de acordo com metodologia descrita em ROMANO *et al.* (2002). Para obtenção da energia a ser aplicada, via mesa de tensão, aos conjuntos anéis-amostras, utilizou-se a equação (7), que foi adaptada a partir expressão matemática sugerida em Bouma (1991).

$$\Psi = \frac{4 \sigma \cos \alpha}{D_a g \varnothing_{eq.poros}} \quad (7)$$

Onde:  $\Psi$  é a energia (tensão) a ser aplicada ao solo para drenar a água de uma determinada classe de poros, isto é, representa o potencial total da água no solo a ser aplicado via mesa de tensão;  $\sigma$  é a tensão superficial da água;  $\alpha$  é o ângulo de contato entre o menisco de água e a parede do poro;  $D_a$  é a densidade da água;  $g$  é a aceleração da gravidade; e  $\varnothing_{eq.poros}$  é o diâmetro equivalente de uma determinada classe poros.

Atribuindo-se os valores padrões para as variáveis da equação (7), isto é, assumindo-se que  $\sigma = 73,575 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ ;  $\alpha = 0^\circ$ ;  $D_a = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ , a equação (7) foi simplificada, onde a  $\Psi$  é expressa em metro de coluna de água (mca), sendo calculada em função do  $\varnothing_{eq.poros}$  ( $\mu\text{m}$ ), conforme equação (8).

$$\Psi = \frac{30}{\varnothing_{eq.poros}} \quad (8)$$

Para a definição do tamanho dos  $\varnothing_{eq.poros}$  seguiu-se a classificação segundo Prevedello (1996). Assim, os macroporos foram definidos como poros que têm  $\varnothing_{eq.poros} > 300 \mu\text{m}$ , sendo poros que drenam água na tensão de 0,1 mca (1 kPa).

Desse modo, os mesoporos foram definidos como aqueles poros que possuem  $\varnothing_{eq.poros}$  entre 50  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , drenando água entre as tensões de 1 kPa e 6 kPa; e os microporos, que drenam água à tensão  $> 6 \text{ kPa}$ , são poros que possuem  $\varnothing_{eq.poros} < 50 \mu\text{m}$ .

Assim, a macro, meso e microporosidade foram calculadas pela relação entre o volume da classe do poro considerada e o volume do solo, conforme as equações (9), (10) e (11), respectivamente.

$$\text{Macro}_{(\%)} = \left( \frac{V_{\text{macroporos}} (\text{cm}^3)}{V_{\text{solo}} (\text{cm}^3)} \right) \times 100 \quad (9)$$

$$\text{Meso}_{(\%)} = \left( \frac{V_{\text{mesoporos}} (\text{cm}^3)}{V_{\text{solo}} (\text{cm}^3)} \right) \times 100 \quad (10)$$

$$\text{Micro}_{(\%)} = \left( \frac{V_{\text{microporos}} (\text{cm}^3)}{V_{\text{solo}} (\text{cm}^3)} \right) \times 100 \quad (11)$$

Onde:  $V_{\text{macroporos}}$  é o volume de macroporos ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre as massas (g) dos conjuntos anéis-amostras saturados e amostra-anel equilibrado a 1 kPa;  $V_{\text{mesoporos}}$  é o volume de mesoporos ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre as massas (g) dos conjuntos anéis-amostras equilibrados a 1 kPa e amostra-anel equilibrado a 6 kPa;  $V_{\text{microporos}}$  é o volume de microporos ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre as massas (g) dos conjuntos anéis-amostras equilibrados a 6 kPa e amostra-anel equilibrado a  $105^\circ\text{C}$ ; dividindo-se tais massas pela  $D_a$  ( $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ ), convertendo-as em volumes; e  $V_{\text{solo}}$  é o volume do solo ( $\text{cm}^3$ ), assumido como o volume do anel volumétrico ( $\pi r^2 h$ ).

#### 4.3.4.6 Densidade do solo

A determinação da densidade do solo ( $D_s$ ) foi realizada pelo método do cilindro volumétrico, conforme descrito em Almeida *et al.* (2017b). Nesse método, a  $D_s$  é calculada pela relação entre a massa da amostra de solo seca em estufa a  $105^\circ\text{C}$  (massa de sólidos,  $M_{\text{sólidos}}$ ) e volume do solo ( $V_{\text{solo}}$ ), conforme equação (12):

$$D_{s(\text{g cm}^{-3})} = \frac{M_{\text{sólidos}} (\text{g})}{V_{\text{solo}} (\text{cm}^3)} \quad (12)$$

## 4.4 Análise Estatística

Com o objetivo de resumir e descrever o conjunto de dados referentes aos atributos físicos do solo, inicialmente foi realizada a análise por meio de estatística descritiva, calculando-se a média, mediana, valores de mínimo e máximo, desvio padrão, variância, assimetria e curtose. Visando-se comparar as variações entre as diferentes camadas e áreas experimentais, utilizou-se o coeficiente de variação (CV) para estimar o grau de dispersão dos dados. Esse coeficiente foi classificado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), que levam em consideração a variabilidade espacial das propriedades físicas do solo em campo para classificar como baixa variabilidade o CV inferior a 12%; média variabilidade os CVs encontrados no intervalo de 12 a 60% e alta variabilidade quando maiores que 60%.

As médias obtidas por meio da estatística descritiva para cada talhão foram submetidas à análises de variância pelo teste F, segundo delineamento experimental inteiramente casualizado, a um nível de significância de 5% de probabilidade e, posteriormente, havendo diferença significativa, foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro, com o auxílio do software Sisvar (5.8). Para os dados que não apresentaram distribuição normal, foi necessário realizar transformações dos mesmos. Para os dados que, mesmo com transformação não apresentaram normalidade, foi realizado o teste paramétrico Kruskal-Wallis por meio do programa estatístico Jamovi, versão 2.3.

Para a elaboração de modelos que descrevessem o comportamento da resistência à penetração em função da umidade, foram desenvolvidas duas equações para os solos de cada talhão, de acordo com as diferentes profundidades analisadas (0,00-0,30 e 0,30-0,60 m). Essas equações foram obtidas por meio da análise de regressão com uma variável independente, representada pela umidade gravimétrica (U), e a variável dependente, caracterizada pela resistência do solo à penetração (RP), utilizando-se o software Minitab® 21.1. Também foi realizada a calibração e validação das equações, a partir dos parâmetros estatísticos PBIAS, RMSE E MAE, visando-se observar o grau de precisão e acurácia das previsões dos modelos, após obtenção das equações. O coeficiente de viés percentual, PBIAS, mede a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores do que os dados coletados, sendo obtido conforme a equação (13).

$$PBIAS = 100 \times \left( \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \quad (13)$$

Onde:  $O_i$  representa os valores observados;  $P_i$  corresponde aos valores estimados pelo modelo de regressão.

Em relação à Raiz da Média do Quadrado dos Erros (RMSE) e Média do Valor Absoluto dos Erros (MAE), ambos os coeficientes indicam uma medida do desvio médio entre os valores obtidos e previstos. A diferença entre eles é que a MAE dá um peso igual a todos os desvios; enquanto a RMSE dá um peso maior para desvios grandes, uma vez que as diferenças entre os valores obtidos e estimados são elevadas ao quadrado. Esses parâmetros foram calculados segundo as equações (14) e (15).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (14)$$



$$\text{RMSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \quad (15)$$

Em que:  $O_i$  representa os valores observados;  $P_i$ , corresponde os valores estimados;  $n$  é o número de pares dados; e  $p$ , o número de parâmetros do modelo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise granulométrica

Pela proporção de areia, silte e argila total, verifica-se que a classe textural das três unidades experimentais variou entre Franco arenoso e Franco-argiloso-arenoso (Tabela 2).

**Tabela 2** – Classificação textural e estatística descritiva para os atributos granulométricos dos solos estudados.

Parâmetros	Profundidade (m)									
	Camada 0-0,30					Camada 0,30-0,60				
	Areia	Silte	Argila		GF	Areia	Silte	Argila		GF
			Total	Natural				Total	Natural	
----- (%)-----										
Talhão 6										
Média	74,47	7,41	18,12	16,23	10,35	67,94	6,19	25,87	23,39	9,61
Mediana	75,00	7,21	18,19	16,18	6,90	68,30	5,91	26,33	22,93	8,71
Mínimo	69,50	1,54	14,13	12,12	4,35	61,80	3,22	17,25	15,22	0,00
Máximo	78,58	12,32	23,30	22,29	27,73	74,03	14,31	32,47	31,46	23,08
DP	2,37	1,80	2,17	2,21	6,22	2,93	1,98	3,40	3,52	5,41
Variância	5,60	3,24	4,71	4,87	38,65	8,57	3,90	11,57	12,40	29,30
CV (%)	3,18	24,29	11,98	13,60	60,09	4,31	31,91	13,15	15,05	56,32
Assimetria	-0,76	-0,04	0,45	0,41	1,15	-0,15	2,24	-0,41	0,31	0,40
Curtose	-0,04	3,73	0,67	0,33	0,40	-0,28	7,80	0,52	0,42	-0,46
Classificação textural	Franco Arenoso					Franco-argiloso-arenoso				
Talhão 5										
Média	70,61	7,11	22,28	19,95	10,38	66,01	5,63	28,36	26,66	5,97
Mediana	70,92	6,25	22,38	20,24	9,09	65,12	5,58	28,43	27,29	5,12
Mínimo	57,80	4,07	16,23	15,22	0,00	62,29	3,29	23,55	20,56	0,00
Máximo	76,77	22,29	28,53	27,51	25,00	70,95	8,45	32,91	30,99	23,08
DP	3,81	3,89	2,56	2,78	7,43	2,26	1,25	2,33	2,73	5,95
Variância	14,51	15,10	6,53	7,70	55,13	5,09	1,57	5,42	7,43	35,36
CV (%)	5,39	54,67	11,47	13,91	71,56	3,42	22,26	8,21	10,22	99,56
Assimetria	-1,75	3,50	-0,01	0,40	0,45	0,47	0,25	-0,22	-0,32	1,27
Curtose	4,48	12,32	0,10	0,06	-0,60	-0,87	-0,49	-0,45	-0,65	1,41
Classificação textural	Franco-argiloso-arenoso					Franco-argiloso-arenoso				
Talhão 2										
Média	79,35	5,55	15,10	12,86	14,79	76,19	3,66	20,15	17,30	13,92
Mediana	79,33	5,71	15,10	13,10	13,23	76,53	3,87	20,11	16,64	12,52
Mínimo	74,81	2,09	12,05	10,05	0,08	70,74	0,38	14,07	13,07	4,49
Máximo	82,72	8,29	18,12	17,11	28,57	80,08	6,69	26,20	22,25	27,14
DP	1,90	1,51	1,56	1,74	7,48	2,36	1,74	3,00	2,65	6,65
Variância	3,60	2,28	2,44	3,03	55,93	5,57	3,02	8,98	7,03	44,21
CV (%)	2,39	27,22	10,35	13,54	50,56	3,10	47,46	14,87	15,33	47,78
Assimetria	-0,26	-0,35	-0,21	-0,10	0,33	-0,17	-0,23	0,28	0,26	0,16
Curtose	-0,05	-0,68	-0,37	-0,26	-0,66	-0,84	-0,88	-0,30	-1,15	-1,08
Classificação textural	Franco Arenoso					Franco-argiloso-arenoso				

DP - Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; GF – Grau de floculação

A partir dos valores das médias para os atributos texturais, verifica-se que em todos os solos da área de estudo houve decréscimo do teor de areia e silte com a profundidade, acompanhado do incremento da fração argila (Tabela 2). Este comportamento é esperado para a classe dos Argissolos, caracterizados pela presença do horizonte Bt, onde há um aumento nos teores de argila em profundidade (EMBRAPA, 2013).

