

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

DANILLO DUTRA TAVARES

**DISTRIBUIÇÃO MODAL DE POROS NA RETENÇÃO DE ÁGUA DE
ARGISSOLO AMARELO DISTROCOESO SOB MANEJO TEMPORAL
COM CANA-DE-AÇÚCAR**

RECIFE

2024

Danillo Dutra Tavares
Engenheiro Agrônomo

**Distribuição modal de poros na retenção de água de Argissolo Amarelo distrocoeso sob
manejo temporal com cana-de-açúcar**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

**Recife
2024**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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)

T231d

Tavares, Danilo Dutra Tavares

Distribuição modal de poros na retenção de água de Argissolo Amarelo distrocoeso sob manejo temporal com cana-de-açúcar / Danilo Dutra Tavares Tavares. - 2024.
78 f. : il.

Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.

Coorientador: Paulo Leonel Libardi.

Inclui referências e apêndice(s).

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2024.

1. Atributos físicos. 2. Curva de retenção. 3. Qualidade física do solo. 4. Modelagem. I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Libardi, Paulo Leonel, coorient. III. Título

CDD 631.4

DANILLO DUTRA TAVARES

Distribuição modal de poros na retenção de água de Argissolo Amarelo distrocoeso sob manejo temporal com cana-de-açúcar

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 29 de fevereiro de 2024

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Milton César Costa Campos
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Wagner Luís da Silva Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco/Campus Barreiros

Aos meus pais, Renildes e Marília, pelo incentivo e confiança depositada em mim, **dedico** esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por essa oportunidade dada por Ele para meu crescimento profissional, por mais essa porta aberta no meu caminho, apesar das dificuldades enfrentadas, o Senhor nunca me abandonou, deu-me forças e ajudou-me a chegar até aqui.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PGCS) pela oportunidade de ingressar no curso de Doutorado em Ciência do Solo, buscando aperfeiçoamento profissional. A estação experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC) por disponibilizar a área para realização deste trabalho, em especial ao Dr. Djalma e Evanilson responsáveis pelas áreas.

Aos meus pais, Renildes Tavares e Marília Dutra; aos meus irmãos, Bruno Dutra e Artur Dutra; aos meus avós, Jacy Tavares (in memorian) e Maria Amaro (in memorian), Severino Pereira (in memorian) e Maria Nilza (in memorian), e aos demais familiares, por todo apoio em mim depositado ao longo desta caminhada.

Ao professor Brivaldo Gomes de Almeida, pela orientação, ensinamentos, paciência, confiança, incentivo e conhecimento transferido, o qual levarei para toda a minha vida.

Aos professores e pesquisadores, Prof. Dr. Flavio Pereira de Oliveira, Prof. Dr. Milton César Costa Campos, Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira e Prof. Dr. Wagner Luís da Silva Souza, pela disponibilidade em participar da minha banca examinadora e dar sugestões para melhorar a tese.

Aos amigos, Francisco Marto, Josevaldo, que me ajudaram na chegada ao curso, a todos da turma 2019.1, esses que passaram noites estudando, dividiram preocupações e alegrias em especial, os amigos Aline, Belchior, Cintia e Jaciane, pela amizade e parceria durante todo o curso, e aos demais que conheci ao longo do curso. Aos amigos do Laboratório de Física do Solo, Ana, Marlon, Maykon, Neura, Alice, Natália, Edilson, Arnaldo, Paulo, Talmo e Alison, além disso foram alguns deles, que me ajudaram fortemente na realização dos trabalhos de campo, especialmente nas coletas de amostras de solo, como também nas análises laboratoriais, os quais sou imensamente grato, e aos demais estagiários do laboratório que deram sua contribuição.

Ao Técnico do Laboratório de Física do Solo, Eudes, amigo que deu apoio nas coletas e auxiliou durante o curso, no desenvolvimento das análises e tem dado toques importantes na vida acadêmica.

Aos amigos, Pedro pela parceria ao longo da vida acadêmica, e Cezar pelas contribuições na parte do desenvolvimento do trabalho de tese.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelo conhecimento transmitido e capacitação, aos funcionários da UFRPE, pelo esforço e dedicação as atividades realizadas, que em nome da secretária do PGCS, Socorro, deixo meu muito obrigado.

Distribuição modal de poros na retenção de água de Argissolo Amarelo distrocoeso sob manejo temporal com cana-de-açúcar

RESUMO

O sistema de produção da cana-de-açúcar envolve o uso de inúmeras operações, como também, são aplicados diferentes sistemas de manejos. Em estudos referentes a qualidade física do solo, a curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) tem sido amplamente utilizada. A modelagem da CCRAS com ajustes via Van Genuchten tem sido um dos mais usado. Porém, devido ao espaço poroso complexo apresentado pelos solos tropicais, onde há uma grande variação quanto aos tamanhos dos poros, esse pode ser avaliado considerando o arranjo bimodal, conforme sugeridos pelo modelo de Dexter, com os poros classificados em dois domínios: poros inter-agregados e intra-agregados. O objetivo da pesquisa foi avaliar o comportamento da CCRAS, utilizando modelos matemáticos diferentes e sua relação com a distribuição do diâmetro dos poros do solo, em área cultivada com cana-de-açúcar, sob diferentes tempos de implantação. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC/UFRPE), onde o solo foi classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso. As amostras de solo estruturadas e não estruturadas foram coletadas em 36 pontos em três subáreas, sob diferentes épocas de cultivo da cana-de-açúcar (2ª folha – 2 anos de cultivo; 5ª folha – 5 anos de cultivo; 7ª folha – 7 anos de cultivo), nas camadas de 0-15 cm e 15-30 cm. As amostras não estruturadas foram coletadas em blocos de solo e em cilindros volumétricos ($\cong 100 \text{ cm}^3$), sendo as deformadas obtidas a partir de partes dos blocos, convertidos à terra fina seca ao ar (TFSA). A partir das amostras em cilindro obteve-se os dados das CCRAS, distribuição de poros, condutividade hidráulica saturada, resistência do solo à penetração de raízes e densidade do solo. Para as amostras em blocos, estas foram separadas em agregados, sendo determinada a resistência tênsil de agregados do solo e os índices de agregação do solo. As amostras em TFSA foram usadas nos ensaios da densidade das partículas sólidas do solo; distribuição das frações granulométricas e grau de floculação; além da caracterização dos atributos químicos. As curvas do modelo de Dexter apresentaram formato bimodal, possivelmente devido à existência de dois valores de entrada de ar. Avaliando as subáreas por meio da CCRAS via modelo de Van Genuchten, estas apresentaram comportamentos quase que semelhantes para os diferentes tempos de implantação do canavial, sendo que, apenas nos solos da subárea sob a 7ª folha, foi possível constatar uma maior diferença entre as curvas. As CCRAS modeladas via modelo de Dexter, apresentaram melhores ajustes das curvas, elencando a característica dos solos tropicais de apresentar mais de um ponto de inflexão, sendo que, a segunda tensão para promover a entrada de ar nos poros dos solos está relacionada à drenagem dos microporos dos solos.

Palavras-chave: Atributos físicos. Curva de retenção. Qualidade física do solo. Modelagem.

Modal distribution of pores in soil water retention of dystrocohesive Yellow Argisol under temporal management with sugarcane

ABSTRACT

The sugarcane production system involves the use of numerous operations, as well as different management systems. In studies of soil physical quality, the soil water retention characteristic curve (CCRAS) has been widely used. CCRAS modeling with adjustments via Van Genuchten has been one of the most used. However, due to the complex pore space presented by tropical soils, where there is a great variation in pore sizes, this can be evaluated considering the bimodal arrangement, as suggested by the Dexter model, with the pores classified into two domains: inter-aggregates and intra-aggregates. The objective of the research was to evaluate the behavior of CCRAS, using different mathematical models and its relationship with the distribution of soil pore diameter, in an area cultivated with sugarcane, under different implementation times. The study was carried out at the Carpina Sugarcane Experimental Station (EECAC/UFRPE), where the soil was classified as of dystrocohesive Yellow Argisol. Structured and unstructured soil samples were collected at 36 points in three subareas, under different sugarcane cultivation seasons (2nd sheet – 2 years of cultivation; 5th sheet – 5 years of cultivation; 7th sheet – 7 years of cultivation), in the 0-15 cm and 15-30 cm layers. Unstructured samples were collected in soil blocks and volumetric cylinders ($\cong 100 \text{ cm}^3$), with deformed samples obtained from parts of the blocks, converted to air-dried fine earth (TFSA). From the cylinder samples, data on CCRAS, pore distribution, saturated hydraulic conductivity, soil resistance to root penetration and soil bulk density were obtained. For the block samples, they were separated into aggregates, and the tensile strength of soil aggregates and soil aggregation indices were determined. The TFSA samples were used in soil solid particle density tests; distribution of particle size fractions and degree of flocculation; in addition to the characterization of chemical attributes. The Dexter model curves presented a bimodal format, possibly due to the existence of two air entry values. Evaluating the subareas through CCRAS via the Van Genuchten model, they showed almost similar behavior for the different sugarcane plantation implementation times, and only in the soils of the subarea under the 7th leaf, it was possible to verify a greater difference between the curves. The CCRAS, modeled using the Dexter model, presented better adjustments to the curves, highlighting the characteristic of tropical soils of presenting more than one inflection point, and the second tension to promote the entry of air into the soil pores is related to the drainage of soil micropores.

Keywords: Physical attributes. Retention curve. Physical quality of the soil. Modeling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Localização geográfica da área experimental..... | 24 |
| Figura 2 - Croqui ilustrando a disposição dos pontos de coleta..... | 24 |
| Figura 3 – Coleta de amostras utilizando amostrador tipo Uhland (A); desacoplamento entre o cachimbo e o amostrador (B); conjunto cilindro-amostra no cachimbo e amostras embaladas (C), para transporte ao laboratório..... | 25 |
| Figura 4 – Coleta de amostras na trincheira (A); amostra sendo medida para ser separada nas profundidades determinadas (B); amostras prontas para serem embaladas e levadas ao laboratório (C). | 26 |
| Figura 5 – Psicrômetro com detalhes para: a) vista externa, e amostras nas cápsulas; b) vista interna, em particular, a câmara de leitura; c) equação de Kelvin, utilizada pelo software do equipamento para calcular o Ψ , fornecendo a leitura no visor (MPa ou pF)..... | 27 |
| Figura 6 – Processo de dispersão via agitador do Tipo Wagner (A); material em suspensão que foi transferido das garrafas para as provetas para realizar a leitura com o densímetro (B)..... | 29 |
| Figura 7 – Amostra em cilindro volumétrico seco em estufa para pesagem e determinação da densidade do solo (A); balão volumétrico para determinação da densidade de partículas sólidas do solo (B). | 30 |
| Figura 8 – Esquema do permeâmetro de carga constante utilizados nos ensaios de determinação da condutividade hidráulica saturada dos solos..... | 31 |
| Figura 9 – Computador que faz o registro das leituras de resistência a penetração (A); penetrômetro de bancada para realização do ensaio de resistência a penetração (B); amostra em cilindro volumétrico após o ensaio de resistência à penetração (C)..... | 32 |
| Figura 10 – Penetrômetro de bancada para realização do ensaio de resistência tênsil (A); agregado após o seu rompimento (B). | 33 |
| Figura 11 – Agitador mecânico vibratório (A); agitador do tipo Yoder (B); conjunto de peneiras do Yoder (C). | 34 |
| Figura 12 – Resistência do solo à penetração de raízes determinada em laboratório, sob cana-de-açúcar com diferentes tempos de cultivo (A – 2ª folha/anos, B – 5ª folha/anos, C – 7ª folha/anos). | 43 |
| Figura 13 – Análise de componentes principais para os atributos físicos dos solos das subáreas sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (1 = 2ª folha/anos, 2 = 5ª folha/anos, 3 = 7ª folha/anos)..... | 46 |
| Figura 14 – Curva característica de retenção de água dos solos, ajustada pelo modelo de Van Genuchten (1980), sob cana-de-açúcar com diferentes tempos de cultivo (A – 2ª folha/anos, B – 5ª folha/anos, C – 7ª folha/anos)..... | 52 |
| Figura 15 - Curva característica de retenção de água dos solos, ajustada pelo modelo de Dexter et al. (2008), sob de cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (A – 2ª folha/anos, B – 5ª folha/anos, C – 7ª folha/anos)..... | 55 |
| Figura 16 – Curva de distribuição de poros dos solos, ajustada pelo modelo de Dexter et al. (2008), sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (A – 2ª folha/anos, B – 5ª folha/anos, C – 7ª folha/anos)..... | 57 |

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Atributos químicos utilizados para a caracterização de Argissolo, sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos)..... 35
- Tabela 2** – Análise granulométrica do Argissolo sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos). 37
- Tabela 3** – Densidade do solo, condutividade hidráulica saturada do solo, resistência tênsil de agregados e resistência do solo à penetração de raízes em Argissolo, sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos). 39
- Tabela 4** – Distribuição de tamanho de poros dos solos estudados, cultivados com cana-de-açúcar, sob diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos) 40
- Tabela 5** – Valores médios da resistência do solo à penetração em Argissolo, sob cana-de-açúcar, determinados em laboratório, para os diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos)..... 42
- Tabela 6** – Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados de Argissolo, sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes tempos de cultivo (2^a, 3^a e 7^a folha/anos)..... 44
- Tabela 7** – Correlação de Person para os atributos físicos dos solos sob diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos). 49
- Tabela 8** – Parâmetros das curvas de retenção de água dos solos, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten, sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos) 53
- Tabela 9** – Coeficientes das curvas de retenção de água nos solos, obtidos a partir dos ajustes pelo modelo de Dexter et al. (2008), sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos)..... 56

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 Hipóteses | 15 |
| 1.2 Objetivos..... | 16 |
| 1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> | 16 |
| 1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 16 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 Curva característica de retenção de água no solo | 17 |
| 2.2 Distribuição do tamanho de poros de solo | 18 |
| 2.3 Manejo do solo <i>versus</i> atributos físicos..... | 20 |
| 2.4 Cultivo de cana-de-açúcar e sua relação com os atributos físicos do solo | 21 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 23 |
| 3.1 Área experimental, coleta e preparo das amostras | 23 |
| 3.2 Determinações dos atributos físicos dos solos | 26 |
| 3.2.1 <i>Distribuição do diâmetro de poros e curva característica de retenção de água no solo</i> | 26 |
| 3.2.2 <i>Análise granulométrica</i> | 29 |
| 3.2.3 <i>Grau de floculação</i> | 30 |
| 3.2.4 <i>Densidade do solo e de suas partículas sólidas</i> | 30 |
| 3.2.5 <i>Condutividade hidráulica saturada</i> | 31 |
| 3.2.6 <i>Resistência do solo à penetração de raízes</i> | 32 |
| 3.2.7 <i>Resistência tênsil de agregados do solo</i> | 32 |
| 3.2.8 <i>Índices de agregação do solo</i> | 33 |
| 3.2.8.1 <i>Diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico</i> | 34 |
| 3.2.8.2 <i>Índice geral de estabilidade dos agregados</i> | 35 |
| 3.3 Atributos químicos do solo..... | 35 |
| 3.4 Análise estatística dos dados | 36 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 5 CONCLUSÕES | 62 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 63 |
| APÊNDICES | 76 |
| APÊNDICE A – Resultados dos autovalores e autovetores extraídos da análise de componentes principais na camada de 0-15 cm para os solos das três subáreas estudadas (2ª, 5ª e 7ª folha). | 76 |

APÊNDICE B – Resultados dos autovalores e autovetores extraídos da análise de componentes principais na camada de 0-15 cm para os solos das três subáreas estudadas (2ª, 5ª e 7ª folha).

.....77

1 INTRODUÇÃO

Na economia brasileira a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) se destaca como uma das principais culturas do setor agrícola, com o Brasil sendo o maior produtor mundial. São diversos os usos da cana-de-açúcar na agroindústria, aproveitada até para a geração de energia elétrica. Essa alta demanda em diversos usos é responsável pelo crescimento do setor sucroenergético brasileiro, levando a expansão dos canaviais e investimentos em tecnificação. Essa é a terceira lavoura mais cultivada no país, ocupando uma área de 8,35 milhões de hectares na safra 2023/2024, e estimativa de produção de 677,6 milhões de toneladas e com rendimento médio aproximado de 81 mil kg ha⁻¹. Dentre todas as regiões brasileira, o Sudeste ocupa o lugar de maior produção de cana-de-açúcar, seguido do Centro-Oeste e do Nordeste, logo depois vem as regiões Sul e Norte. No Nordeste houve um aumento de área plantada com cana-de-açúcar para a safra 2020/2021, mesmo assim, tem uma previsão de redução na produtividade da cultura para essa região.

O sistema de produção da cana-de-açúcar envolve o uso de inúmeras operações, como também são aplicados diferentes sistemas de manejos. O emprego de maquinário agrícola em diferentes etapas, onde envolve sucessivas operações mecanizadas - do preparo do solo até a colheita - facilita as operações em campo. No entanto, em virtude das operações de manejo serem realizadas muitas vezes quando o solo está sob condições de umidade inadequada, pode provocar perda da qualidade física estrutural do solo nessas áreas; por modificar diretamente a porosidade, capacidade de retenção de água, estabilidade de agregados, densidade do solo, infiltração de água e resistência do solo à penetração de raízes. Em detrimento disso, afeta o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, refletindo na sua produtividade no decorrer dos anos. No cenário atual a nível Nordeste, como em outras regiões produtoras do país, o cultivo da cana-de-açúcar busca por práticas que visam um menor custo de produção, redução da perda de qualidade do solo e que possibilitem altas produtividades à cultura.

Em estudos de qualidade física do solo, a curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) tem sido amplamente utilizada, devido representar a relação entre a energia na qual a água é retida no solo e o respectivo conteúdo de água nos seus poros. Esse conteúdo (umidade volumétrica) está fortemente associado com a estrutura do solo, sendo o comportamento da CCRAS o reflexo da distribuição de tamanhos de poros do solo. Nesse contexto, a CCRAS é importante para entender os processos de disponibilidade de água às plantas, permitindo assim para nortear a tomada de decisões corretas para a otimização do uso da água e do solo.

A busca por novos indicadores que possam caracterizar ou identificar da melhor forma as modificações que ocorrem sob o sistema solo, para definir uma gestão de ações e evitar ou minimizar a degradação do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, principalmente sob as alterações nos atributos físicos indicadores da qualidade do solo, foi o que guiou o estudo dessas modificações no solo por meio de metodologias diferentes das já empregadas. Uma dessas metodologias é a modelagem da distribuição de poros do solo e sua relação com a CCRAS, por meio de um modelo de ajuste bimodal.

Alguns autores propuseram ajustes de modelos aos dados da CCRAS utilizando para isso softwares, sendo o de van Genuchten (1980) um dos mais usados. Entretanto, nesse modelo, assume-se que o solo apresenta um arranjo poroso contínuo único (modal). Por outro lado, devido ao espaço poroso complexo apresentado pelos solos tropicais, onde há uma grande variação quanto ao espaço poroso do solo, esse pode ser avaliado considerando o arranjo bimodal, com os poros classificados em dois domínios, poros inter-agregados e intra-agregados. Os poros inter-agregados estão relacionados à porosidade estrutural, tendo a função de aeração, condução e drenagem da água no solo, enquanto os poros intra-agregados estão relacionados à porosidade da matriz ou porosidade textural, com a função de reter e disponibilizar água às plantas. Esses espaços porosos estrutural e textural são avaliados a partir do estudo da CCRAS, relacionando o conteúdo de água em função da energia de retenção, neste caso, o potencial mátrico.

Vários estudos propõem estudar a porosidade do solo e a retenção de água do solo por meio de modelos de ajuste bimodais, como o modelo de Dexter et al. (2008), pois o modelo de porosidade bimodal mostra melhores resultados, além de representar de forma mais adequada as modificações ocorridas no solo quando comparado ao modelo de van Genuchten, que utiliza um domínio poroso modal.

1.1 Hipóteses

O uso de modelo bimodal proposto por Dexter et al. (2008), para o ajuste da curva característica de retenção de água no solo, define melhor o comportamento da distribuição das classes de poros, quando comparado com o modelo de Van Genuchten (1980).

Os modelos bimodais, utilizados para o ajuste da curva característica de retenção de água de Argissolo Amarelo distrocoeso, demonstram de melhor forma o comportamento da distribuição das classes de poros e sua relação com os demais atributos físico-hídricos do solo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a o comportamento da curva característica de retenção de água do solo utilizando modelos matemáticos (Dexter et al., 2008; Van Genuchten, 1980) e sua relação com a distribuição do diâmetro dos poros do solo, em área cultivada com cana-de-açúcar sob diferentes tempos de implantação.

1.2.2 Objetivos Específicos

Determinar a curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) por meio da mesa de tensão, câmara de Richards e WP4-T.

Definir a distribuição das classes de diâmetro de poros do solo, utilizando dados obtidos a partir da elaboração da CCRAS, sendo as classes dos macro e mesoporos via mesa de tensão, microporos e criptoporos pela câmara de Richards, e subdivisões dos criptoporos pelo WP4-T.

Avaliar a CCRAS, utilizando os modelos matemáticos, de duplo exponencial, proposto por Dexter et al. (2008), e o de Van Genuchten (1980).

Determinar os atributos físico-hídricos do solo: distribuição das frações granulométricas e grau de flocculação; densidade do solo e densidade das partículas sólidas do solo; condutividade hidráulica saturada; resistência do solo à penetração de raízes; resistência tênsil de agregados do solo; índices de agregação do solo; e atributos químicos (carbono e pH).

Avaliar qual dos modelos testados explicam melhor as relações entre a distribuição de água no solo e seus atributos físico-hídricos, ao longo dos tempos de implantação da cultura da cana-de-açúcar (2^a, 5^a e 7^a folha).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Curva característica de retenção de água no solo

A curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) tem sido bastante utilizada para descrever a dinâmica de água no solo (DEXTER, 2004), pois pode expor na forma de gráficos a relação entre o conteúdo de água no solo com a respectiva energia de retenção, isto é, com o potencial matricial (CARDUCCI et al., 2011). É um atributo que responde às características intrínsecas do solo em uma ação conjunta, com a textura, estrutura, mineralogia e conteúdo de matéria orgânica do solo (BEUTLER et al., 2002).

A CCRAS é um atributo indicador de qualidade física do solo, onde a partir dele é possível estimar a capacidade de água disponível no solo às plantas, por meio da obtenção da umidade do solo equilibrada na capacidade de campo (ANDRADE et al., 2013) e no ponto de murcha permanente (CARDUCCI et al., 2013; SERAFIM et al., 2013). Além desses dados, pode-se também obter a condutividade hidráulica não saturada (ANDRADE; STONE, 2009). Para Silva et al. (2017), a curva de retenção de água no solo também vem sendo utilizada para fins de avaliação da qualidade física do solo por meio de um único parâmetro, o índice S, proposto em Dexter (2004).

A curva de distribuição do tamanho dos poros e a CCRAS têm sido amplamente utilizadas para caracterizar a estrutura do solo (PIRES et al., 2017a; CÁSSARO et al., 2011; DOS REIS et al., 2018). O comportamento da CCRAS dependerá de alguns fatores relacionados à condição estrutural do solo. Os solos estruturados geralmente apresentam mais de um ponto de inflexão na CCRAS, ocasionando diferentes picos na curva de distribuição do tamanho dos poros (KUTÍLEK et al., 2006).

Para a construção das CCRAS, o modelo proposto por van Genuchten (1980) é frequentemente o mais empregado para parametrizar os dados do conteúdo de água do solo em função do seu potencial matricial (AULER et al., 2014; 2017; PIRES et al., 2017b; NAVEED et al., 2014). Esse modelo é provavelmente a equação de retenção de água mais usada, e tem a vantagem por ser manipulada para diversos fins matemáticos. Por outro lado, tem as desvantagens que seus parâmetros são fortemente inter-dependentes e não têm significado físico distinto e que muitas vezes prediz valores negativos de água residual. Também não se encaixa nos dados de retenção de água para solos com distribuições de tamanho de poros claramente bimodais (DEXTER, 2008).

Por outro lado, uma função de retenção multimodal foi proposta por Durner (1994), para descrever a CCRAS por uma sobreposição linear de subcurvas do modelo do tipo van

Genuchten. No entanto, existem outros modelos aceitáveis e atualmente usados para atingir esse objetivo de ajuste da CCRAS (KARUP et al., 2017), com base na sobreposição de duas curvas unimodais (DING et al., 2016; GAO et al., 2018). A este respeito, pode-se incluir a soma de uma equação exponencial e de van Genuchten (ROSS; SMETTEM, 1993), equações duplas de Van Genuchten (OTHMER et al., 1991), equações duplas de Kosugi (KUTILEK, 2004), bem como a equação de dupla exponencial (DEXTER, 2008).