Os valores da média e mediana são relativamente semelhantes, mostrando distribuições simétricas, condição que indica distribuição normal. Esse padrão apresenta exceção quando se refere ao silte, uma vez que os valores de assimetria e curtose deste estão mais distantes de zero para as duas camadas do Talhão 6 e para a camada 0-30m do Talhão 5. Para essas posições, a distribuição é considerada assimétrica, e por apresentarem valores positivos de assimetria, constata-se que há a ocorrência de alta concentração de dados em valores menores, indicando que a maioria dos valores está abaixo da média.

Quanto ao coeficiente de variação (CV), de acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), a areia apresentou baixa variabilidade e maior homogeneidade dos dados nas três áreas estudadas, com valores inferiores a 12% (Tabela 2).

Os teores de silte apresentaram CVs mais elevados, variando entre 22,26% e 54,67%, indicando moderada variabilidade dos dados. Segundo Simões *et al.* (2006) esta maior variabilidade para o silte pode estar relacionada com a sua maior mobilidade no solo. Ainda de acordo com Souza (2017), os altos valores de CV para o silte podem ser atribuídos ao fato de que todos os possíveis erros da análise granulométrica recaíram sobre esta fração, uma vez que ela foi calculada pela diferença entre as porcentagens de areia e a argila [equação (4)].

Com relação aos valores de argila dispersa em água (ADA), nos três talhões houve incremento conforme aumento da profundidade, acompanhando o comportamento da argila total. Pelos baixos valores apresentados para ADA, observa-se que os solos estudados apresentam baixa capacidade de desagregação da sua estrutura, o que representa bons resultados, visto que, segundo Hamblin (1985), o processo de desagregação do solo pode causar impedimento ao crescimento das raízes das plantas e ao movimento da água no perfil do solo, limitando, assim, a produtividade das culturas.

Sobre o grau de floculação (GF), nota-se que são valores baixos, inferiores a 30% (Tabela 2). As maiores médias das porcentagens desse atributo encontram-se na superfície, acompanhadas dos menores teores de argila, indicando assim maior agregação do solo nessa região. Esses resultados são contrários aos encontrados por Portela *et al.* (2018), que ao analisarem um Latossolo Vermelho-amarelo, localizaram os menores valores de GF na superfície, onde também havia a predominância da fração areia. Esses autores defendem que os maiores valores de GF deveriam ocorrer onde há a maior fração de argila, que é a fração ativa do solo e que atua por meio do balanceamento das cargas negativas, responsável por aproximar os coloides, unificar as partículas minerais e favorecer a floculação.

Por outro lado, Lemos e Silva (2005), ao estudarem o mesmo tipo de solo, encontraram comportamento semelhante ao aqui estudado, no qual há uma redução do grau de floculação com a profundidade e aumento do teor de argila em profundidade.

## 5.2 Densidade do solo

A partir da análise estatística para a densidade do solo (Ds) verificou-se que, exceto para a camada 0,30-0,60m dos Talhões 6 e 2, os valores desse atributo diferiram significativamente nas diferentes profundidades e áreas avaliadas (Tabela 3). Todos os talhões apresentaram maiores valores de Ds nas camadas superficiais em relação às camadas subsuperficiais, sendo que os menores valores obtidos correspondem ao Talhão 5, seguindo-se do Talhão 2 e 6, nessa ordem.

**Tabela 3** - Estatística descritiva e teste de médias da densidade dos solos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m.

Parâmetros	Talhão 6		Talhão 5		Talhão 2	
	0-0,30 m	0,30-0,60 m	0-0,30 m	0,30-0,60 m	0-0,30 m	0,30-0,60 m
	$\text{g cm}^{-3}$					
Média	1,69 a	1,58 A	1,53 c	1,46 B	1,61 b	1,58 A
Mediana	1,69	1,57	1,51	1,47	1,61	1,59
Mínimo	1,51	1,35	1,40	1,16	1,46	1,43
Máximo	1,86	1,79	1,73	1,60	1,74	1,70
DP	0,09	0,11	0,09	0,11	0,08	0,07
Variância	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
CV (%)	5,32	6,71	6,00	7,23	4,70	4,36
Assimetria	-0,21	-0,03	0,74	-1,04	0,10	-0,45
Curtose	-0,39	0,09	-0,20	1,98	-0,49	0,02

DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

A média e a mediana foram iguais ou muito próximas para todas as áreas, indicando uma distribuição normal, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria e curtose próximos a zero, com exceção da camada 0,30-0,60 m do Talhão 5. A pequena amplitude dos dados, avaliada pelos valores de mínimo e máximo, mostram que os mesmos não se distanciam muito dos valores de média e mediana, medidas de tendência central, indicando menor dispersão, o que pode ser reforçado pelos baixos coeficientes de variação ( $CV < 12\%$ ), que indicam baixa variabilidade nos dados, com base na classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980).

Como já mencionado, em todas as áreas as partículas de areia concentram-se em maior quantidade na camada superficial, enquanto as partículas mais finas aumentam em profundidade. Esse comportamento, possivelmente, interferiu nos valores mais elevados de  $D_s$  das camadas superiores, uma vez que a textura tem forte influência nesse atributo. Segundo Libardi (2005), solos com maiores proporções de areia apresentam densidade superior em relação a solos com maiores proporções de argila. Isto porque nos solos argilosos, a agregação das partículas resulta na porosidade intra-agregados, que aumenta o volume de espaços porosos, principalmente os de tamanho reduzido (BRADY; WEIL, 2008), diminuindo consideravelmente a sua densidade.

Por outro lado, alguns autores defendem que o comportamento encontrado aqui, no qual ocorre a translocação e deposição de argila nos poros das camadas subsuperficiais, deveria aumentar a densidade do solo nesses horizontes, devido à diminuição da porosidade (FARIAS *et al.*, 2013; GOMES *et al.*, 2021).

Sob o mesmo ponto de vista, comparando-se os talhões, observa-se que os solos do Talhão 5, de textura argilosa, apresentaram os menores valores médios de densidade do solo ( $1,53 \text{ g cm}^{-3}$ , à 0-0,30 cm; e  $1,46 \text{ g cm}^{-3}$ , à 0,30-0,60 cm), classificados como solos moderadamente compactados ( $D_s \cong 1,50 \text{ g cm}^{-3}$ ), segundo Nosalewicz e Lipiec (2014). A camada de 0-0,30 m apresentou valores variando entre  $1,40$  e  $1,73 \text{ g cm}^{-3}$ . Neste mesmo talhão, a densidade na camada de 0,30-0,60 m, apresentou valores entre  $1,16$  e  $1,60 \text{ g cm}^{-3}$ .

Já no Talhão 2, que possui solo de textura arenosa, houve maiores valores de  $D_s$  quando comparado ao Talhão 5. A camada de 0-0,30 m apresentou valores de

1,46 a 1,74 g cm<sup>-3</sup>; enquanto na camada de 0,30-0,60 m, ocorreu variação entre 1,43 e 1,70 g cm<sup>-3</sup>. Souza *et al.* (2016), também estudando solos da classe Argissolo Amarelo distrocoeso, verificaram que a diminuição do teor de areia e aumento do teor de argila em profundidade levaram ao aumento da Ds nos horizontes mais superficiais.

Valores de Ds que indiquem a compactação do solo podem variar entre as classes texturais, dificultando a comparação entre eles. Nesse sentido, alguns autores definiram limites críticos de Ds de acordo com as diferentes texturas do solo. Reichert *et al.* (2003), por exemplo, estabeleceram que o limite crítico para solos franco-arenosos é de 1,70 a 1,80 g cm<sup>-3</sup>. Por outro lado, Marcolan e Anghinoni (2006) definiram valores limitantes de 1,45 a 1,70 g cm<sup>-3</sup> para textura franco-argilo-arenosa. Com base nisso, ao confrontar os valores obtidos neste trabalho com os considerados críticos para as respectivas classes, observa-se que a Ds média dos solos ficou abaixo do limite crítico em todas as áreas e profundidades avaliadas.

### 5.3 Porosidade total e distribuição de tamanho dos poros

Os menores valores de porosidade total do solo (Pt) foram encontrados nas camadas superficiais (Tabela 4), apresentando, como esperado, comportamento inversamente proporcional à Ds; justificado, provavelmente, pela existência em superfície de um ambiente mais perturbado.

**Tabela 4** - Estatística descritiva e teste de médias da porosidade total do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m.

Parâmetros	Talhão 6		Talhão 5		Talhão 2	
	0-0,30 m	0,30-0,60 m	0-0,30 m	0,30-0,60 m	0-0,30 m	0,30-0,60 m
	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>					
Média	0,40 c	0,39 B	0,41 a	0,43 A	0,35 b	0,37 B
Mediana	0,40	0,40	0,41	0,43	0,34	0,37
Mínimo	0,31	0,25	0,34	0,24	0,31	0,31
Máximo	0,58	0,47	0,47	0,68	0,41	0,43
Desvio Padrão	0,06	0,05	0,03	0,08	0,03	0,03
Variância	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
CV (%)	13,77	12,68	7,31	17,85	8,90	7,54
Assimetria	1,76	-1,03	-0,39	1,35	0,59	0,09
Curtose	6,02	2,09	-0,01	8,07	-0,52	0,03

DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey (P ≤ 0,05).