2.2 Distribuição do tamanho de poros de solo

São considerados poros a fração do volume do solo que não é ocupada pelo material sólido, onde a abundância relativa de cada tamanho de poro em um volume representativo de solo é considerada como distribuição do tamanho de poros (SHI et al., 2017).

A determinação apenas da porosidade total fornece informações de importância limitada, necessitando quantificar a distribuição dos poros por tamanhos para melhor entendimento do comportamento do solo (ANDERSON; BOUMA, 1973), onde ocorrem diversos processos, tais como: o movimento e armazenamento de água e gases; fluxo e retenção de calor, e desenvolvimento do sistema radicular (VOMOCIL, 1965; KLEIN, 1998). Assim, torna-se mais importante a distribuição dos poros na matriz do solo, visto que, pode-se inferir quanto da possibilidade de restrição do fluxo de água no solo (RIBEIRO et al., 2007).

Na literatura podemos consultar vários conceitos que surgiram sobre as classificações dos poros em diâmetro. De forma mais simplificada, os poros podem ser separados em duas classes: macro e microporos; mesmo nos casos onde não exista nos solos uma clara separação entre poros grandes e pequenos. Os microporos, chamados também de poros capilares, são os poros responsáveis pela retenção da água no solo, enquanto a drenagem e aeração do solo fica a cargo dos macroporos (BRADY; WEIL, 2016).

Outras classificações, como sugeridas em Kiehl (1979), estabelecem a separação entre as classes de poros por meio do seu diâmetro ($\varnothing_{\text{poro}}$), com valor maior e menor que 0,06 mm para macro e microporos, respectivamente. Richards (1965) dividiu as classes de macro e microporos utilizando como base o limite do $\varnothing_{\text{poro}}$ igual a 0,05 mm. Nas classificações anteriores, vários autores ainda incluem mais uma classe de poros, os mesoporos, que têm $\varnothing_{\text{poro}}$ entre 0,01 e 1,0 mm, sendo uma classe intermediária entre a dos macroporos ($\varnothing_{\text{poro}} > 1,0$ mm) e microporos ($\varnothing_{\text{poro}} < 0,01$ mm), apresentando funções mistas ou intermediárias entre as duas classes (LUXMOORE, 1981).

Para Klein e Libardi (2002), os poros que apresentam diâmetro maior que 0,05 mm, são classificados como macroporos, que drenam água em tensões menores que 6 kPa; os microporos, são os poros com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm, podendo ser esvaziados à tensões entre 6 e 1500 kPa; e por fim, os criptoporos, com diâmetro menor que 0,0002 mm, necessitam de tensões maiores que 1500 kPa para drenagem da água. Detalhes sobre esta classificação, considerando as quatro classes de poros, e os cálculos para obtenção dos respectivos potenciais utilizados para drenar água desses poros, são encontrados em Almeida et al. (2017). Na determinação dos limites de diâmetro entre uma classe e outra podemos observar variação muito grande, mostrando que não é encontrado uma terminologia padrão de classificação do diâmetro de poros do solo (LIBARDI, 2005).

Adotando-se a segregação do espaço poroso, a porosidade do solo pode ser classificada como mono, bi ou multimodal, considerando o número de picos na curva de distribuição do tamanho dos poros (LU et al., 2014). Os solos caracterizados por arranjo bimodais têm seus poros provavelmente ocorrendo em dois domínios, sendo eles de matriz ou textural (poros intra-agregados) e estruturais (poros inter-agregados) (VANDERLINDEN et al., 2017; ZHOUE et al., 2017). Os poros de maior diâmetro, inter-agregados, são os poros estruturais predominantes, facilmente alterados pelo manejo (DEXTER, 2004). Os poros intra-agregados, são os poros de textura ocorrendo em faixa de diâmetro muito pequeno, que estão distribuídos entre partículas intraminerais ou agregados, principalmente em solos altamente intemperizados (OLIVEIRA et al., 2004; CARDUCCI et al., 2013). Dessa forma, um grande percentual de água pode permanecer retido nesses solos quando submetida a alto potencial matricial, principalmente em solos argilosos (SEVERIANO et al., 2011). Esses espaços porosos textural e estrutural são avaliados a partir do estudo da CCRAS, relacionando o conteúdo de água em função do potencial mátrico.

Na maioria dos solos, os espaços estruturais e texturais dos poros podem ser esvaziados e, portanto, avaliados em estudos convencionais de retenção de água, que cobrem a faixa de sucção da água no solo de 10 a 1500 kPa. Essa faixa de sucção permite estudar o esvaziamento de poros na faixa de tamanho de 300 a 0,2 μm de diâmetro cilíndrico efetivo (diâmetro equivalente), faixa que abrange os poros estruturais e os espaços de matriz (textura), conforme abordado em Dexter (2008). Segundo este autor, os poros estruturais também são importantes no fornecimento de espaços para os microrganismos e, portanto, são essenciais para que o solo desempenhe sua função de reator biológico, que decompõe e recicla materiais orgânicos, incluindo alguns poluentes.

O estudo do impacto na distribuição do tamanho de poros é geralmente negligenciado em experimentos de alteração do solo, porque é difícil quantificá-lo por métodos clássicos de campo/laboratório, inclusive diretos ou medição correta da distribuição do tamanho de poros a partir da curva de retenção de água, medições baseadas no conteúdo de água no solo ou em medidas geofísicas e inversão hidrológica (BUSCH et al., 2013; JONARD et al., 2015); curva de retenção medida por extratores de placas de pressão (BITTELLI; FLURY, 2009); a evaporação (ŽYDELIS et al., 2018); intrusão de mercúrio (SHI et al., 2017).

2.3 Manejo do solo *versus* atributos físicos

As plantas têm sido estudadas como mecanismo de resposta aos indicadores de qualidade do solo, principalmente em áreas agrícolas. Como o solo é um sistema dinâmico, não é fácil identificar os melhores parâmetros para detectar impactos, pois o ambiente está em constante modificação, tanto pela ação do homem quanto pela natureza (SUZUKI et al., 2014). A manutenção da qualidade do solo, ou a obtenção de melhorias por meio de sistemas de produção sustentáveis, são imprescindíveis para elevar a segurança alimentar e nutricional sem comprometer o equilíbrio entre as condições químicas, físicas e biológicas do solo (CORTEZ et al., 2018; COSTA; DRESCHER, 2018; SANTOS et al., 2019).

A estrutura do solo e o crescimento das plantas podem sofrer danos com o aumento da mecanização agrícola e da capacidade operacional de máquinas e a intensidade inadequada do tráfego. O uso dessas práticas de forma desordenada pode ocasionar um processo de compactação do solo, sendo uma das principais causas de degradação dos solos agrícolas, manejado de forma intensiva e inadequada, diminuindo sua capacidade produtiva. Dessa forma, este processo aumenta a densidade do solo, reduz sua capacidade de aeração e permeabilidade ao ar e à água, promove maior resistência mecânica para desenvolvimento do sistema radicular.

No sistema de preparo convencional, a sequência de operações com implementos, como arados e grades, promove a compactação e afeta a estrutura do solo, com alteração de atributos físicos do solo (MARASCA et al., 2015). Desse modo, nesse tipo de preparo do solo, há, geralmente, redução da qualidade do solo nos sistemas em que ocorre mobilização deste, devido às modificações ocasionadas nos atributos físicos, como aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração (MARASCA et al., 2015; SILVA; CASTRO, 2015).

Os impactos negativos ocasionados pela compressão mecânica, seja ela promovida pelo pisoteio animal ou pelo uso inadequado de máquinas e implementos agrícolas, são reduzidos quando é mantida a cobertura vegetal sobre a superfície do solo. Estudos comprovam que a

compressão mecânica aplicada sobre o solo ocasiona menos danos físicos, quando este apresenta teores consideráveis de cobertura no solo, como observado em Moreira et al. (2012).

O preparo reduzido do solo realizado com escarificadores de hastes diminui as operações agrícolas, quando comparado ao preparo convencional, resultando em menor incorporação de resíduos vegetais e inversão do solo, menor custo do preparo e redução das perdas de solo e água por erosão (FRANCZISKOWSKI et al., 2019). O preparo do solo, se executado em condições de umidade do solo na faixa de friabilidade, proporciona melhorias nas funções do solo como: aeração; disponibilidade e retenção de água, de nutrientes, além de beneficiar a estrutura do solo, todas envolvidas no crescimento e desenvolvimento radicular (VALADÃO et al., 2015). A adoção de sistemas de produção que favoreçam a conservação do solo, tendem a aumentar a distribuição de poros e a condutividade hidráulica próximo à superfície do solo, que quando aliada à composição granulométrica e ao teor de matéria orgânica, favorecem maior retenção e disponibilidade de água para as plantas (SILVA et al., 2005; SILVA et al., 2017).

A qualidade estrutural do solo é essencial para manter a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (ROSSETTI; CENTURION, 2018). Solos com boa estrutura são favoráveis ao crescimento das plantas, desde que, permitam a obtenção de água e nutrientes e com um suficiente espaço poroso, tendo-se assim o fornecimento adequado de oxigênio (POTT et al., 2018). O funcionamento e distribuição do tamanho dos poros é um dos atributos físicos que podem ser abordados para avaliar a qualidade física, devido aos seus diferentes efeitos e aspectos nos sistemas de uso do solo (STARKLOFF et al., 2017).

Uma das propriedades físicas mais importante, a ser utilizada na avaliação de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejos, é o espaço poroso do solo, podendo ser dividido em estrutural e textural e, normalmente são avaliados pela curva de retenção de água no solo (DEXTER, 2008), além de ter relação com a estrutura, arranjo das partículas, infiltração e retenção de água, atividade microbiana e armazenamento de CO₂ proveniente da atmosfera (KRAVCHENKO et al., 2019).

Assim, o monitoramento da qualidade do solo por meio de seus atributos físicos é importante para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, buscando o menor impacto ambiental (MILAGRES et al., 2018).

2.4 Cultivo de cana-de-açúcar e sua relação com os atributos físicos do solo

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, sendo cultivada em mais de 100 países; é uma espécie de gramínea bastante adaptada ao clima tropical do Brasil, sendo

usada como matéria prima na produção de açúcar e álcool. O Brasil e a Índia respondem, em conjunto, por pouco mais da metade da cana produzida mundialmente, com o 37,8 e 19,6%, respectivamente (ARCOVERDE et al., 2019; CONAB, 2020).

A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior importância no agronegócio brasileiro (ARCOVERDE et al., 2019). Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com grande importância no cenário agrícola brasileiro-mundial. Para a safra 2023/2024, a estimativa aponta para um aumento na produção da cultura em comparação à safra passada. Tendo uma estimativa de que sejam colhidos 677,6 milhões de toneladas, um volume 10,9% maior em relação à safra 2022/2023 (CONAB, 2023).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), para a safra 2023/2024, a região Centro-Sul destaca-se na produção de cana-de-açúcar, totalizando 614,08 milhões de toneladas da produção nacional. A região Norte/Nordeste tem produção de 63,53 milhões de toneladas. No estado de Pernambuco a estimativa de produção é de mais de 14 milhões de toneladas de cana na safra de 2023/2024, sendo que o estado de São Paulo é o maior produtor Nacional.

O sistema de colheita mecanizado da cana-de-açúcar está cada vez mais presente nos sistemas de produção no Brasil, e tem avançado muito nos últimos anos com o uso de colhedoras desenhadas especialmente para esse fim. Na safra 2008/2009, esse sistema apresentava percentual de 37,1%, e na safra atual está estimado em 89,1% da área total (CONAB, 2020). A Região Centro-Sul, favorecida pelo seu relevo plano, a colheita mecanizada já chega a 97,1% da área total, enquanto a Região Norte/Nordeste por apresentar um relevo mais declivoso, apenas 23,4% da colheita é mecanizada. Nos estados de Alagoas e Pernambuco, onde se concentra mais de 60% da área colhida dessa região, esse sistema mecanizado é ainda mais precário, sendo 22,2 e 4,3%, respectivamente; devido as áreas de produção serem acidentadas e com declives acentuados e, por outro lado, nessa região existe uma maior disponibilidade de mão de obra (CONAB, 2020; CONAB, 2023).

O sistema de produção da cana-de-açúcar requer intensa mecanização agrícola altamente tecnificada em todo o ciclo da cultura. O uso intenso da mecanização resulta em problemas de degradação do solo, sendo o principal a compactação (SILVA; CASTRO 2015; MARASCA et al., 2015; VISCHI FILHO et al., 2015), que pode afetar a produção e a longevidade do canavial (FAGUNDES et al., 2014), bem como a área explorada pelo sistema radicular (MARASCA et al., 2015).

Arcoverde et al. (2019), ao avaliarem atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar em função do tipo de preparo e época de

amostragem, observaram que os valores médios dos atributos físicos nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, ao longo do tempo, teve aumento de densidade do solo, porosidade total, microporosidade e resistência do solo à penetração de raízes, com redução de macroporosidade. Esses autores também verificaram baixos valores de macroporosidade em ambos os sistemas, sendo inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mínimo adequado para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, o que é considerado crítico para o crescimento das raízes na maioria das culturas (ROSSETTI; CENTURION, 2013), como também observado por outros autores.

De fato, Araújo et al. (2013), ao avaliarem dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional, verificaram também baixos valores de macroporosidade, inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas camadas avaliadas; porém, com valores de microporosidade acima de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que pode indicar maior compactação na área do estudo.

Correa et al. (2014), avaliando a resistência do solo à penetração de raízes (RP) e densidade do solo (Ds) como indicadores na análise da susceptibilidade à erosão hídrica dos solos, observaram que os valores de RP em áreas cultivadas com cana-de-açúcar foram superiores aos observados nas áreas com pastagens, e que os valores de Ds também foram indicativos de maior degradação dos solos.

Apesar dos benefícios do sistema de plantio direto na cultura da cana-de-açúcar, há necessidade de informações acerca dos impactos da adoção de tais sistemas de manejo do solo, tanto ocasional como a longo prazo, a fim de estabelecer relação entre os efeitos da compactação, com os atributos físicos do solo e o desenvolvimento da cultura (ARCOVERDE et al., 2019).

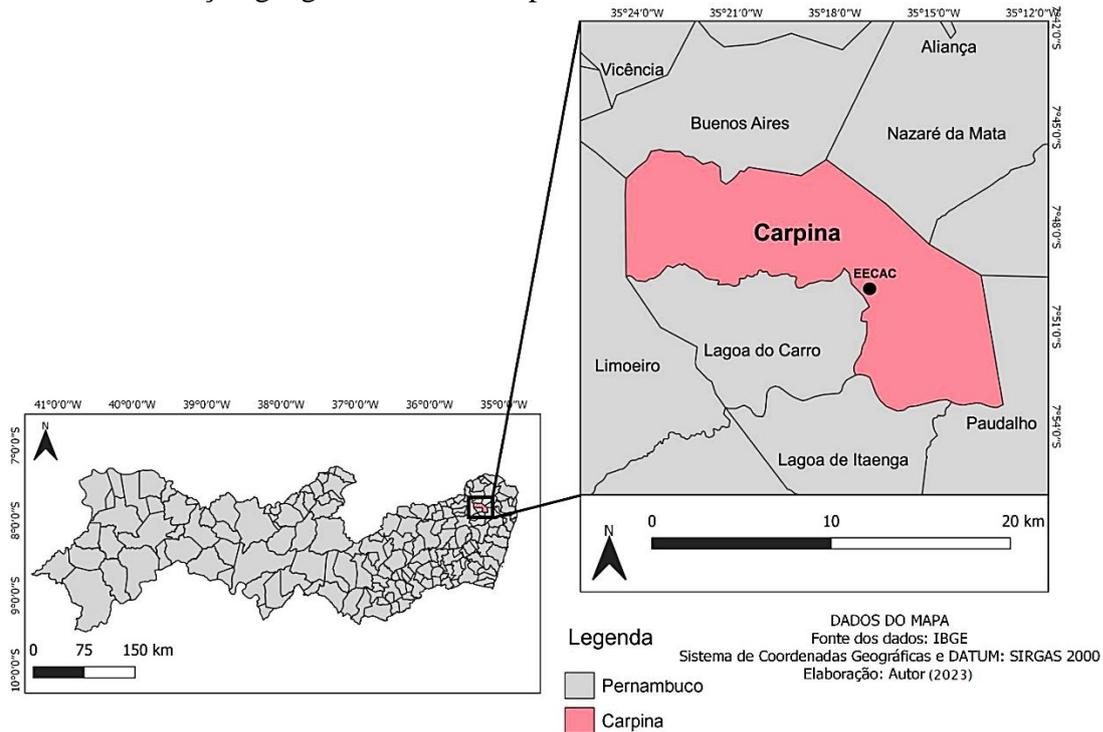
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental, coleta e preparo das amostras

A área experimental selecionada para realização do estudo está localizada na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco - Brasil, no município de Carpina – PE, na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina – EECAC (Figura 1), sendo composta por três subáreas sob diferentes tempos de implantação da cultura da cana-de-açúcar (2ª folha – 2 anos de cultivo; 5ª folha – 5 anos de cultivo; 7ª folha – 7 anos de cultivo), antes de realizar-se o plantio dessas subáreas, anteriormente as áreas já eram cultivadas com cana-de-açúcar por pelo menos cinco anos.

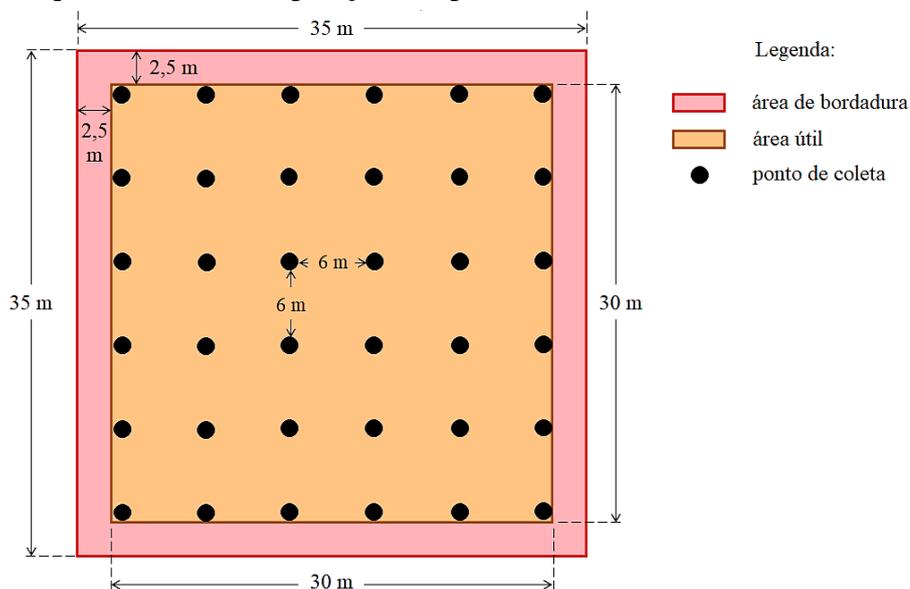
Segundo a classificação Köppen-Geiger, o clima que predomina na região da Zona da Mata Norte é do tipo As’ – quente e úmido. A precipitação média anual é de 1106 mm, com maiores precipitações no outono/inverno e estação seca no verão (TAVARES et al., 2017). A amostragem de solo foi realizada seguindo um croqui (Figura 2) com 36 pontos amostrais em cada camada do solo, para os diferentes tempos de implantação da cultura.

Figura 1 - Localização geográfica da área experimental.



Fonte: arquivo pessoal

Figura 2 - Croqui ilustrando a disposição dos pontos de coleta



Fonte: Adaptado de Silva (2022)

As amostras dos solos necessárias para a determinação das suas variáveis foram coletadas em um Argissolo Amarelo distrocoeso (TAVARES et al., 2017), nas profundidades de 0-0,15 m e 0,15-0,30 m, em duas formas: cilindros volumétricos e blocos. Para os ensaios físico-hídricos que exigem a manutenção da estrutura do solo (distribuição do diâmetro de poros, curva característica de retenção de água no solo, condutividade hidráulica saturada, densidade do solo e resistência do solo à penetração de raízes), a amostragem foi realizada por meio de cilindros volumétricos (volume $\cong 100 \text{ cm}^3$), inseridos ao solo via amostrador do tipo Uhland (Figura 3).

Figura 3 – Coleta de amostras utilizando amostrador tipo Uhland (A); desacoplamento entre o cachimbo e o amostrador (B); conjunto cilindro-amostra no cachimbo e amostras embaladas (C), para transporte ao laboratório.



Fonte: arquivo pessoal

Desse modo, foram coletados 36 conjuntos cilindro-amostra para cada profundidade, totalizando 72 conjuntos (36 pontos \times 2 profundidades) para cada tempo de implantação da cultura. Logo, o total de conjuntos cilindro-amostra nas três subáreas (2^a, 5^a e 7^a folha) foi de 216 amostras (72 conjuntos \times 3 subáreas).

Para os demais ensaios físicos dos solos, foram coletadas amostras em blocos (volume $\cong 4000 \text{ cm}^3$), com auxílio de pá de corte (Figura 4), retirando em laboratório os agregados para determinar os índices de agregação dos solos e a resistência tênsil dos agregados. O restante do solo de cada amostra, após a retirada dos agregados, foi destorroado, seco ao ar, tamisados em peneiras com malha de 2,0 mm, obtendo a terra fina seca ao ar (TFSA), utilizada nos outros ensaios que não exigem a manutenção da estrutura (fator F, determinação das frações granulométricas e densidade de partículas sólidas do solo), bem como os ensaios de química e de fertilidade dos solos, como pH e carbono orgânico.

Para a curva característica de retenção de água nos solos (CCRAS) foram utilizados cinco conjuntos cilindro-amostra para cada ponto da curva, num total de sete pontos, sendo reservado mais um conjunto extra para ser utilizado nas leituras do WP4-T.

Figura 4 – Coleta de amostras na trincheira (A); amostra sendo medida para ser separada nas profundidades determinadas (B); amostras prontas para serem embaladas e levadas ao laboratório (C).



Fonte: arquivo pessoal

As amostras em blocos, também totalizando 216, foram previamente envolvidos em plásticos (filme e bolha), para proteção durante o transporte ao Laboratório de Física do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Além dos ensaios de física, em amostras estruturadas e em TFSA, parte das amostras em TFSA também foram utilizadas para determinação de alguns atributos químicos e de fertilidade do solo, que foram realizados no Laboratório de Química do Solo da UFRPE.

3.2 Determinações dos atributos físicos dos solos

3.2.1 Distribuição do diâmetro de poros e curva característica de retenção de água no solo

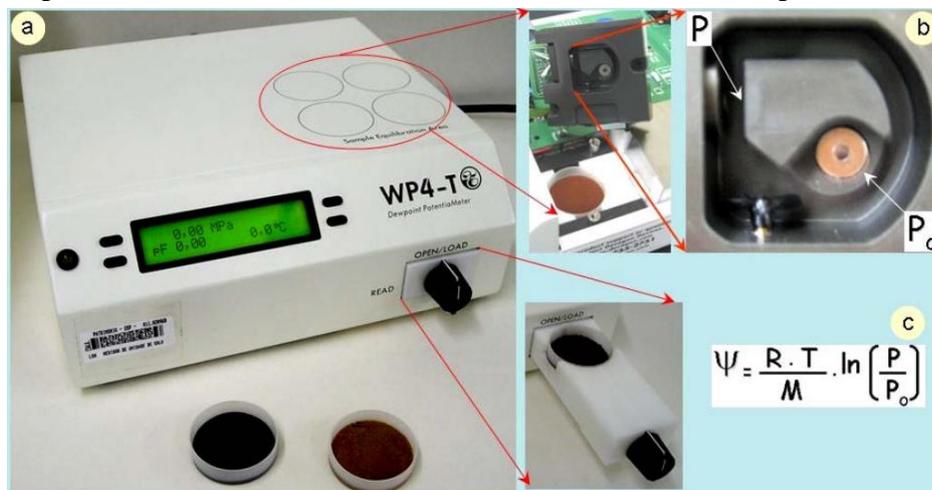
A construção das curvas de distribuição de poros do solo e de retenção de água foi feita a partir da determinação do conteúdo volumétrico de água (θ) retido no solo em seu respectivo potencial mátrico (Ψ), isto é, energia de retenção (LIBARDI, 2005; CARDUCCI et al., 2015; PEREIRA, 2016). Para isso, as amostras não estruturadas (conjunto cilindro-amostra) foram inicialmente saturadas e em seguida submetidas aos Ψ de 1, 6 e 10 kPa, utilizando a mesa de tensão (OLIVEIRA, 1968), e de 33, 80, 300 e 1.500 kPa, na câmara de Richards com placas porosas, conforme metodologia sugerida em Dane e Hopmans (2002).