Observa-se que, exceto para a camada 0,30-0,60m dos Talhões 2 e 6, as porosidades totais diferiram significativamente entre si para as três áreas de estudo. Os menores valores desse atributo foram encontrados no Talhão 2, com valores médios variando entre 0,35 e 0,37  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , e os maiores valores, no Talhão 5, com valores médios entre 0,41 e 0,43  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Já o Talhão 6 apresentou seus valores médios entre 0,39 e 0,40  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Os resultados encontrados neste estudo assemelham-se aos obtidos por Silva *et al.* (2002) que acharam valores de porosidade variando de 0,42 a 0,44  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  em Argissolo Amarelo de textura média/argilosa, no município de Petrolina – PE.

Quanto à amplitude dos valores, observa-se que para o Talhão 6 os resultados variaram entre 0,25 e 0,58  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ; para o Talhão 5, entre 0,24 e 0,68  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ; e para o Talhão 2, entre 0,31 e 0,43  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Segundo Kiehl (1979), a porosidade ideal para o bom desenvolvimento das plantas deve ser próxima a 0,50  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , sendo assim, verifica-se que houve valores de porosidade total superiores ao limite crítico.

Em relação à subdivisão da porosidade total em classes de tamanho de poros, os valores da macro, meso e microporosidade são encontrados na Tabela 5. Entre as classes de poros, a microporosidade foi a predominante sobre as demais, independentemente da área e profundidade avaliadas. Verifica-se que, para as três classes, os maiores valores foram encontrados nas camadas inferiores, o que pode ter relação com a maior quantidade de argila nessa profundidade, principalmente em relação ao aumento da microporosidade (micro) no Talhão 5 (T5).

De fato, os solos do T5 têm textura mais argilosa, apresentaram as maiores médias de microporosidade, com valores de 26,94% na camada superficial e 29,84% na camada subsuperficial (Tabela 5). Já os solos do T2, de textura mais arenosa, apresentaram diferença expressiva em comparação aos outros talhões, com as menores médias de micro, sendo 21,69 e 22,50% para as camadas 0-0,30 m e 0,30-0,60 m, respectivamente. Esse comportamento corrobora o entendimento de Silva e Kay (1997), onde afirmaram que a microporosidade é fortemente influenciada pela textura do solo. No Talhão 6 observa-se que a macroporosidade (macro) diminuiu com o aumento do teor de argila do solo, variando de 6,13% (camada de 0-0,30m) a 5,80% (camada 0,30-0,60m). Além da diminuição da macro, houve aumento da micro sem alterar a porosidade total em ambas as avaliações. No Talhão 5, apesar dos valores médios entre as camadas superficial e subsuperficial

praticamente não mudarem, verifica-se um aumento entre essas camadas, variando entre 5,97% e 6,07%.

**Tabela 5** - Estatística descritiva para os valores da distribuição de tamanho de poros dos solos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m.

Parâmetros	Profundidade (m)					
	0 - 0,30			0,30-0,60		
	Macro	Meso	Micro	Macro	Meso	Micro
----- (%) -----						
<b>Talhão 6</b>						
Média	6,13	5,38	28,28	5,80	6,15	28,61
Mediana	6,18	5,80	27,25	5,83	6,21	28,81
Mínimo	3,03	1,52	22,59	2,25	4,29	25,38
Máximo	8,02	9,37	49,11	11,18	8,53	33,45
Desvio Padrão	1,12	3,01	13,98	1,80	3,12	13,79
Variância	1,25	9,05	195,35	3,24	9,73	190,14
CV (%)	18,25	55,93	49,42	31,00	50,70	48,19
Assimetria	-0,84	-0,07	2,62	0,95	0,27	0,43
Curtose	1,96	-0,13	8,37	3,71	-0,29	0,20
<b>Talhão 5</b>						
Média	5,97	7,34	26,94	6,07	6,48	29,84
Mediana	5,80	7,67	26,43	6,10	6,32	30,34
Mínimo	3,82	3,43	21,15	3,27	3,25	8,03
Máximo	10,59	10,26	33,02	8,18	8,56	59,76
Desvio Padrão	1,67	1,98	3,40	1,22	3,24	16,54
Variância	2,78	3,91	11,55	1,49	10,48	273,70
CV (%)	27,91	26,94	12,62	20,10	49,93	55,44
Assimetria	1,26	-0,36	0,22	-0,26	-0,55	1,22
Curtose	1,80	-0,54	-0,77	0,16	-0,05	6,14
<b>Talhão 2</b>						
Média	4,96	7,13	21,69	5,41	7,84	22,50
Mediana	4,96	7,08	21,22	5,41	8,62	22,55
Mínimo	3,61	3,11	18,91	3,69	3,49	18,35
Máximo	6,78	12,82	25,85	6,98	10,90	26,13
Desvio Padrão	0,80	4,08	10,36	0,73	4,19	10,73
Variância	0,63	16,67	107,41	0,53	17,53	115,18
CV (%)	16,04	57,24	47,78	13,49	53,39	47,70
Assimetria	0,24	0,45	0,58	0,09	-0,50	-0,34
Curtose	0,26	-0,23	-0,71	1,11	-1,00	0,78

Macro – Macroporosidade; Meso – Mesoporosidade; Micro - Microporosidade

Em contrapartida, o Talhão 2 apresentou os menores valores de macro entre os demais talhões, contrariando o esperado para solos dessa classe, uma vez que solos com textura arenosa possuem tendência de apresentar maior macroporosidade em relação a microporosidade. Provavelmente, ocorreu a



destruição desses macroporos, que foram convertidos à classes de menor diâmetro, como a dos microporos.

Este fato pode estar associados ao maior tempo de cultivo da área do T2, na 7ª folha, em relação desenvolvimento do canavial (da cana-planta à colheita, que ocorre na área de estudo, geralmente, entre a 7ª e 8ª folha). Neste caso, ao comparar os incrementos de compactação do T2 com os demais talhões (T6 e T5, na 2ª e 5ª folha, respectivamente) pode-se concluir que, após sete anos sob colheita contínua, usando-se a queima da palha, associada à entrada de máquina para transporte da produção, o solo do T2 teve maior destruição dos macroporos (Tabela 5), restando poros menores, que têm distribuição mais uniforme.

Pode-se verificar que, com a redução da Ds nos talhões 5 e 2 (Tabela 3), houve o aumento da macroporosidade, fato este ocorrido provavelmente devido ao maior tempo de cultivo nas áreas T5 (5ª folha) e T2 (7ª folha), que contribuem para um maior aporte de raízes. Esse entendimento é reforçado por Zhao *et al.* (2017), ao defenderem que o maior desenvolvimento radicular aumenta a macroporosidade.

No que concerne aos mesoporos, observa-se, na área T5, uma redução dos valores médios à medida que aumenta a profundidade, diferenciando-se das outras duas áreas (T6 e T2), que apresentaram aumento dos resultados com a profundidade (Tabela 5). Para o Talhão 6 observou-se que a área apresentou o menor volume desse tipo de poro, com valores que variaram de 5,38 a 6,15%. Já o Talhão 2, de modo geral, apresentou maior quantitativo na camada 0,30-0,60 m, o que pode ter relação com sua textura mais arenosa em relação às verificadas nos demais talhões.

Em relação aos coeficientes de variação (CV), para a microporosidade, com exceção da camada 0-0,30 m do Talhão 5, todos os demais pontos apresentaram moderada variabilidade dos dados. A mesma camada também apresentou os menores valores de CV para a mesoporosidade. No entanto, para os demais pontos, os maiores valores de CV foram encontrados para esse atributo, indicando maior variabilidade dos resultados encontrados.

#### **5.4 Condutividade hidráulica saturada dos solos**

Na Tabela 6 está disposta a estatística descritiva da condutividade hidráulica saturada dos solos ( $K_{sat}$ ) das três áreas experimentais estudadas. Observa-se que essas áreas apresentaram médias variando entre 35,98 e 52,66 mm h<sup>-1</sup> na camada

superficial; e de 36,55 a 71,87 mm h<sup>-1</sup>, na camada subjacente. Já avaliando-se os talhões, verifica-se que, exceto para o Talhão 5, não houve variação significativa entre as médias.

Considerando os valores máximos e mínimos de cada área e com base na classificação do Soil Survey Manual (2017) quanto à Ksat, os valores em cada talhão foram divididos em três grupos, tendo-se aqueles: moderadamente baixo (0,36 a 3,6 mm h<sup>-1</sup>); moderadamente alto (3,6 a 36 mm h<sup>-1</sup>); e alto (36 a 360 mm h<sup>-1</sup>).

**Tabela 6** - Estatística descritiva e teste de médias para condutividade hidráulica saturada do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m.

Parâmetros	Talhão 6		Talhão 5		Talhão 2	
	0-0,30 m	0,30-0,60 m	0-0,30 m	0,30-0,60 m	0-0,30 m	0,30-0,60 m
	----- mm h <sup>-1</sup> -----					
Média	42,73 a	71,87 A	35,98 b	36,55 B	52,66 a	54,73 A
Mediana	39,11	66,13	30,54	23,09	42,25	47,85
Mínimo	0,66	1,25	10,58	4,46	14,33	8,95
Máximo	124,78	156,41	108,61	114,69	124,18	108,20
DP	35,92	48,05	25,67	31,29	33,21	28,98
Variância	1290,11	2308,50	659,08	978,93	1102,68	839,63
CV (%)	84,06	66,85	71,36	85,60	63,06	52,95
Assimetria	0,78	0,36	1,40	1,50	0,77	0,35
Curtose	-0,05	-0,92	1,94	1,58	-0,37	-0,67

DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras (minúsculas, para camada 0-0,30 m; e maiúsculas, para 0,30-0,60 m) não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey (P ≤ 0,05).

No Talhão 5, caracterizado pelo maior teor de argila entre as demais áreas, verifica-se uma tendência de redução do valor da Ksat quando comparado com os outros talhões. Da mesma forma, observa-se que os maiores valores estão relacionados aos talhões com maiores teores de areia. Segundo Bocuti *et al.* (2020), isso acontece porque solos com granulometria mais grossa tendem a apresentar poros de diâmetros maiores, o que possibilita maior Ksat. De maneira mais aprofundada, Suzuki *et al.* (2012), explicam que a argila possui forma laminar e, com aumento do seu teor, ocorre um melhor ajuste entre as partículas, o que promove a redução da macroporosidade e aumento da microporosidade. Por outro lado, a areia possui um formato irregular, dificultando o ajuste entre as partículas, havendo formação de macroporos nos espaços onde não ocorre contato entre elas.