Como os extratores de placa porosa só é possível aplicar Ψ até 1.500 kPa, os demais pontos da curva (faixa mais seca), para determinação das subdivisões da criptoporosidade,

foram obtidos com o uso de um psicrômetro de termopar. Foi utilizado o modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (Decagon Device, 2000), onde é possível obter leituras de Ψ elevados (1.500 a 15.000 kPa), faixa na qual a estrutura do solo não tem mais efeito na retenção de água.

Portanto, os ensaios no WP4-T (Figura 5) foram utilizadas subamostras de solo não estruturadas, obtidas a partir dos conjuntos extras de cilindro-amostra, após seu equilíbrio no Ψ à 1.500 kPa (câmara de Richards). Para tanto, foi utilizada espátula para remoção de aproximadamente 2 g de subamostras dos cilindros, transferidas para cápsula própria do equipamento, sendo em seguida inserida na câmara hermética de leitura. Desse modo, o potencial matricial foi obtido a partir do ponto de orvalho, ou seja, no equilíbrio do conteúdo de água no interior da câmara com o potencial da água no solo (SCALON et al., 2002; DECAGON DEVICE, 2000; ALMEIDA, 2008). Para caracterização do segmento da curva referente aos elevados potenciais matriciais, foram realizadas quatro leituras entre os potenciais de 1.500 e 15.000 kPa (leituras a 3.000, 6.000, 10.000 e 15.000 kPa).

Figura 5 – Psicrômetro com detalhes para: a) vista externa, e amostras nas cápsulas; b) vista interna, em particular, a câmara de leitura; c) equação de Kelvin, utilizada pelo software do equipamento para calcular o Ψ , fornecendo a leitura no visor (MPa ou pF).



Fonte: Almeida (2008)

A partir dos dados experimentais, a curva característica de retenção de água no solo (CCRAS), foi ajustada aplicando-se os modelos de Van Genuchten (1980), baseado em regressão múltipla não linear, e Dexter et al. (2008), utilizando o modelo matemático duplo exponencial, conforme as equações (1) e (2), respectivamente.

$$\theta = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad (1)$$

Em que: θ = umidade volumétrica de solo em cada tensão; θ_{sat} = define a assíntota superior da curva ($h \rightarrow 0$) e representa o conteúdo de água no solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_{res} = define a assíntota

inferior da curva ($h \rightarrow \infty$) e representa o conteúdo de água residual no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); h = é a tensão da água no solo (kPa); m , n , e α são parâmetros empíricos da curva de retenção, sendo $m = 1 - 1/F$ (Mualem, 1976) onde F é adimensional e reflete a forma da curva; n e α são obtidos pelo método dos quadrados mínimos, com α expresso em kPa^{-1} e n e m são grandezas adimensionais.

$$U = C + A_1 e^{(-h/h_1)} + A_2 e^{(-h/h_2)} \quad (2)$$

Onde: U = umidade gravimétrica do solo (kg kg^{-1}), que é expressa em função do potencial mátrico (h); C = assíntota da equação e corresponde ao conteúdo de água residual; A_1 e A_2 descrevem o conteúdo de água referente à porosidade textural e estrutural, respectivamente; h_1 e h_2 = potenciais mátricos aplicados para esvaziar o espaço poroso textural e estrutural, respectivamente.

A distribuição do tamanho dos poros foi calculada a partir da diferenciação do modelo duplo exponencial, equação (2), em relação ao potencial mátrico, conforme sugerido em Dexter et al. (2008). O diâmetro efetivo dos poros texturais (δ_1) e dos poros estruturais (δ_2), em μm , foi calculado usando a equação (3).

$$\delta = 4 \sigma / h \quad (3)$$

Onde: σ = tensão superficial da água, assumida como igual a $7,29 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-1}$ a 20°C ; h é o potencial mátrico, expresso em hPa.

As razões de vazios dos poros residuais (e_{residual}), texturais (e_{textural}) e estruturais ($e_{\text{estrutural}}$), foram obtidas por meio das equações (4), (5) e (6), respectivamente.

$$e_{\text{residual}} = C (\rho_s / \rho_\theta) \quad (4)$$

$$e_{\text{textural}} = A_1 (\rho_s / \rho_\theta) \quad (5)$$

$$e_{\text{estrutural}} = A_2 (\rho_s / \rho_\theta) \quad (6)$$

Onde: ρ_s = densidade das partículas sólidas do solo; ρ_θ = densidade da água; C , A_1 e A_2 correspondem aos parâmetros de ajuste da equação (2).

A partir dos ensaios para determinação da CCRAS, os dados obtidos por meio dos conjuntos cilindro-amostra foram usados para determinação da porosidade total (P_t) e a sua distribuição por tamanho de poros (DTP). Os poros foram separados por classes de diâmetro equivalente dos poros ($\varnothing_{\text{eq.poros}}$) fazendo uso da equação de Young-Laplace, equação (7), que pode ser reescrita de modo a calcular o $\varnothing_{\text{eq.poros}}$ em função da energia potencial da água no solo [$\varnothing_{\text{eq.poros}}(\Psi)$], como expresso pela equação (8).

$$\Psi = 2\sigma \cos\alpha / D_a g r_p \quad (7)$$

$$\varnothing_{\text{eq.poros}} = 4 \sigma \cos\alpha / D_a g \Psi \quad (8)$$

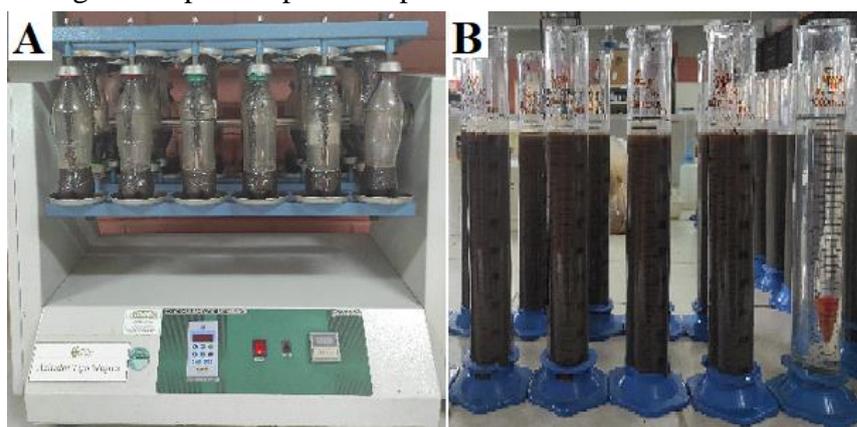
Onde: Ψ = o potencial total da água no solo, que representa a energia com que a água está retida no poro do solo; σ = tensão superficial da água; α = o ângulo de contato entre o menisco de água e a parede do poro; D_a = densidade da água; g = aceleração da gravidade; r_p = raio do poro.

Dessa forma, foram obtidas as classes de tamanho de poros, onde, na classificação de Prevedello e Armindo (2015): macroporos são poros com $\varnothing_{eq,poros} \geq 300 \mu m$; mesoporos estão entre a faixa com $50 < \varnothing_{eq,poros} (\mu m) < 300$. Já os microporos estruturais e biológicos, que retêm água na capacidade de campo, foram definidos nesse estudo como poros entre a faixa com $30 < \varnothing_{eq,poros} (\mu m) \leq 50$; tendo os microporos texturais $0,2 < \varnothing_{eq,poros} (\mu m) \leq 30$. Por fim, os denominados de criptoporos são poros com $\varnothing_{eq,poros} \leq 0,2 \mu m$.

3.2.2 Análise granulométrica

A granulometria do solo é uma análise baseada na sedimentação das partículas minerais (areia, silte e argila) que constituem o solo, conforme teoria proposta por Stocks. A determinação foi feita utilizando-se o método do densímetro de Bouyoucos (GEE; BAUDER, 1986), modificada por Almeida (2008). Nesta metodologia, utilizou-se 50 g de TFSA em um recipiente específico, tendo a solução hexametáfosfato de sódio + carbonato de sódio (Calgon) como dispersante químico; com dispersão física via agitação mecânica, por meio do agitador do Tipo Wagner (Figura 6A), por 16h a 50 rpm.

Figura 6 – Processo de dispersão via agitador do Tipo Wagner (A); material em suspensão que foi transferido das garrafas para as provetas para realizar a leitura com o densímetro (B).



Fonte: arquivo pessoal

Após esses procedimentos, a suspensão (solo + dispersante) foi transferida para proveta de 1 L (Figura 6B), realizando-se a leitura da argila após 24h. Em seguida, a areia contida na proveta foi obtida por meio da lavagem e peneiramento (malhas de 0,053mm), e transferida

para lata e levada à estufa (105°C, 24h), e posteriormente pesada. Para a determinação da argila dispersa em água, foi utilizado o mesmo procedimento da determinação da análise anterior, porém, sem o uso do dispersante químico. Os dados gerados nesses ensaios foram utilizados para calcular as frações areia total e subfrações, silte e argila, conforme Almeida et al. (2017).

3.2.3 Grau de flocculação

A partir dos dados das argilas via dispersante químico e natural (água) foi possível calcular o grau de flocculação do solo (ALMEIDA et al., 2017), conforme equação (9).

$$GF = [(Arg_{total} - Arg_{água}) / Arg_{total}] \times 100 \quad (9)$$

Em que: GF = grau de flocculação do solo (%), Arg_{total} é o teor de argila total da amostra (%); $Arg_{água}$ é o teor de argila dispersa em água ou argila natural (%).

3.2.4 Densidade do solo e de suas partículas sólidas

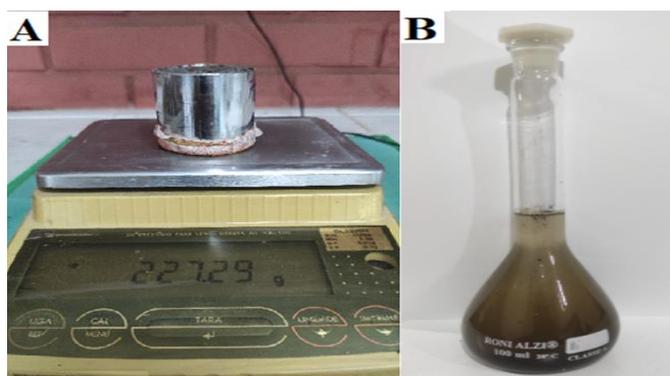
Segundo Libardi (2005), o termo densidade refere-se à massa que o volume de um determinado corpo possui. Sendo assim, a determinação da densidade do solo (D_s) foi obtida pela razão entre massa de sólidos do solo e seu respectivo volume, utilizando-se o método do cilindro volumétrico (Figura 7A), sugerido em Almeida et al. (2017), conforme equação (10).

$$D_s \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = m_{ss} / vol \quad (10)$$

Em que: D_s = densidade do solo (g cm⁻³); m_{ss} = massa do solo seco mantido em estufa a 105 °C, por um intervalo mínimo de 48 horas, ou até atingir o peso constante; vol = é o volume da amostra de solo no cilindro (cm³), calculado pela da expressão ($\pi \times r^2 \times h$).

A densidade de partículas sólidas do solo (D_p) foi obtida por meio do método do balão volumétrico (Figura 7B), conforme sugerem Viana et al. (2017).

Figura 7 – Amostra em cilindro volumétrico seco em estufa para pesagem e determinação da densidade do solo (A); balão volumétrico para determinação da densidade de partículas sólidas do solo (B).

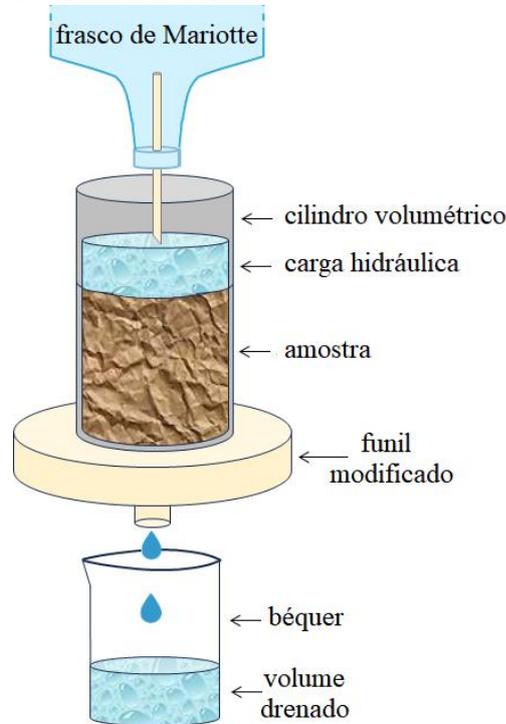


Fonte: arquivo pessoal

3.2.5 Condutividade hidráulica saturada

Os ensaios para determinação da condutividade hidráulica saturada dos solos (K_{sat}), foram realizados utilizando o método do permeâmetro de carga constante, descrito em Reynolds e Elrick (2002), sendo este método utilizado para quantificar o fluxo de água que permeia o solo com base na Lei de Darcy. Os conjuntos cilindro-amostra (100 cm^3) foram previamente saturados em água destilada, por 48 horas. Após o período de saturação, as amostras foram submetidas à aplicação de uma carga hidráulica no permeâmetro de carga constante (Figura 8) até atingir o equilíbrio na taxa de percolação do líquido coletado (água).

Figura 8 – Esquema do permeâmetro de carga constante utilizados nos ensaios de determinação da condutividade hidráulica saturada dos solos.



Fonte: arquivo Brivaldo Gomes de Almeida (2023)

Desse modo, os valores de K_{sat} , expressos em cm h^{-1} , foram obtidos conforme equação (11), que foi deduzida a partir da equação de Darcy.

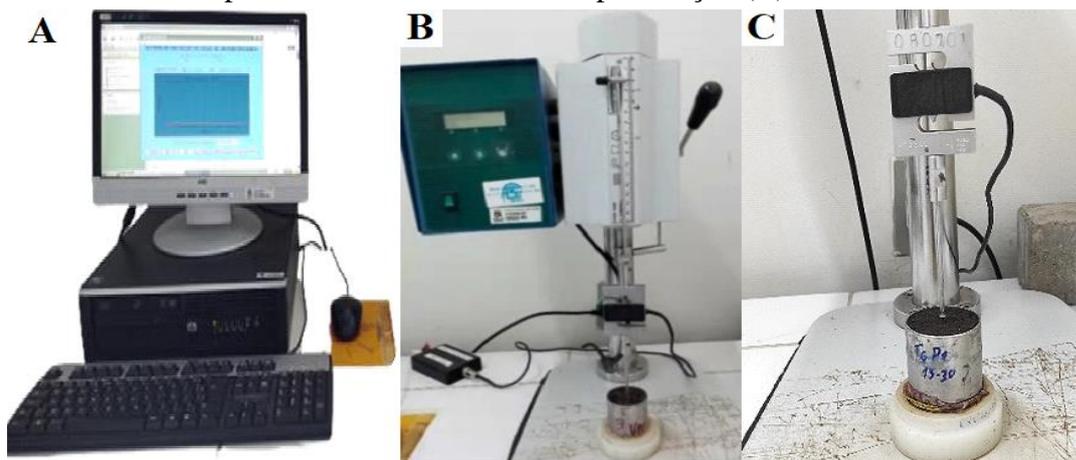
$$K_{sat} (\text{cm h}^{-1}) = (V_a \times L) / A \times T (\Psi_c - \Psi_b) \quad (11)$$

Onde: V_a = volume de água coletado (cm^3); L = altura do corpo de prova (cm); A = área da seção transversal do cilindro (cm^2); T = tempo de fluxo da água pelo corpo de prova (h); Ψ_c = potencial total na parte de cima do corpo de prova, que corresponde a $L + h$; e Ψ_b = potencial total na parte de baixo do corpo de prova, cujo o valor é zero.

3.2.6 Resistência do solo à penetração de raízes

A resistência do solo à penetração de raízes (RP) foi determinada em laboratório, nos conjuntos cilindro-amostra, logo após equilibrados durante a elaboração da CCRAS, nos Ψ de 1, 6 e 10 kPa, utilizando a mesa de tensão, e de 33, 80, 300 kPa, via câmara de Richards, com o auxílio de um penetrômetro de bancada da marca Marconi® modelo MA933 (Figura 9), que aplica uma carga constante atingindo 4 mm min^{-1} , por meio de uma agulha com diâmetro do cone de 4 mm e ângulo de 30° , acoplada a uma célula de carga de 20 kg, onde o *software* específico do equipamento realizou as leituras via célula de carga, gerando um arquivo de texto com os dados para cada amostra em MPa, sendo estes associados às umidades volumétricas dos conjuntos cilindro-amostra equilibrados em cada ponto preestabelecido.

Figura 9 – Computador que faz o registro das leituras de resistência a penetração (A); penetrômetro de bancada para realização do ensaio de resistência a penetração (B); amostra em cilindro volumétrico após o ensaio de resistência à penetração (C).

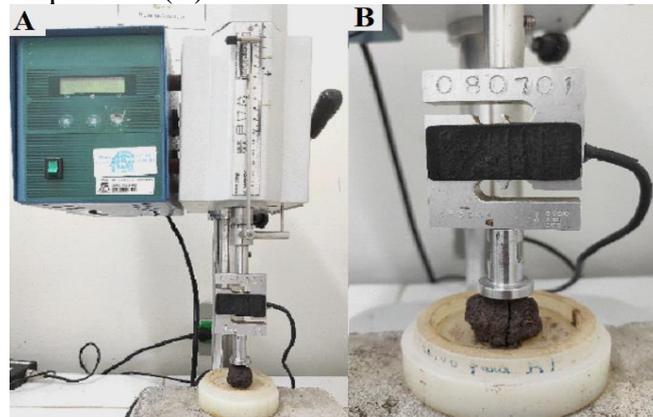


Fonte: arquivo pessoal

3.2.7 Resistência tênsil de agregados do solo

Os ensaios de ruptura dos agregados para determinação da força máxima de ruptura exercida por unidade de área, foram realizados utilizando-se de um penetrômetro de bancada (Figura 10). Os agregados coletados em campo foram separados manualmente em laboratório, por meio da sua superfície de fraqueza, depois passados em peneiras com malha de 25 mm e de 20 mm, tendo-se o diâmetro médio dos agregados calculado pela dimensão média entre as duas peneiras (22,5 mm). Posteriormente esses agregados, foram levados para estufa de circulação de ar forçada, na temperatura constante de 45°C , para homogeneização da umidade, e levados a uma sala com temperatura controlada para um novo equilíbrio (23°C), sendo realizados os ensaios de ruptura nessas condições.

Figura 10 – Penetrômetro de bancada para realização do ensaio de resistência tênsil (A); agregado após o seu rompimento (B).



Fonte: arquivo pessoal

A partir desse ensaio, a resistência tênsil de agregados do solo (RT) foi calculada conforme preconizado em Dexter e Kroesbergen (1985), a partir da equação (12).

$$RT = 0,576 (P_{m\acute{a}x} / D_{ef}^2) \quad (12)$$

Onde: 0,576 = coeficiente de proporcionalidade; $P_{m\acute{a}x}$ = força máxima aplicada para ruptura do agregado (expressa em N); D_{ef} é o diâmetro efetivo (m), calculado conforme sugerem Watts e Dexter (1998), segundo equação (13).

$$D_{ef} = D_m (M_i / M_o)^{0,3333} \quad (13)$$

Em que: D_m = diâmetro médio do agregado (m), calculado pela média dos tamanhos das peneiras utilizadas na separação dos agregados; M_i = massa do agregado individual (g); M_o = massa média dos agregados na população (g).

3.2.8 Índices de agregação do solo

Os ensaios para determinação dos índices de agregação do solo foram realizados conforme metodologia proposta em Nimmo e Perkins (2002) e em Salton et al. (2017), que tem como princípio avaliar a resistência dos agregados à fratura, promovida nas suas superfícies de fraqueza, quando submetidos à duas forças de ruptura, sob condições distintas de umidade.

No primeiro caso, os agregados são submetidos ao tamisamento a seco, sob vibrações na horizontal, utilizando-se o agitador mecânico vibratório (Figura 11A). No segundo caso, o peneiramento dos agregados é por via úmida, sob oscilações verticais e imersos em água, empregando o agitador do tipo Yoder (Figura 11B e 11C).

Nessas condições, foram utilizados 25g de agregados dos solos secos ao ar, com diâmetro médio de 5,32 mm, sendo colocados no topo do conjunto de tamisação de cada equipamento, formado por cinco peneiras, com malhas na ordem decrescente em diâmetro,

com: 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,125 mm. Os efeitos das ações de ruptura dos agregados foram avaliados em função das massas restantes em cada peneira, tendo-se seis classes de diâmetros equivalentes ($\varnothing_{eq.}$): 1) 5,32 – 2,00 mm; 2) < 2,00 – 1,00 mm; 3) < 1,00 – 0,5 mm; 4) < 0,5 – 0,25 mm; 5) < 0,25 – 0,125mm; 6) <0,125 mm. Assim, com base nesses dados, os índices de agregação dos solos foram calculados, e comentados a seguir (3.2.8.1 e 3.2.8.2).

Figura 11 – Agitador mecânico vibratório (A); agitador do tipo Yoder (B); conjunto de peneiras do Yoder (C).



Fonte: A) <https://www.directindustry.com/pt/prod/jisico-co-ltd/product-40518-1351607.html>; e B) e C) https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/5938_mesa_para_peneiramento_por_via_umida.

3.2.8.1 Diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico

A obtenção do diâmetro médio ponderado de agregados úmidos (DMP_U) e secos (DMP_S), foi realizada a partir da massa de agregados retida em cada peneira, usando-se as equações (14) e (15). Do mesmo modo, essas massas foram usadas no cálculo do diâmetro médio geométrico de agregados úmidos e secos (DMG_U e DMG_S , respectivamente), seguindo a metodologia proposta em Kemper e Rosenau (1986), com modificações indicadas em Cesário et al. (2010), por meio das equações (16) e (17).

$$DMP_U \text{ (mm)} = \sum (X_{is} \times W_{is}) \quad (14)$$

$$DMP_S \text{ (mm)} = \sum (X_{iu} \times W_{iu}) \quad (15)$$

$$DMG_U \text{ (mm)} = \text{EXP} \sum (W_{iu} \times \ln X_{iu} / \sum W_{iu}) \quad (16)$$

$$DMG_S \text{ (mm)} = \text{EXP} \sum (W_{is} \times \ln X_{is} / \sum W_{is}) \quad (17)$$

Onde, os índices: DMP_U , DMP_S , DMG_U e DMG_S são expressos em mm; X_{is} = diâmetro médio de cada classe de agregado por via seca (mm); W_{is} = proporção de agregados em cada classe de

peneira (i) por via seca (%); X_{iu} = diâmetro médio de cada classe de agregado por via úmida (mm); W_{iu} = proporção de agregados em cada classe de peneira (i) por via úmida (%).

3.2.8.2 Índice geral de estabilidade dos agregados

O índice geral de estabilidade de agregados (IGEA) foi obtido mediante relação entre os valores dos DMP_U e DMP_S , conforme metodologia proposta em Salton et al. (2017), sendo calculado via equação (18).

$$IGEA_{(\%)} = DMP_{U(mm)} / DMP_{S(mm)} \quad (18)$$

3.3 Atributos químicos do solo

Alguns atributos dos solos foram utilizados para a sua caracterização química. Nesse sentido, o teor de carbono orgânico do solo foi obtido a partir da determinação do carbono orgânico total, em via úmida, pela oxidação com o dicromato de potássio ($0,0667 \text{ mol L}^{-1}$), após maceração e tamisação da TFSA em peneira com malha de 80 mesh, conforme descrito em Teixeira et al. (2017). O estoque de carbono foi calculado a partir dos dados de carbono orgânico do solo, densidade do solo e profundidade da camada da coleta, via metodologia proposta em Ellert e Bettany (1995), e adaptações sugeridas em Fernandes e Fernandes (2009), conforme a equação (19).

$$\text{Est. C} = (\text{C.O.} \times D_s \times E) / 10 \quad (19)$$

Onde: Est. C = Estoque de carbono orgânico do solo (Mg ha^{-1}); C.O. = carbono orgânico do solo (g kg^{-1}); D_s = densidade do solo (g cm^{-3}); E = espessura da camada na coleta (cm).