De maneira geral, observa-se que em todas as áreas de estudo houve aumento da Ksat com a profundidade do perfil. Acontece que em algumas áreas as

camadas subjacentes estão mais compactadas que as superficiais, revelando, dessa forma, um comportamento oposto, uma vez que a Ksat está inversamente relacionada com a compactação do solo. Além disso, como já comentado, em todas as áreas de estudo houve aumento da fração argila com o aumento da profundidade. Nesse sentido, o aumento nas frações mais finas do solo deveria ocasionar redução na Ksat, uma vez que houve obstrução dos poros. Este fenômeno contraditório pode ser explicado pela possível existência de fissuras ou caminhos preferenciais nas amostras em que foram realizados os ensaios, devido à presença de raízes e da atividade da fauna edáfica, conforme Silva *et al.* (2009), que acabam resultando em tendência de superestimação do Ksat. Comportamento semelhante ao relatado neste trabalho foram observados por Silva *et al.* (2019), ao caracterizarem a variabilidade espacial da Ksat em Latossolo Amarelo Distrocoeso dos Tabuleiros Costeiros do Recôncavo Baiano.

No que diz respeito à relação entre os valores de Ksat e os demais atributos do solo avaliados, observa-se que o aumento da porosidade, bem como a diminuição proporcional da densidade do solo em profundidade, contribuíram para o maior fluxo de água ao longo do perfil.

Em cada área, analisando os pontos de amostragem individualmente, verifica-se uma acentuada variação nos valores de Ksat, distribuídos por toda a extensão dos talhões, mesmo que em pontos muito próximos. De acordo com Silva *et al.* (2019), essa variação pode ser atribuída à fatores intrínsecos ou extrínsecos do solo. Segundo os autores, os fatores intrínsecos estão relacionados à formação do solo, enquanto os fatores extrínsecos estão relacionados às práticas de manejo e uso da terra, uso de máquinas e ferramentas.

Ainda segundo Siqueira *et al.* (2019), é possível que a grande variabilidade da Ksat também se deva ao tamanho das amostras não deformadas coletadas ( $\cong 100 \text{ cm}^3$ ). Os autores citam os estudos realizados por Bagarello e Provenzano (1996) para afirmar que amostras maiores produzem estimativas com valores e variabilidade menores do que as amostras obtidas com cilindros menores, devido ao fato de que nas pequenas amostras, o fluxo preferencial aumenta significativamente.

Sobre a análise estatística (Tabela 6), observa-se que a média e a mediana não se encontram muito próximas, sendo isso um indicativo de que os dados não estão distribuídos simetricamente ao redor dos seus valores. Analisando-se a amplitude da variação dos dados a partir dos valores máximo e mínimo, verifica-se

que a diferença entre os valores extremos é bastante acentuada, com os dados se distanciando muito das medidas de tendência central, o que reforça a hipótese de maior dispersão.

Adotando-se o critério de classificação proposto por Warrick e Nielsen (1980) para o coeficiente de variação (CV), verificou-se que os valores de Ksat apresentaram alta variabilidade, com 85,60% na camada 0,30-0,60m do Talhão 5.

Os valores aqui encontrados concordam com a maioria dos estudos que mostraram a alta heterogeneidade deste atributo (SANTOS *et al.*, 2012; FONTANA *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2019), e indicam que o uso de valores médios pode provocar erros consideráveis na estimativa do fluxo de água desse solo.

Além da classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), outros autores, a exemplo de Miqueloni *et al.* (2015), usam valores de CV acima de 65% para indicar alta variabilidade. Neste contexto, observa-se que os valores de CV estão acima de 65%, exceto para os solos do Talhão 2 (63,06 e 52,95%, para 0-0,30 e 0,30-0,60m respectivamente). Esse valor limite é usado pelos autores para indicar alta heterogeneidade da Ksat. Assim, a área do Talhão 2 (T2) pode ser considerada como a mais homogênea entre as três, pois foi a que apresentou menor variabilidade nos resultados de Ksat.

Ainda sobre os menores valores dos macroporos no T2 (Tabela 5), verifica-se também que nesse talhão ocorrem, em geral, os maiores valores de Ksat, o que, por suposição, seria um comportamento não esperado. Entretanto, autores como Mossadeghi-Björklund *et al.* (2016) afirmam que os efeitos da compactação do solo no fluxo preferencial da água podem ser parcialmente atribuídos a uma redução no volume e conectividade dos macroporos. Nesse caso, a compactação do solo pode aumentar a força do fluxo preferencial da água com os poucos macroporos contínuos restantes no solo, justificando os maiores valores da Ksat. Além disso, o efeito do tráfego promovido pelas máquinas durante a colheita, ao longo dos sete anos de cultivo no T2, que tem maior tempo de cultivo em relação ao T6 (2ª folha) e T5 (5ª folha), pode ter contribuído para um maior aporte de raízes (canais radiculares); promovendo o movimento rápido da água, formando fluxo preferencial, o que resulta em maiores valores de Ksat (CHENG *et al.*, 2017).

## 5.5 Resistência do solo à penetração de raízes

Os valores médios de umidade gravimétrica (U) aumentaram em todas as áreas com a profundidade, independentemente de ser determinada em campo ou em laboratório (Tabela 7); em contrapartida, os valores médios de RP tiveram comportamento diferente.

**Tabela 7** - Estatística descritiva e teste de médias para umidade e resistência à penetração de raízes do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m.

Parâmetros	Dados de campo				Dados de laboratório			
	0 - 0,30 m		0,30 - 0,60 m		0 - 0,30 m		0,30 - 0,60 m	
	U <sub>C</sub> (%)	RP <sub>C</sub> (MPa)	U <sub>C</sub> (%)	RP <sub>C</sub> (MPa)	U <sub>L</sub> (%)	RP <sub>L</sub> (MPa)	U <sub>L</sub> (%)	RP <sub>L</sub> (MPa)
Talhão 6								
Média	11,08 a	1,42 b	13,76 A	1,75 A	18,80 c	0,88 a	18,80 AB	0,52 B
Mediana	11,08	1,36	13,73	1,77	17,72	0,58	19,26	0,33
Mínimo	8,19	0,69	9,74	1,01	13,00	0,17	7,00	0,10
Máximo	12,70	2,12	15,86	2,34	32,59	3,43	26,68	2,31
DP	1,02	0,40	1,25	0,31	4,78	0,83	4,41	0,55
Variância	1,04	0,20	1,57	0,10	22,87	0,70	19,42	0,30
CV (%)	9,19	28,12	9,12	17,71	25,44	95,11	23,44	106,08
Assimetria	-0,85	0,12	-0,65	0,02	1,67	2,22	-1,02	2,57
Curtose	0,55	-0,86	1,54	-0,26	3,77	5,50	2,75	7,49
Talhão 5								
Média	11,27 a	1,38 b	13,30 A	1,61 AB	19,22 a	0,68 a	23,30 A	0,63 A
Mediana	11,69	1,34	13,41	1,56	19,03	0,59	22,41	0,63
Mínimo	7,84	0,56	11,15	1,10	14,22	0,18	5,02	0,21
Máximo	13,34	2,46	15,55	2,42	26,21	1,48	44,06	1,13
DP	1,48	0,45	1,03	0,31	3,87	0,40	8,13	0,25
Variância	2,19	0,2	1,05	0,10	14,94	0,20	66,06	0,06
CV (%)	13,12	32,80	7,71	19,21	20,11	58,93	34,88	39,58
Assimetria	-0,92	0,58	-0,30	0,64	0,50	1,05	0,46	0,14
Curtose	0,04	0,14	-0,24	0,46	-0,72	0,11	3,27	-0,47
Talhão 2								
Média	6,69 b	2,40 a	10,00 B	2,30 B	15,86 b	0,48 a	16,15 B	0,55 AB
Mediana	6,58	2,34	9,85	2,15	15,42	0,44	14,62	0,43
Mínimo	4,61	0,65	6,64	0,96	9,98	0,14	10,10	0,12
Máximo	9,98	4,55	13,74	5,07	22,99	1,06	23,88	1,38
DP	1,34	1,01	1,65	0,76	4,29	0,33	4,57	0,34
Variância	1,81	1,0	2,71	0,58	18,44	0,10	20,85	0,12
CV (%)	20,10	42,00	16,47	33,04	27,08	69,47	28,27	62,63
Assimetria	0,56	0,47	0,31	1,48	0,23	0,60	0,51	0,98
Curtose	0,02	-0,20	-0,07	3,82	-1,26	-1,10	-1,17	0,78

RPC - Resistência do solo à penetração medida em campo; RPL - Resistência do solos à penetração medida em laboratório; U<sub>C</sub> – Umidade gravimétrica determinada com amostras úmidas diretamente do campo; U<sub>L</sub> – Umidade gravimétrica determinada em laboratório; DP – Desvio padrão;

CV – Coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras nas mesmas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

Para os solos dos Talhões 6 e 5, enquanto os valores de  $RP_C$  aumentaram em profundidade (T6: 1,42 e 1,75 MPa; T5: 1,38 e 1,61 MPa) os da  $RP_L$  diminuíram (T6: 0,88 e 0,52 MPa; T5: 0,68 e 0,63 MPa). Por outro lado, no Talhão 2, o comportamento foi o inverso aos do T6 e T5, tendo valores de  $RP_C$  diminuindo em profundidade (2,40 e 2,30 MPa para 0-0,30 e 0,30-0,60 m, respectivamente); diferente dos dados obtidos de  $RP_L$ , que aumentaram (0,48 e 0,55 MPa para 0-0,30 m e 0,30-0,60 m, respectivamente).

Percebe-se que, exceto para as medições realizadas em laboratório na camada 0-0,30m, todas as médias diferiram significativamente entre os talhões, sendo que em algumas medições houve decréscimo com a profundidade e, em outras, aumento. Por outro lado, averiguando-se as camadas individualmente, nota-se que o aumento da RP em profundidade acompanhou o acréscimo do teor de argila. Resultados semelhantes aos aqui encontrados foram observados por Souza *et al.* (2015), ao evidenciarem que aumento do teor de argila influenciou significativamente para o aumento da resistência.