A medição do pH (potencial hidrogeniônico) do solo, foi realizada por meio do eletrodo combinado imerso em suspensão solo/líquido (água) na proporção 1:2,5, conforme metodologia proposta no manual de métodos de análise de solos da EMBRAPA (TEIXEIRA et al., 2017). Os dados obtidos a partir das determinações químicas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Atributos químicos utilizados para a caracterização de Argissolo, sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos).

| Folha | Prof | pH | C.O. | Est. C |
|-------|--------|------------------|--------------------|---------------------|
| | - cm - | H ₂ O | g kg^{-1} | Mg ha^{-1} |
| 2 | 0-15 | 5,60 | 9,97 | 22,13 |
| | 15-30 | 5,55 | 8,86 | 20,73 |
| 5 | 0-15 | 5,03 | 12,75 | 28,11 |
| | 15-30 | 5,18 | 12,23 | 26,60 |
| 7 | 0-15 | 5,29 | 13,96 | 33,50 |
| | 15-30 | 5,26 | 13,98 | 32,71 |

Prof. = profundidade da coleta; C.O. = teor de carbono orgânico total; Est. C = estoque de carbono orgânico do solo.

3.4 Análise estatística dos dados

Os dados do conteúdo de água e do potencial mátrico dos solos foram ajustados a equação de Van Genuchten (1980), e ao modelo duplo exponencial de Dexter et al. (2008), por meio dos procedimentos de ajuste não lineares do *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013).

Os dados obtidos para caracterização dos solos foram avaliados por meio da análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de ($p < 0,05$). Foi realizada também a análise de correlação de Pearson entre os dados da caracterização física do solo. Os coeficientes de correlação de Pearson (r) foram classificados em faixas de valores: onde: para $0 < r \leq |0,1|$, indica correlação insignificante ou nula; para $|0,1| < r \leq |0,3|$, fraca; para $|0,3| < r \leq |0,8|$, moderada; para $|0,8| < r \leq |0,9|$, forte; para $|0,9| < r \leq |1,0|$, muito forte; e para $r = 1,0$ sugere correlação perfeita.

Além disso, os dados foram avaliados por meio da estatística multivariada, pela análise de componentes principais (ACP), utilizando-se o *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013). A ACP foi utilizada para determinar os atributos físicos possivelmente mais afetados pelas condições do tempo de uso do solo (2^a, 5^a e 7^a folha).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística dos resultados da granulometria dos solos das subáreas estudadas é apresentada na Tabela 2, com classes texturais variando de Franco Argiloso Arenoso (Folha 5) e Franco Arenoso (Folhas 2 e 7).

Tabela 2 – Análise granulométrica do Argissolo sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos).

| Folha | Areia | | | Silte | Argila | ADA | GF | GD | S/A | Classe Textural |
|--------------------------------|--------|-------|---------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-----------------|
| | Grossa | Fina | Total | | | | | | | |
| ----- g kg ⁻¹ ----- | | | ----- % ----- | | | adm | | | | |
| 0-15 cm | | | | | | | | | | |
| 2 | 545a | 239c | 784b | 61a | 155b | 135b | 12a | 88a | 0,40a | Fr-Aren |
| 5 | 488b | 248b | 735c | 50a | 215a | 187a | 13a | 87a | 0,23b | Fr-Arg-Aren |
| 7 | 524a | 286a | 810a | 42a | 148b | 121b | 18a | 82a | 0,28b | Fr-Aren |
| 15-30 cm | | | | | | | | | | |
| 2 | 516a | 240c | 756b | 63a | 181b | 161b | 11b | 89a | 0,35a | Fr-Aren |
| 5 | 441b | 252b | 693c | 69a | 238a | 181a | 18ab | 82ab | 0,39a | Fr-Arg-Aren |
| 7 | 510a | 290a | 800a | 33b | 167b | 124b | 25a | 75b | 0,20b | Fr-Aren |
| CV | 10,30 | 10,87 | 3,53 | 72,73 | 21,41 | 23,50 | 107,00 | 20,78 | 106,30 | |

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna em cada variável não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Prof. = Profundidade amostrada; ADA = Argila dispersa em água; GF = Grau de floculação; GD = Grau de dispersão; S/A = relação silte/argila; adm = adimensional; Fr-Aren = Franco Arenoso; Fr-Arg-Aren = Franco-Argilo-Arenoso; CV = Coeficiente de variação (%).

É possível observar que os resultados apontam diferenças estatísticas nos atributos entre as subáreas avaliadas, em função da profundidade. Entretanto, em relação ao silte, grau de floculação (GF) e grau de dispersão (GD), apenas na camada de 0-15 cm de profundidade, não foi possível observar diferenças estatísticas entre as subáreas. Nestas, também se observa forte predominância da fração areia, com diferenças para a areia total (AT), com valores alcançando 810 g kg⁻¹ na subárea sob 7^a folha, e menor valor (693 g kg⁻¹) na 5^a folha.

Quando separamos a AT nas subfrações de AG e AF, observamos que a AG é superior à AF nas duas profundidades. A subfração AF tem maiores valores na 7^a folha, seguindo o mesmo comportamento das outras subfrações de areia, com menores valores na 2^a folha. A fração argila, nas duas profundidades analisadas, apresenta maiores valores na 5^a folha, e menores na 2^a e 7^a folhas. Uma característica que foi observada é que ocorre um aumento da fração de argila na camada mais profunda (15-30 cm), variando na subárea sob a 2^a folha de 155 a 181 g kg⁻¹; na 5^a folha de 215 a 238 g kg⁻¹, e na 7^a folha de 148 a 167 g kg⁻¹; em contraposição à fração areia, que tem acentuada concentração em superfície, e redução com o aumento da profundidade. Esse aumento das partículas mais finas em profundidade é uma

característica dos Argissolos, devido a translocação de argila ao longo do perfil, e assim, apresentarem o horizonte Bt, pela maior concentração de argila em relação às camadas superficiais. A fração silte foi a menos representativa dentre as outras frações granulométricas (areia e argila), apresentando diferença estatística apenas na camada 15-30 cm, com menores valores na 7ª folha. Assim, os valores de silte variou de 61 a 63 g kg⁻¹ na 2ª folha; de 49 a 69 g kg⁻¹ na 5ª folha; e de 42 a 33 g kg⁻¹ na 7ª folha, para as duas profundidades.

Ainda na Tabela 2, verifica-se que o grau de flocculação (GF) não apresentou diferenças estatísticas entre as subáreas na camada de 0-15 cm. Entretanto, na camada de 15-30 cm, é possível observar que as maiores médias foram obtidas na 7ª folha, seguida da 5ª e 2ª folhas, que não diferiram entre si. Esse atributo teve uma leve diferença, com o aumento na subárea da 7ª folha, sendo 18% na camada 0-15 cm e 25% na camada de 15-30 cm. Isso pode ter ocorrido pelo fato dessa subárea ter mais tempo de implantação (7 anos), levando a uma maior deposição de resíduos de forma constante, promovendo a cimentação de partículas, e assim, reduzindo o teor de argila dispersa em água (ADA), com aumento no GF.

Assim, avaliando a ADA observamos diferenças estatísticas entre seus valores, apresentando o mesmo comportamento para as duas profundidades. Em relação aos valores absolutos da ADA, esses são mais baixos na subárea da 7ª folha (121 g kg⁻¹ na camada 0-15 cm e 124 g kg⁻¹ na camada de 15-30 cm). Quando analisamos os valores do grau de dispersão (GD) das duas subáreas, apenas encontramos diferenças estatísticas na camada de 15-30 cm. Observando os valores médios da 2ª folha, nota-se que estes são mais altos (89% na camada 15-30 cm), onde os valores do GD é inversamente proporcional ao GF.

Quanto a relação silte/argila (S/A), os resultados mostram que houve diferenças significativas, com maiores médias na subárea sob a 2ª folha (0,40 para 0-15 cm) e, em profundidade (15-30cm), os maiores valores foram observados nas subáreas sob a 2ª e 5ª folhas (0,35 e 0,39 respectivamente), que não diferiram entre si, mas sendo maiores em relação à subárea da 7ª folha (0,20). Esses valores têm forte relação com os baixos teores de silte, e nessa baixa amplitude, sugerem que os solos apresentam um grau de intemperismo mais avançado.

Na Tabela 3, encontram-se os valores para densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica saturada (Ksat) e resistência tênsil de agregados (RT). Avaliando a Ds, é possível observar que, na camada de 0-15 cm, os maiores valores foram na subárea sob a 2ª folha (1,61 g cm⁻³). Já na camada de 15-30 cm, os menores valores de Ds foram observados na subárea sob a 5ª folha (1,44 g cm⁻³), não havendo diferenças entre os valores sob a 2ª e 7ª folhas (1,59 e 1,56 g cm⁻³, respectivamente).

Tabela 3 – Densidade do solo, condutividade hidráulica saturada do solo, resistência tênsil de agregados e resistência do solo à penetração de raízes em Argissolo, sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos).

| Folha | Prof | Ds | Ksat | RT |
|-------|--------|--------------------|--------------------|--------|
| | - cm - | g cm ⁻³ | mm h ⁻¹ | kPa |
| 2 | | 1,61a | 344a | 64,38a |
| 5 | 0-15 | 1,47b | 148b | 37,42b |
| 7 | | 1,48b | 106b | 26,41c |
| 2 | | 1,59a | 187a | 78,19a |
| 5 | 15-30 | 1,44b | 132a | 32,72b |
| 7 | | 1,56a | 97a | 39,23b |
| CV | | 6,14 | 70,87 | 36,54 |

Médias seguida de mesma letra minúscula na coluna em cada variável não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Ksat = Condutividade hidráulica saturada do solo, Ds = Densidade do solo, RT = Resistência tênsil de agregados; CV = Coeficiente de variação (%).

Os valores de Ds aqui apresentados foram similares aos encontrados em Tavares et al. (2012), que estudaram a variabilidade espacial dos atributos físicos de um Argissolo, sob cultivo de cana-de-açúcar, na mesma área experimental da pesquisa em tela. Esses resultados comprovam os efeitos que os diferentes tempos de implantação da cana têm na redução da Ds.

Em relação aos valores absolutos da condutividade hidráulica saturada do solo (Ksat) nas três subáreas de estudo analisadas (2^a, 5^a e 7^a folha), nota-se que estes foram mais altos na superfície (0-15 cm), variando entre 106 e 344 mm h⁻¹; diminuindo com a profundidade (15-30 cm), com valores entre 97 e 187 mm h⁻¹ (Tabela 3). Estatisticamente, os valores da Ksat para a camada 0-15 cm apresentaram diferenças significativas, com os solos da subárea sob a 2^a folha (menor tempo de cultivo), apresentando os maiores resultados (344 mm h⁻¹); sendo que os valores para a camada 15-30 cm não apresentaram diferenças significativas entre as subáreas.

Diante desses resultados, pode-se inferir que o uso recorrente de maquinário pesado para realização dos tratamentos culturais, ao longo do tempo de cultivo da cana-de-açúcar (2^a, 5^a e 7^a folha), contribuiu para a redução da Ksat nas camadas superficiais do solo. Embora todas as subáreas do estudo apresentem valores absolutos da Ksat maiores na camada superior, há uma diferença maior na subárea em que houve o replantio da cana-de-açúcar mais recente (2^a folha), conseqüentemente um preparo de solo também mais recente, em relação às outras subáreas (5^a e 7^a folha). Este fato revela a redução do fluxo de água no solo em função do tempo de cultivo, fato que pode ser analisado também por outras pesquisas em solos canavieiros (VIANA et al., 2023). Solos que apresentam maiores valores para Ksat possuem maiores macroporosidades, já que esta classe de poros é responsável pela drenagem e aeração do solo (LIBARDI; LIER, 1999; NUNES et al., 2023).

A respeito da resistência tênsil de agregados (RT), seus valores apresentaram diferenças estatísticas entre as subáreas para as duas camadas (0-15 e 15-30 cm), com os maiores valores para os solos na área com 2ª folha, em ambas as camadas (Tabela 3). Esses valores de RT na subárea da 2ª folha, são próximos aos encontrados por Lima et al. (2005) e Almeida (2008), que ao estudarem um Argissolo encontraram valores médios de RT com 76,65 e 62,91 kPa, respectivamente. Por ser uma propriedade dinâmica, a RT está relacionada com a umidade e com as modificações que a porosidade e/ou a cimentação entre as unidades estruturais dos solos apresentam (KAY; DEXTER, 1992) e a densidade do solo (TORMENA et al., 2008). Dessa forma, a partir dos valores de RT encontrados neste trabalho, podemos afirmar que este atributo teve maior relação com os valores de Ds (Tabela 3).