Quanto aos valores obtidos pelos penetrômetros (campo e laboratório), observa-se que o penetrômetro de campo apresentou valores de RP superiores quando comparado com os valores via penetrômetro de bancada (Tabela 7). Esse comportamento se deve à diferença na umidade do solo durante a realização dos ensaios, que foram superiores quando determinados em laboratório. Além disso, ao comparar-se os dados de campo e de laboratório, é preciso considerar que em campo houve a definição de uma única camada para realização das medições, com uma amplitude a cada centímetro de solo. Já em laboratório, os resultados foram avaliados em duas camadas, das quais, apenas três centímetros puderam ser considerados.

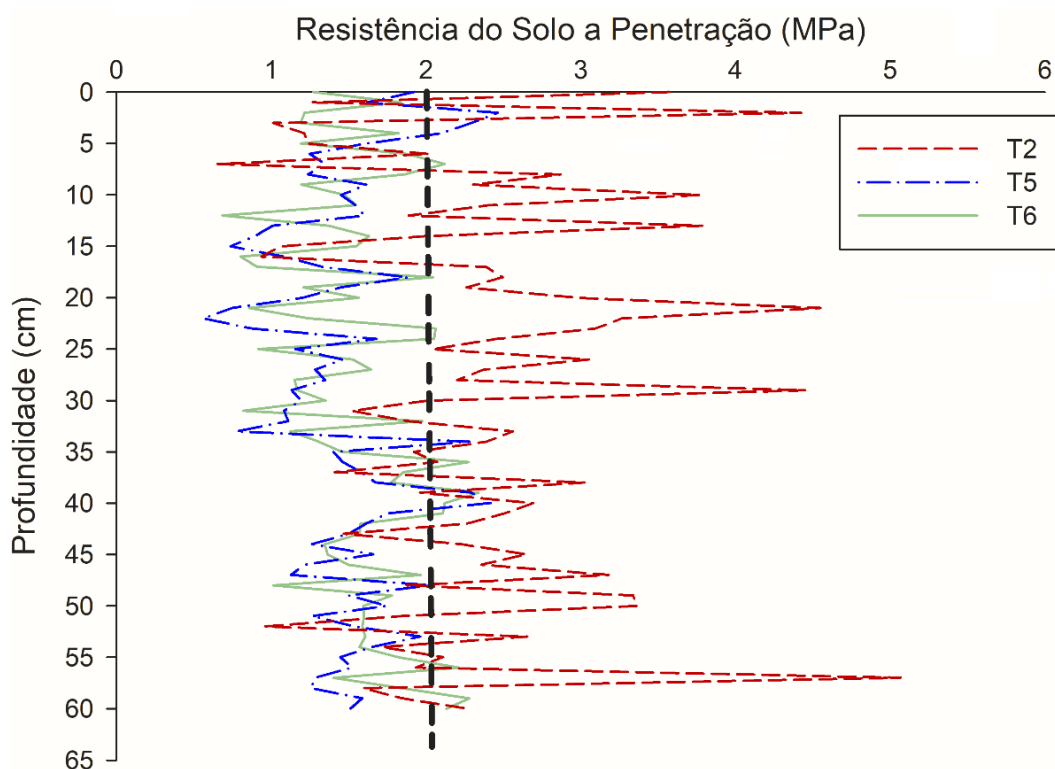
Neste caso, os valores das umidades gravimétricas determinados em laboratório ( $U_L$ ) foram obtidos após equilíbrio dos potenciais, isto é, -1; -6 e -10 kPa, sendo este último assumido como umidade na capacidade de campo para solos de texturas mais arenosas, como no caso dos solos aqui estudados. Provavelmente, os dados de umidade obtidos em campo ( $U_C$ ), foram determinados em potenciais acima da capacidade de campo; estando, portanto, o solo mais seco quando comparado

com as condições de laboratório (mais úmido), o que justifica os elevados valores de  $RP_C$ , acima do valor crítico (2,0 MPa), como também discutido em Bengough e Mullins (1990).

A avaliação da RP em áreas sem a padronização da umidade dos solos (difícil em condições de campo) têm mascarado os resultados, levando à interpretações equivocadas, como já exposto por outros autores. Neste sentido, Busscher (1990) comenta que, como a água do solo pode afetar significativamente a RP, muitas vezes é difícil determinar se as diferenças na resistência do solos à penetração das raízes são causadas pelo conteúdo de água do solo ou pelo tratamento (manejo).

Vale ressaltar que, analisando a variação no teor de água entre as camadas nas áreas, percebe-se que, embora a  $U_C$  aumente em profundidade, há pouca diferença entre elas; o que indica que as alterações nos valores de  $RP_C$  teve pouca influência das respectivas umidades do solo. Desse modo, pode ser observado na Figura 9 que o comportamento da  $RP_C$  não depende apenas da  $U_C$ , e deve, provavelmente, estar também associada, a outros atributos físicos do solo.

**Figura 9** - Valores de resistência à penetração de raízes em campo ao longo da profundidade dos solos estudados: T2, área no Talhão 2; T5, área no Talhão 5; T6, área no talhão 6.



Fonte: Autora (2021).

Pode-se observar que os maiores valores de  $RP_C$  foram observados nos solos do Talhão 2 (T2). Neste caso, os resultados de  $RP_C$  podem ser explicados pelos maiores valores da fração areia, que no T2 foi de 79,35%, aliados aos menores teores de silte e argila total, com 5,55 % e 15,10%, respectivamente (Tabela 2).

De fato, solos que têm na sua constituição grande percentuais de areia, possuindo maiores valores de RP, são mais compactados, apresentando menores volumes de macroporos, como pode ser comprovado na Tabela 5, que apresenta a distribuição das classes de poros. Neste sentido, nota-se que os maiores valores de RP para o Talhão 2 estão associados aos mais baixos valores de macroporos (4,96 e 5,41 %, para as profundidades 0-0,30m e 0,30-0,60m, respectivamente), justificando, também, as mais baixas umidades (Tabela 7).

Ainda em relação aos resultados de laboratório, ao relacionar a  $U_L$  com as frações granulométricas, nota-se que os solos do Talhão 2, que têm o menor percentual de argila, apresentaram os menores valores de  $U_L$ . Este comportamento pode ser devido ao menor volume de microporos desses solos, pois são poros responsáveis pela maior retenção de água.

Analisando-se o conjunto de dados de campo referente ao Talhão 6, observa-se que houve estratificação dos valores de RP com o aumento da profundidade, onde os solos da camada 0-0,30 m apresentaram valores médios inferiores (1,42 MPa) aos da camada subjacente (1,75 MPa). O mais alto valor para os 36 pontos de amostragem nesse talhão foi encontrado na camada mais subjacente, com 2,34 MPa; enquanto o menor valor medido foi de 0,69 MPa (camada 0-0,30 m).

Condição semelhante foi observada para o Talhão 5, o qual apresentou valores médios de  $RP_C$  entre 1,38 e 1,61 MPa para as camadas de 0-0,30 m e 0,30-0,60 m, respectivamente. Nesse talhão, o valor mínimo e máximo de  $RP_C$  foram encontrados na camada mais superficial, apontando 0,56 MPa e 2,46 MPa, nessa ordem (Tabela 7).

De maneira geral, os valores máximos de  $RP_C$  para os solos dos talhões estudados são considerados altos, atingindo 2,12 MPa no Talhão 6 (camada 0-0,30 m); 2,46 MPa no Talhão 5 (camada 0-0,30 m); e 5,06 MPa no Talhão 2 (camada 0,30-0,60 m), indicando que, dependendo da umidade, a RP nessas áreas pode ser restritiva ao desenvolvimento das plantas, pois a faixa de variação está acima do valor de 2 MPa, considerado crítico (TORMENA *et al.*, 1998).



Assim, para o Talhão 2, observa-se que, para as medições realizadas em campo, os solos apresentam as maiores médias de RP dentre as áreas, atingindo o valor de 5,07 MPa na camada de 0,30-0,60 m, indicando um estado de solo mais compactado (Figura 7). Essa medição também apresenta a maior variação do desvio padrão ao longo do perfil, indicando alta variabilidade vertical dos dados. Esses valores mais elevados de  $RP_C$  podem estar relacionados ao fato dessa área estar na sua 7ª folha de cultivo, tendo dessa forma, maior interferência do manejo e preparação do solo, com efeitos acumulativos pelos anos de uso de maquinários agrícolas a cada colheita, desde o primeiro corte (cana-planta), até o último (entre a 7ª e 8ª folha), quando então o canavial é renovado em novo plantio.

Em contrapartida, para as medições realizadas em laboratório ( $RP_L$ ), este talhão foi o que apresentou as menores médias, com valores de 0,55 e 0,48 MPa para as camadas de 0-0,30 m e 0,30-0,60 m, respectivamente.

Sabe-se que a presença de elevados teores de argila confere ao solo maior nível de resistência à penetração (MOLIN *et al.*, 2012). No entanto, apesar de apresentar o maior percentual dessa fração, o Talhão 5 foi o que apresentou as menores médias de  $RP_C$ . Por outro lado, ao se analisar os dados obtidos em laboratório, percebe-se que, com exceção da camada 0-0,30 m do talhão 6, esse talhão apresentou as maiores médias em relação aos demais, com valores mínimo e máximo variando entre 0,18 e 1,48 MPa.

Dentre os três talhões, o T6 é o que apresenta uma textura com valores de porcentagem de areia e argila intermediários, quando comparados às outras áreas (Tabela 2). Verifica-se que quando comparado ao Talhão 5, que possui textura mais argilosa, essa área comportou-se de forma semelhante em todas as camadas estudadas. Comportamento semelhante foi observado por Lima *et al.* (2013) ao pesquisarem sobre a compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar.

Outra constatação refere-se à dispersão dos valores, evidenciando que a variação das medidas foi maior quando realizadas com o penetrômetro de bancada, o que indica uma menor precisão dos dados obtidos. Analisando-se o conjunto de dados da RP, nota-se que para os dados de laboratório os coeficientes de variação (CV%), em ambas as profundidades, variaram de 39,58 a 106,08%, situando-se na classe de média a alta variabilidade, segundo Warrick e Nielsen (1980). Já para os resultados de campo, esses valores ficaram entre 17,71 e 42,00%, indicando

moderada variação dos dados em relação à média, segundo os mesmos autores. Esses valores de CV já eram esperados, uma vez que a RP possui uma alta variabilidade intrínseca, sendo influenciada por mudanças ao longo do perfil do solo, principalmente as relacionadas ao teor de argila, umidade, densidade e porosidade (LEIVA *et al.*, 2021).

### 5.5.1 Modelagem das equações referentes às curvas de resistência à penetração

Na Tabela 8 encontram-se as equações de regressão obtidas por meio de análise de regressão e também dos parâmetros estatísticos PBIAS, RMSE E MAE. Quanto mais próximo de zero for o valor do coeficiente PBIAS melhor o modelo representará a realidade. Desse modo, para as equações que estimam a resistência à penetração construídas a partir dos dados de campo, verifica-se que o Talhão 6 foi o que apresentou melhores resultados. Já os Talhões 2 e 5 apresentaram valores mais elevados, sendo considerados menos adequados para a estimativa quando comparados ao Talhão 6. Segundo Gupta *et al.* (1999), valores positivos indicam que a simulação subestimou os valores observados, enquanto valores negativos sugerem uma superestimativa. Dessa forma, verifica-se que para as camadas superficiais do Talhão 2 e 5 houve uma sub e superestimativa, respectivamente.

**Tabela 8** – Modelagem das equações referentes às curvas de resistência à penetração, determinadas a partir dos dados de campo ( $RP_C$ ) e de laboratório ( $RP_L$ ).

Talhão / Profundidade (m)	Dados de campo			
	Equação de regressão	RMSE (MPa)	PBIAS (%)	MAE (MPa)
T2 0-0,30	$RP_C = 4,429 - 0,3040U$	0,86	6,13	0,74
T2 0,30-0,60	$RP_C = 3,951 - 0,1662U$	0,72	-2,96	0,55
T5 0-0,30	$RP_C = 3,565 - 0,1927U$	0,32	-6,78	0,26
T5 0,30-0,60	$RP_C = 3,501 - 0,1426U$	0,24	-2,41	0,19
T6 0-0,30	$RP_C = 2,645 - 0,1104U$	0,36	1,92	0,29
T6 0,30-0,60	$RP_C = 2,033 - 0,0214U$	0,30	2,73	0,22
Talhão / Profundidade (m)	Dados de laboratório			
	Equação de regressão	RMSE (MPa)	PBIAS (%)	MAE (MPa)
T2 0-0,30	$RP_L = 1,624 - 0,04495U$	0,15	0,00	0,13
T2 0,30-0,60	$RP_L = 1,466 - 0,03619U$	0,24	-0,03	0,20
T5 0-0,30	$RP_L = 1,031 - 0,01174U$	0,39	-0,04	0,30
T5 0,30-0,60	$RP_L = 0,558 + 0,00217U$	0,24	-0,01	0,20
T6 0-0,30	$RP_L = 3,031 - 0,06869U$	0,68	0,05	0,48
T6 0,30-0,60	$RP_L = 1,622 - 0,03797U$	0,49	0,07	0,31

Em termos dos demais índices estatísticos, RMSE e MAE, ambos são interpretados considerando-se que, quanto menores seus valores, melhores os resultados. Sendo assim, mais uma vez, o Talhão 6 apresentou um melhor desempenho. Almeida *et al.* (2012), ao analisarem as diferentes equações para a curva de resistência do solo à penetração, obtidas para um Latossolo Vermelho distrófico típico, também encontraram menores valores de RMSE para solos de textura média quando comparados a solos de textura mais argilosa.

Os melhores resultados para o Talhão 6 possivelmente estão relacionados ao menor tempo de cultivo da área (2ª folha), que apresentam menor influência do efeito do tráfego de máquinas. Por outro lado, a textura mais arenosa e o maior período de uso e ocupação no Talhão 2 (7ª folha), contribuíram negativamente para o desempenho dos modelos na área.

Ao se compararem os modelos obtidos para as diferentes profundidades, observa-se que as equações de regressão para as camadas subjacentes mostraram os melhores resultados para a predição da RP, quando comparados aos das camadas superficiais. É possível se observar que justamente nessas camadas mais profundas foram exibidas as maiores umidades, podendo provavelmente ter influenciado nesses resultados.

Quanto aos modelos propostos para os dados de laboratório, os valores encontrados para o parâmetro estatístico PBIAS demonstraram um melhor desempenho das equações na estimativa da RP em relação às construídas a partir dos dados de campo. Esses resultados provavelmente se devem ao maior controle e padronização da umidade antes dos ensaios da RP em laboratório, em que amostras contidas nos anéis (conjuntos anel-amostra) tiveram suas umidades equilibradas em diferentes tensões (-1, -6 e -10 kPa).

Quanto ao RMSE e MAE, é importante ressaltar que esses parâmetros são vantajosos em termos de interpretação, pois apresentam as mesmas dimensões que os dados experimentais. Nesse sentido, observam-se baixos valores, indicando uma boa concordância entre os valores de RP estimados pelas equações e os valores observados em campo, e, conseqüentemente, a capacidade de estimativa desses modelos; sendo que todos subestimaram os valores observados. Ao se comparar os coeficientes estatísticos das equações apresentadas, observa-se que o melhor ajuste foi encontrado para o Talhão 2, seguido pelos Talhões 5 e 6.

Como já comentado anteriormente, o valor de resistência do solo à penetração de 2 MPa tem sido frequentemente usado como crítico para o crescimento das plantas (TORMENA *et al.*, 1998; BENGOUGH *et al.*, 2011). Analisando-se os modelos obtidos, observa-se que, com exceção da equação referente à camada 0,30-0,60 m do Talhão 5, para os dados de laboratório, as equações de cada uma das áreas experimentais indicam que o aumento do conteúdo de água no solo reduz o valor do coeficiente linear, implicando menores valores de RP. Dessa forma, presume-se que quanto mais próximo à capacidade de campo, menor será o intervalo da U, sem que haja valores de RP que causem restrições mecânicas para o crescimento de raízes. No entanto, observa-se que, para os dados de campo, o secamento do solo ocasiona restrições devido aos valores de  $RP > 2$  MPa.

Em relação aos valores dos coeficientes lineares (valor do intercepto Y) das equações de regressão elaboradas a partir dos dados de campo ( $RP_C$ ), estes variaram entre 4,429 (T2 0-0,30 m) a 2,033 (T6 0,30-0,60 m), sendo portanto maiores que os das equações com dados de laboratório, que ficaram na faixa entre 3,031 (T6 0-0,30 m) e 0,558 (T5 0,30-0,60 m).

A ocorrência dos maiores valores do coeficiente linear no Talhão 2 (4,429, para camada 0-0,30 m; e 3,951, para 0,30-0,60 m) só confirmam as discussões onde se justificam que, neste talhão, a baixa umidade, associada a menor quantidade de macroporos, sendo área solos de textura mais arenosa, promovem os maiores valores de RP entre as áreas estudadas.

Desse modo, esses resultados sugerem que as equações para estimativa da RP com dados de campo têm uma maior amplitude de uso em relação aos valores de RP; diferentemente dos dados de laboratório, que ficaram limitados a uma faixa mais estreita. De todo modo, pode-se observar que, para os dados oriundos do Talhão 6, na camada superficial (0 -0,30 m), foi o único caso em que a equação com os dados de laboratório ( $RP_L = 3,031 - 0,06869 U$ ) teve melhor representatividade que a sua correspondente em campo ( $RP_C = 2,645 - 0,1104 U$ )

Quando se propõe o uso de equações para estimativa de um atributo, buscam-se aquelas que, além de precisas, sejam simples, com poucas variáveis. Dessa forma, foram escolhidas equações lineares de fácil entendimento para explicar a relação entre RP e U. Os resultados deste estudo indicaram que, utilizando-se dos modelos matemáticos, foi possível desenvolver equações para

corrigir os valores de RP para valores de umidade de referência, o que possibilita a padronização desse atributo. Assim, por meio do conhecimento prévio da RP, pode-se monitorar qual é a umidade crítica para que não haja valores restritivos ao desenvolvimento radicular.

Desta forma, torna-se possível conhecer o momento e o volume ideal para a prática da irrigação, já que com base na avaliação da RP, e o respectivo conteúdo de água no solo, pode-se estimar a eficiência de um sistema de irrigação mais facilmente. De posse desse conhecimento e de sua aplicabilidade, pode-se promover o desenvolvimento da cultura de modo sustentável, sendo uma maneira de cuidar do meio ambiente, tornando o uso da água mais racional.

## **6. CONCLUSÕES**

- Os valores de resistência do solo à penetração de raízes (RP), tanto de campo como em laboratório, são úteis para diagnosticar as limitações físicas do solo, sendo neste estudo a área do Talhão 2 a que apresentou piores condições;
- As equações para simulação da RP são úteis para estimar os níveis de alterações estruturais dos solos estudados;
- Os atributos físico-hídricos dos solos que apresentaram maior influência sobre a RP foram as frações areia e argila, macroporosidade e condutividade hidráulica saturada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B. G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz. Piracicaba, São Paulo, Brasil. Tese. 2008.

ALMEIDA, B. G.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ASSUNÇÃO, T. F., MANTOVANELLI, B. C.; ARAÚJO FILHO, J.C.; PROVENZANO, G. Spatiotemporal variability of soil penetration resistance in a field cultivated with sugarcane under conventional tillage system in northeast Brazil, EGU General Assembly 2020, Online, 2020, EGU2020-5718, DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5718>.

ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. **Porosidade**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017a. p.82-94.

ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. **Densidade do solo**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017b. p.65-75.

ALMEIDA, C. X.; CENTURION, J. F.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C.; ANDRIOLI, I. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36(1), 1745-1755. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600003>

AMPOORTER, E.; SCHRIJVER, A.; NEVEL, L.V.; HERMY, M.; VERHEYEN, K. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. Annals of Forest Science, 69, 533–542, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0199-y>

ANA - Agência Nacional de Águas. Levantamento da cana-de-açúcar irrigada e fertirrigada no Brasil. 2.ed. Brasília: ANA, 2019. 53p.

AQUINO, G.S.; MEDINA, C.C.; PORTEIRA JUNIOR, A.L.; SANTOS, L.O.; CUNHA, A.C.B.; KUSSABA, D.A.O.; SANTOS JÚNIOR, J.H.; ALMEIDA, L.F.; SANTIAGO, A.D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 50(12), 1150-1159, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001200004>.

ARRUDA, A.B.; SOUZA, R.F.; BRITO, G.H.M.; MOURA J.B.; OLIVEIRA, M.H.R.; SANTOS, J.M.; SILVA, S.D. Resistance of soil to penetration as a parameter indicator of subsolation in crop areas of sugar cane. Scientific Reports, 11(1), 1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91186-3>

ASSIS, R.L.; LAZARINI, G.D.; LANCAS, K.P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 29(4), 558-568, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000400006>

BAESSO, M. M.; MENEZES, T.A.V.; MODOLO, A.J.; ROSA,R.G.; ZUIN, L. F. S. Comparação entre três penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração em um latossolo vermelho eutroférico. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 14(2), 101–110, 2020. DOI: <https://doi.org/14.101.10.18011/bioeng2020v14n2p101-110>.

BAGARELLO, V.; PROVENZANO, G. Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 39(1), 153-159, 1996. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.27493>

BALCAZAR, N.L.; ROLIM, M.M.; OLIVEIRA, V.S.; TAVARES, U.E. Benefícios do monitoramento da condição física do solo com penetrógrafo. *Revista Cultivar*, 12, 18-20. 2014.

BARAN, R.; BASSEREAU, D.; GILLET, N. Measurement of available water and root development on an irrigated sugar cane crop in the Ivory Coast. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, 15, 726– 735, 1974.

BARTZEN, B.T.; HOELSCHER, G.L.; RIBEIRO, L.L.O.; SEIDEL, E.P. How the Soil Resistance to Penetration Affects the Development of Agricultural Crops?. *Journal of Experimental Agriculture International*, 30(5), 1-17, 2019. DOI: <https://doi.org/10.9734/JEAI/2019/46589>

BENGHOUG, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, 41, 341-358, 1990.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>.

BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Etanol 2G: inovação em biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/etanol-2g-inovacao-biocombustiveis#:~:text=Os%20biocombust%C3%ADveis%20est%C3%A3o%20presentes%20na,de%20cana%2Dde%2Da%C3%A7%C3%BAcar>> Acesso em novembro 2020.



BOCUTI, E.D.; AMORIM, R. S. S.; RAIMO, L. A. L.; MAGALHÃES, W. A.; AZEVEDO, E. C. Condutividade hidráulica efetiva e sua relação com os demais atributos dos solos do Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(6), 357-363, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n6p357-363>

BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, Madison, 46(1), 1-37, 1991.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The nature and properties of soils*. 14. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008. 600p.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33, 519-524, 1990. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.31360>.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F.L.F.; CASAGRANDE, A.A.; SILVA, A.R.; MUTTON, M.A.; CENTURION, J.F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. *Engenharia Agrícola*, 25(1), 189-198, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000100021>

CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A.; BERGAMIM, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 8, 305-310. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v8i2a2091>

CASTRO, A.M.C; SANTOS, K.H.; MIGLIORANZA, E.; GOMES, C.J.A.; MARCHION E, M.S. Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar. *Evaluation*. *Revista Agrária*, 6(22), 415–422. 2013. ISSN: 1984-2538

CHAMEN, W.C.T.; MOXEY, A.P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLET, P.S.D. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, 146, 10-25, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.011>.

CHENG, Y.; OGDEN, F. L.; ZHU, J. Earthworms and tree roots: a model study of the effect of preferential flow paths on runoff generation and groundwater recharge in steep, saprolitic, tropical lowland catchments. *Water Resour. Res.* 53, 5400–5419. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>.

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*, 267, 156–168, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L.M.M.; NORONHA, R. H. F.; PARIZ, C. M.; LIMA, R. C. Spatial and linear correlations between soil and corn. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(3), 765-773, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300008>

CLEMENTE, P.R.A.; BEZERRA, B.K.L; SILVA, V.S.G.; SANTOS, J.C.M; ENDRES, L. Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 47, 110-117, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4742563>.

COLOMBI, T.; TORRES, L.C.; ACHIM, W.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Science of The Total Environment*, 626, 1026-1035, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>.

CONAB, 2021. Cana-de- açúcar: acompanhamento da safra brasileira 2020/2021. *Cia. Nac. Abast. V. 7, n.4, p. 62*.

CURY, T.N.; DE MARIA, I.C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1929-1938, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600027>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.

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*, 187, 60-71, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>

FALKER. Medidor automatizado de compactação do solo. Disponível em: <https://www.falker.com.br/produto-solotrack-medidor-automatizado.php>>. Acesso em Janeiro 2022.

FARIAS, I.L.; PACHECO, E.P.; VIÉGAS, P.R.A. Characterisation of the optimal hydric interval for a Yellow Argisol cultivated with sugarcane on the coastal plains of Alagoas, Brazil. *Revista Ciencia Agronomica*. 44(4), 669-675, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000400002>

FEITOSA, J. R.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R. Influência da pressão interna dos pneus e da velocidade de deslocamento nos parâmetros operacionais de um trator agrícola e nas propriedades físicas do solo. *Engenharia Agrícola*, 35(1), 117-127, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p117-127/2015>

FERRARI, J. M. S.; GABRIEL, C. P. C.; SILVA, T. B. G.; MOTA, F. D.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; TANAKA, E. M. Analysis of the spatial variability of resistance to soil penetration at different depths. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 12(2), 164–175, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18011/bioeng2018v12n2p164-175>

FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G.; BALIEIRO, F.C.; MOURA, T.P.A; MENEZES, A.R.; SANTANA, C.I. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9),1457-1465, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900044>

GEE, G.W.; OR, D. Particle Size Analysis. In: Dane, J.H. and Topp, G.C., Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soils Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, 255-293. 2002.

GOMES, J.H.G.; PINHEIRO JUNIOR, C.R.; PEREIRA, M.G.; ALMEIDA, W.S.; SILVA, G.T. Variability of soil physical and hydraulic properties along a toposequence in the coastal lowlands of Rio de Janeiro. *Revista Ambiente e Água*, 16(1), 2021. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2579>

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DISERENS, E.; MARIA, I. C.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; VIEIRA C. V. F.; 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*, 681, 424-434, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.009>

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Eng*, 4(2), 135-143, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))

HAMBLIN, A. P. The influence of soil structure on water movement, crop rot growth and water uptake. *Advances in Agronomy*, San Diego, 38, 95-158, 1985.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Science and Plant Nutrition*, 34, 535-546, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.1988.10416469>

HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic, Cap.2, p.319-344. 1980.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactibility and compressibility. In: SOANE, B.D.; OUWEKERK, C. van (Eds.). *Soil compaction in crop production*. *Developments in Agricultural Engineering*, 11, 45-69, 1994.

HOSSEINI, S.A.O.; AKBARIMEHR, M.; EMADIAN, S.F.; AGH, A. Considering the soil compaction status on logging areas in a Hyrcanian forest. *Journal of Forest Science*, 61, 210-215, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17221/48/2014-JFS>.

JIMENEZ, K.J.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; CAVALCANTI, R. Q.; SILVA, E. F. F.; PEDROSA, E. M. R. Soil Physical Indicators of a Sugarcane Field Subjected to Successive Mechanised Harvests. *Sugar tech*, 23(4), 811-818, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00916-w>

KELLER, T.; COLOMBI, T.; RUIZ, S.; MANALILI, M.P.; REK, J.; STADELMANN, V.; WUNDERLI, H.; BREITENSTEIN, D.; REISER, R.; OBERHOLZER, H.; SCHYMANSKI, S.; ROMERO-RUIZ, A.; LINDE, N.; WEISSKOPF, P.; WALTER, A.; OR, D. Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. *Vadose Zone Journal*. 16(4), 1-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2016.11.0118>.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: Relações solo-planta. 1. ed. São Paulo, SP: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KORNDORFER, G.H. PRIMAVESI, O.; DEUBER, R. Crescimento e distribuição do sistema radicular de cana-de-açúcar em solo LVA. Piracicaba: Coopersucar, 1989, 82p. (Boletim Técnico, 47)

KUNZ, M.; GONÇALVES, A. D. M. DE A.; REICHERT, J. M.; GUIMARÃES, R. M. L., REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1699–1708, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600026>.

LEIVA, J.O.R.; SILVA, R.A.; SILVA, E.F.F.; SIQUEIRA, G.M. Multifractal analysis of soil resistance to penetration in different pedoforms. *Revista Caatinga*, 34(1), 189-198, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n119rc>

LEMO, C. F.; SILVA, E. T. Comparação das características morfológicas, mineralógicas, químicas e físicas do solo entre áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional. *Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais*, 3(1), 11-18, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7213/cienciaanimal.v3i1.8858>

LIBARDI, P. L. 2005. Dinâmica da água no solo. Edusp: Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 311p.

LIMA, R. P.; LEON, M. J.; SILVA, A. R. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. *Revista Ceres*, 60, 577-581, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2013000400018>.

LIMA, R. P.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F.B.; SILVA, A. R.; ROLIM, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, 162, 1-10, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.002>.

LINS, D. J. B.; REIS, I. M. S.; GASPARIN, E.; VILDOSO, C. I. A.; SIA, E. F.; ROMANO, M. L. P. C.. Atributos físicos do solo na cultura da mandioca sob manejo diferenciado. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, 12(2), 46-56, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0006>

LOPES, E. S.; SAMPIETRO, J. A.; LOMBARDI, K. C.; DIAS, A. N. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. *Revista Árvore*, 35(3), 659-667, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000400010>

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30, 163-170, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100016>

MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H. da; LEVIEN, R.; ZULPO, L.; BREZOLIN, D.; Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um argissolo vermelho sob tráfego controlado de máquinas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(5), 1185-1195, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500008>

MIQUELONI, D.P.; GIANELLO, E.M.; BUENO, C.R.P. Spatial variability of attributes and soil loss in the definition of management zones. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*. 45 (1), 18-28, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4528029>

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16, 584-590. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000500015>

MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milheto. *Revista Ceres*, 59(1), 125-135, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000100018>.

MOSSADEGHI-BJÖRKLUND, M.; ARVIDSSON, J.; KELLER, T.; KOESTEL, J.; LAMANDÉ, M.; LARSBO, M.; JARVIS, N. Effects of subsoil compaction on hydraulic properties and preferential flow in a Swedish clay soil. *Soil & Tillage Research* 156: 91–98. 2016. DOI: 10.1016/j.still.2015.09.013.

NOSALEWICZ, A.; LIPIEC, J. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. *Plant and Soil*, 375(1–2), 229–240. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1961-0>

OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. O., MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F.O.; COSTA, T. K. G. Compactação de solo cultivado com cana-de-

açúcar em Baía Formosa, Rio Grande do Norte. *Revista Ceres*, 63(5), 715-723, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737x201663050017>

OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(2), 186- 193, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p186-193>

OLIVEIRA FILHO, F.X.; MIRANDA, N.O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F.O.; COSTA, T. K. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, 19, 186–193, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p186-193>

OLIVEIRA, E.C.A; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, R.I.; OLIVEIRA, A.C; FREIRE, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agrônômica*, 42(3), 579-588, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300002>.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1103-1112, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400027>

ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; LUZ, F. B. D.; BERTOLLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. D. Soil use and physical-mechanical properties of a Red Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(2), 619-626, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200026>

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*, 117, 201-210, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.005>

PILATTI, M. A.; SECCO, D.; MONTIEL, C. B.; SILVEIRA, L. Manejo do solo e disponibilidade hídrica. *Journal of Agronomic Sciences*, 5,191-204, 2016. ISSN: 2316-1809

PORTELA, J.C.; SILVA, A.C.; SILVA, S.Y.A.M.; MAX ANDREZ DE SOUZA OLIVEIRA 4; SILVA, F.W.A. Argila dispersa em água e grau de flocculação em classes de solos. III Congresso Internacional das Ciências Agrárias. 2018. DOI: <https://doi.org/10.31692/2526-7701.IIICOINTERPDVAGRO.2018.00288>

PREVEDELLO, C. L. Física do solo. Curitiba: C. L. Prevedello, 1996. 446p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*. 27 (2), 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; REINERT, D.J; SUZUKI, L.E.A.S; HORN, R. Mecânica do solo (cap. II). IN: VAN LIER, Q. J. Física do Solo. Sociedade Brasileira Ciência do Solo. UFV. 2010. 298p.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.; REINERT, D. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. Tópicos em Ciência do Solo, 5, 49-134, 2007.

RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do Estado do Paraná. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32, 1817-1825, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500003>.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; RODRIGUES, O. B.; FUENTES R. L.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. Semina: Ciências Agrárias, 26(3), 321-343, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2005v26n3p321>

RIGGERT, R.; FLEIGE, H.; KIETZ, B.; GAERTIG, T.; HORN, R. Stress distribution under forestry machinery and consequences for soil stability. Soil Science Society of America Journal, 80, 38–47, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.03.0126>

ROBOREDO, D.; MAIA, J. C. S.; OLIVEIRA, O. J. DE; ROQUE, C. G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um latossolo vermelho distrófico. Engenharia Agrícola, 30(2), 308-314, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000200013>

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. Suction table. In: DANE J.H, TOPP G.C, editors. SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4 Physical methods. Madison: Soil Science Society of America; 2002. p.692-698.

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, 34(5), 821-828, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000500013>

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, 51, 1610-1622, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900061>.

SAMPIETRO, J.; LOPES, E.; REICHERT, J. M. Compactação causada pelo tráfego de Feller buncher e skidder em um neossolo regolítico sob distintas umidades. Ciencia Florestal, 25, 239-248, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-509820152505239>.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Preparo convencional. Agência Embrapa de Informação Tecnológica – Ageitec. Empresa Brasileira de

Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Brasília-DF. 2019. Disponível em < [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_84\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_84_22122006154841.html)>. Acesso em 29 set. 2020.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T.S.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16 (8), 828–835, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000800003>

SECCO D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ciência Rural*, 39(1), 58-64, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009000100010>

SENE, M.; VEPRAAKAS, M.J.; NADERMAN, G.C.; DENTON, H.P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Soil Science Society of America Journal*, 49(2), 422-427, 1985. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900020030x>

SHI, X.H.; YANG, X.M.; DRURY, C.F.; REYNOLDS, W.D.; MCLAUGHLIN, N.B.; ZHANG, X.P. Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario, *Soil and Tillage Research*, 120, 1-7, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.003>

SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 877-883, 1997.

SILVA, A. R.; SILVA, L. L.; FRAZÃO, J.J.; SALGADO, F.H.M.; SILVA, M.C.; CORRECHEL, V. Resistência mecânica à penetração do solo com diferentes coberturas vegetais sob sistema. *Revista Científica Eletrônica de Agronomia*, 22(2), 158-164, 2012.

SILVA, A.P.; LEÃO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(6), 1535-1545, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600003>

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



SILVA, G.S.; SILVA, J.S.; PEREIRA, F.A.C.; SANTANA, R.A.; FIRMO, R.S.; SOBRINHO, O.P.L. Spatial variability of the saturated hydraulic conductivity of soil in cocoa farming in Recôncavo Baiano. *Revista Caatinga*. 32(3). 786-794, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n323rc>

SILVA, J.P.N.; SILVA, M.R.N. (2012) *Noções da cultura da cana-de-açúcar*. Santa Maria, UFSM. 105p.

SILVA, M.S.L.; KLAMT, E.; CAVALCANTI, A.C. & KROTH, P.L. Adensamento subsuperficial em solos do semi-árido: processos geológicos e/ou pedogenéticos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 6, 314-320, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000200021>

SILVA, R.B.D.; IORI, P.; SOUZA, Z.M.D.; PEREIRA, D.D.M.G.; VISCHI FILHO, O.J.; SILVA, F.A.D.M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. *Ciência e Agrotecnologia*, 40, 265–278, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542016403001716>

SILVA, W. F.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; AULICINO, T. L. I. N. Análise da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar na região CentroSul do Brasil: safras 2005/2006 a 2008/2009. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 467-474.

SIMÕES, W. L.; SILVA, E.L.; LIMA, D.M.; OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico, submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30, 1061-1068, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600015>

SIQUEIRA, T.M.; LOUZADA, J.A.S.; PEDROLLO, O.C.; CASTRO, N.M.R.; OLIVEIRA, M.H.C. Soil physical and hydraulic properties in the Donato stream basin, RS, Brazil. Part 1: Spatial variability. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23 (9), 669-674, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n9p669-674>

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. *Geoderma*, 78, 93-111, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1080/02571862.2001.10634410>

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research*, 92, 169-183, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.017>

SOIL SURVEY STAFF. *Soil survey manual*. Washington, USDA, 2017. 639p. (Handbook, 18).

SOUSA, L.F.R.A.; MENEZES, A.S.; LIMA JÚNIOR, J.C.; LOBATO, M.G.R.; CHAVES, A.F.; ALENCAR, T.L. Avaliação de penetrômetros na medição da resistência do solo à penetração. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. (2015).

SOUZA, D.H.S. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade da cana-de-açúcar na zona da mata norte de Pernambuco. 2017. 84p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SOUZA, L.D.; SOUZA, L.S.; LEDO, C.A.S.; CARDOSO, C.E.L. Distribuição de raízes e manejo do solo em cultivo de mamão nos Tabuleiros Costeiros. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 51(12), 1937-1947, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016001200004>

SOUZA, R.; HARTZELL, S.; FERRAZ, A.P.F.; ALMEIDA, A.Q.; LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOUZA, E.S. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments, Soil and Tillage Research, 205, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104768>.

SUZUKI, L. E. A. S.; LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; PILLON, C. N. Condição estrutural de um argissolo no Rio Grande do Sul, em floresta nativa, em pastagem cultivada e em povoamento com eucalipto. Ciência Florestal, 22(4), 833–843, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050987564>

TAVARES FILHO, J. Física e conservação do solo e água. 2016. 256 p. ISBN: 8572168249, 9788572168243.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32, 487-494, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200003>.

TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. Condutividade Hidráulica. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. p.125-128.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 22(4), 573-581, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Embrapa soja. Circular Técnica, 23).

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Bioeletricidade em números. 2021. 9p. Disponível em: < <https://observatoriodacana.com.br/listagem.php?idMn=134>>. Acesso em 08/12/2021.

USABORISUT, P. Soil Compaction in sugarcane fields induced by mechanization. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 6, 418-422, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2011.418.422>

VALADÃO JÚNIOR, D.D. Resistência do solo a penetração em corpos de prova curados. 2013. 90f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical) – Programa de Pós-graduação em Agricultura Tropical, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, 2013.

VALADÃO JÚNIOR, D.D.; BIANCHINI, A.; VALADÃO, F.; ROSA, R. P. Penetration resistance according to penetration rate, cone base size and different soil conditions. *Bragantia*, 73, 171-177, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/brag.2014.013>.

VALADÃO, F.C.A.; WEBER, O.L.S.; VALADÃO JÚNIOR, D.D.; SCAPINELLI, A.E DEINA, F.R.; BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(1), 243-255, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150144>

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STÜRMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola ambiental*, 16(9), 969-977, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000900007>.

VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; DE MARIA, I. C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, 166(1), 92-101, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.016>

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Umidade atual. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. p.28-30.

VOGEL, G. F.; MARTINKOSKI, L.; GRILLO, J. F.; MICHALOVICZ, L.; FEY, R. Avaliação dos penetrômetros de impacto e eletrônico na determinação da resistência mecânica a penetração do solo *Scientia Agraria*, 18(3), 30-36, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i3.52220>

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p. 319-344.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; SILVA, A. P.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; VIDIGAL FILHO, P. S. Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 22(4), 1055-1060, 2000. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v22i0.2847>

ZHAO, D. et al. Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 242(1), 1-8, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.014>

ZHUO, Z.; XING, A.; CAO, M.; LI, Y.; ZHAO, Y.; GUO, X.; HUANG, Y. Identifying the position of the compacted layer by measuring soil penetration resistance in a dryland farming region in Northeast China. *Soil Use and Management*, 00, 1–13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12576>

ANEXO 1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE CANA-DE-AÇÚCAR DE CARPINA – EECAC

Análises Químicas										
Profundidade (m)	pH	P <sub>mehlich</sub>	H + Al	Al	Ca	Mg	K	CTC	V	m
	H <sub>2</sub> O	mg dm <sup>-3</sup>	----- cmol dm <sup>-3</sup> -----			----- % -----				
0,0 - 0,2	5,4	8,0	6,4	0,2	1,6	1,2	0,1	9,3	31,4	0,3
0,2 - 0,4	5,2	7,0	6,8	0,5	1,0	0,5	0,1	8,5	20,0	2,7
0,4 - 0,6	5,0	6,0	6,8	0,7	0,8	0,5	0,0	8,2	17,0	6,1

Análises Físicas								
Profundidade (m)	Ds	Areia	Silte	Argila	θ <sub>cc</sub>	θ <sub>pmp</sub>	L. Útil	Textura
	Mg m <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>			m <sup>-3</sup>	m <sup>-3</sup>	mm	
0,0 - 0,2	1,4	769,4	61,4	169,2	0,2	0,1	7,4	Franco arenosa
0,2 - 0,4	1,4	689,4	46,4	264,2	0,2	0,1	9,7	Franco argilo-arenosa
0,4 - 0,6	1,4	661,0	54,8	284,2	0,2	0,1	7,3	Franco argilo-arenosa

CTC - Capacidade de troca de cátions potencial; L. Útil - Lâmina útil calculada a partir de 50% da lâmina tota.

Fonte: Oliveira et al. (2011)