Na Tabela 4, verificam-se os valores médios para os atributos físicos relacionados à distribuição de tamanho de poros. Estatisticamente observamos diferenças significativas entre todas as divisões da distribuição de poros, à exceção da macroporosidade (Macro), cujos valores não apresentaram diferenças estatísticas entre as subáreas para as duas camadas. Os valores absolutos da Macro variaram de 2,79 a 6,66%, apresentando o maior valor médio nos solos sob a 7ª folha (0-15 cm).

Tabela 4 – Distribuição de tamanho de poros dos solos estudados, cultivados com cana-de-açúcar, sob diferentes tempos de cultivo (2ª, 5ª e 7ª folha/anos)

| Folha | Prof | Macro | Meso | Micro e+b | Micro t | Cripto | Pt |
|-------|--------|---------------|--------|-----------|---------|--------|--------|
| | - cm - | ----- % ----- | | | | | |
| 2 | | 3,92a | 9,88b | 9,90b | 1,20a | 11,37a | 36,42c |
| 5 | 0-15 | 3,89a | 10,05b | 12,59a | 0,12c | 13,28a | 39,60b |
| 7 | | 6,66a | 15,43a | 12,20b | 0,51b | 7,31b | 42,01a |
| 2 | | 5,05a | 8,36b | 11,40b | 1,59a | 11,60b | 37,54b |
| 5 | 15-30 | 2,79a | 9,49b | 14,23a | 0,21c | 14,37a | 40,46a |
| 7 | | 4,27a | 13,61a | 10,22b | 0,51b | 9,45b | 38,03b |
| CV | | 59,33 | 20,91 | 13,05 | 10,10 | 16,93 | 8,68 |

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna em cada variável não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Prof. = profundidade da coleta; Macro = Macroporosidade; Meso = Mesoporosidade; Micro e+b = Microporosidade estrutural + biológica; Micro t = Microporosidade textural; Cripo = Criptoporosidade; Pt = Porosidade total; CV = Coeficiente de variação (%)

Sobre os dados da Tabela 4, observou-se que os valores da mesoporosidade (Meso) tendem a ser maiores nas subáreas com maiores tempos de implantação do canavial, tendo os maiores valores na subárea sob a 7ª folha, independentemente da profundidade avaliada (15,43 e 13,61%). Já na subárea da 2ª folha, foram observados os menores valores, que variaram de 9,88 a 8,36%, considerando as profundidades de 0-15 e de 15-30 cm, respectivamente. O menor percentual de Macro e Meso na subárea da 2ª folha podem estar relacionado ao menor tempo

de cultivo, pois é a subárea de implantação mais recente, além do efeito do manejo utilizado (aração e gradagem), que provavelmente promoveu uma redistribuição desses poros maiores, sendo convertidos em poros de menores diâmetros (microporos e criptoporos), onde o pouco tempo de implantação não foi favorável para o sistema ser suficientemente resiliente e aumentar a quantidade de poros maiores. É possível observar que, ao fazer a soma dos macros com mesoporos, todas as subáreas apresentam valores acima do limite de 10%, valor estabelecido por Tormena, Silva e Libardi (1998), que torna limitante à difusão de oxigênio no interior do solo.

Para a microporosidade estrutural + biológica (Micro e+b), estatisticamente a subárea sob a 5ª folha foi a que apresentou os maiores valores, com 12,59 e 14,23%, nas camadas de 0-15 e de 15-30 cm, respectivamente. Por outro lado, os solos das subáreas sob a 2ª e 7ª folhas apresentaram os menores valores, com a menor média de Micro e+b encontrada na 2ª folha (9,90% na camada de 0-15 cm).

No que se refere às classes de poros que têm mais relação com a textura do solo, isto é, microporosidade textural (Micro t) e criptoporosidade (Cripto), os solos da subárea sob a 2ª folha apresentaram os maiores valores de Micro t, em comparação às demais subáreas estudadas, nas duas camadas, variando entre 1,20% (0-15 cm) e 1,59% (15-30 cm). Esses altos valores para a Micro t na 2ª folha mostram que ocorreu conversão das classes de poros maiores (Macro, Meso, e até Micro e+b) em poros menores (Micro t e Cripto), que são poros dependentes da textura, devido ao preparo mais recente dos solos sob essa subárea.

Em relação à Cripto, os resultados apresentaram diferenças estatísticas entre as subáreas para as duas camadas, com maiores valores para a 2ª e 5ª folhas, e menores para a 7ª folha, na camada de 0-15 cm. Analisando na camada 15-30 cm, a subárea sob a 5ª folha apresentou, novamente, os maiores valores, chegando a 14,37%, enquanto as subáreas sob a 2ª e 7ª folhas, tiveram os mais baixos valores (11,60 e 9,45 %, respectivamente). Dentre as subáreas estudadas, a da 7ª folha foi a que apresentou os menores valores absolutos, variando de 7,31% (0-15 cm) a 9,45% (15-30 cm).

A porosidade total (Pt) variou de 36,42 a 42,01%, na camada de 0-15 cm, apresentando estatisticamente o maior valor na 7ª folha. Já na camada mais profunda a subárea de 5ª folha apresentou melhores valores, enquanto nas outras duas subáreas obtiveram os menores valores. Esses valores de Pt são semelhantes aos encontrados por Silva et al. (2015). Vale salientar que, apesar das subáreas mostrarem diferenças nos valores de Pt, esses apresentam-se acima do limite crítico para o desenvolvimento das culturas, que é de $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Os maiores valores na subárea sob a 7ª folha, na profundidade de 0-15 cm, estão relacionados a maior deposição de

resíduos vegetais ao longo do tempo, levando a uma maior atividade microbiana, e onde está concentrado o maior volume de raízes, favorecendo a abertura de canais de porosidade.

A Tabela 5 mostra os valores médios estatísticos da resistência do solo à penetração (RP) e as umidades volumétricas (θ) nas duas profundidades. É possível observar que não houve diferenças entre as subáreas, tanto na camada de 0-15 cm quanto na de 15-30 cm. Apesar de não encontrarmos diferenças estatísticas entre os dados analisados, pode-se observar uma tendência de queda dos valores absolutos da RP em função do aumento do tempo de implementação da cultura. De um modo geral, os valores de RP foram altos, sendo que apenas na camada de 0-15 cm, nas subáreas da 5ª e 7ª folhas, encontramos valores abaixo do limite crítico (LC), citado na literatura como 2,0 MPa (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; ARAÚJO et al. 2004), diferente dos resultados da camada 15-30 cm, todos maiores que o LC.

Tabela 5 – Valores médios da resistência do solo à penetração em Argissolo, sob cana-de-açúcar, determinados em laboratório, para os diferentes tempos de cultivo (2ª, 5ª e 7ªfolha/anos).

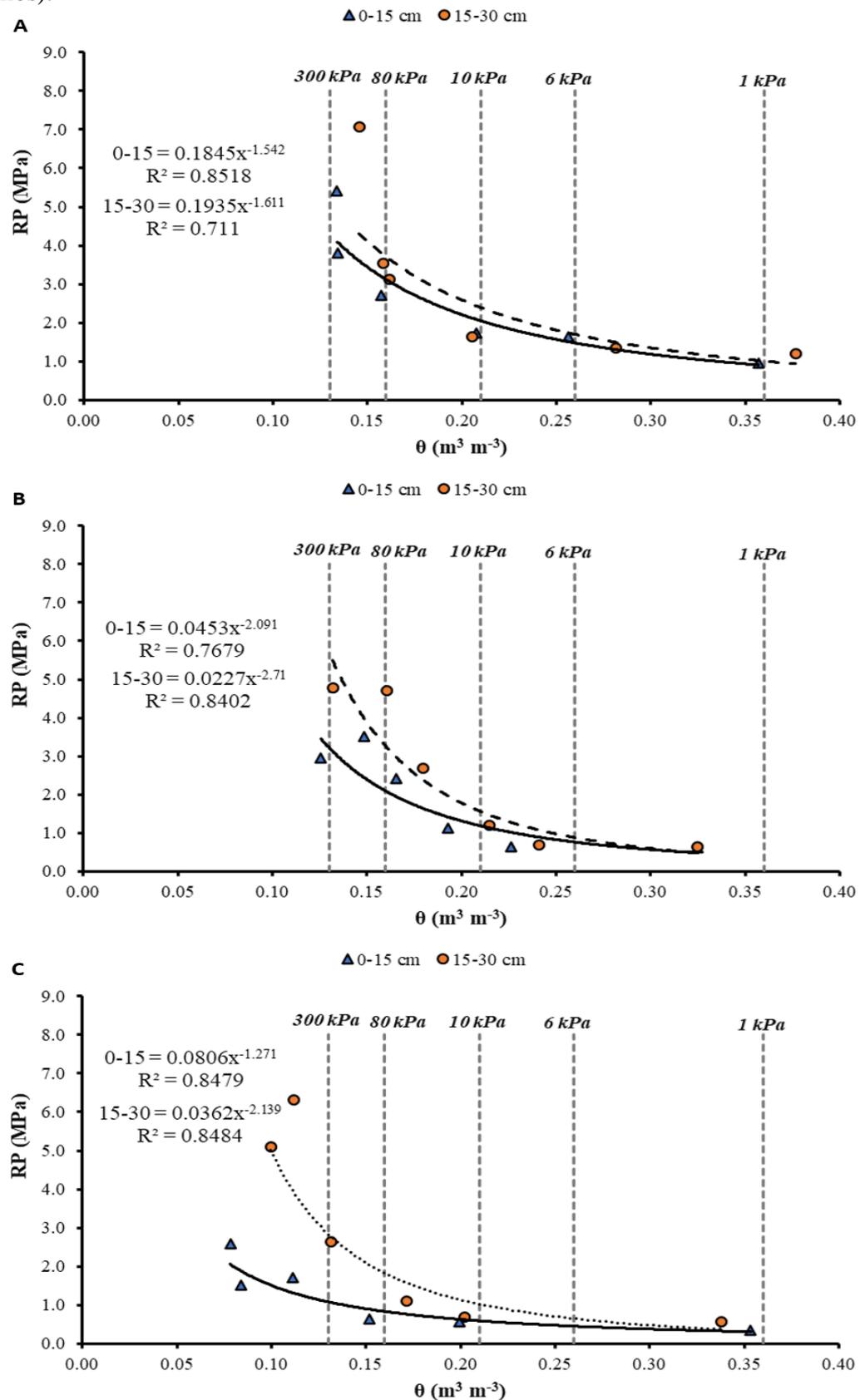
| Folha | Prof | θ | RP |
|-------|--------|--------------|-------|
| | - cm - | $m^3 m^{-3}$ | MPa |
| 2 | 0-15 | 0,17a | 2,68a |
| 5 | | 0,18a | 1,88a |
| 7 | | 0,18a | 1,23a |
| 2 | 15-30 | 0,23a | 2,98a |
| 5 | | 0,20a | 2,45a |
| 7 | | 0,18a | 2,73a |
| CV | | 72,73 | 78,30 |

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna em cada variável não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Prof. = profundidade de coleta; θ = umidade volumétrica; RP = resistência do solo à penetração de raízes; CV = Coeficiente de variação (%).

Na Figura 12 são apresentados os gráficos da RP em função da umidade, equilibradas nas tensões 1, 6, 10, 80 e 300 kPa, para cada subárea de estudo, elaborados durante o processo de obtenção dos dados da curva característica de retenção de água no solo. Observa-se que, a partir do momento em que a umidade das amostras diminui, os valores de RP passam a aumentar, mostrando o quanto a umidade tem influência durante a medição desse atributo.

Além do aumento da RP em função da redução da umidade do solo, nota-se também que os valores de RP foram superiores na camada de 15-30 cm, em comparação aos da camada de 0-15 cm, para todas as subáreas estudadas, o que pode estar associado o aumento dos teores de argila em profundidade (Tabela 2).

Figura 12 – Resistência do solo à penetração de raízes determinada em laboratório, sob cana-de-açúcar com diferentes tempos de cultivo (A – 2ª folha/anos, B – 5ª folha/anos, C – 7ª folha/anos).



Fonte: arquivo pessoal

Nos solos sob a 2ª folha (Figura 12A), os valores para as duas profundidades ficaram mais aproximados entre si e, conseqüentemente, as curvas de RP estão mais juntas, sendo a curva da camada 15-30 cm, superior à da camada de 0-15 cm. É possível também observar que os valores da 2ª folha foram superiores aos das subáreas sob a 5ª e 7ª folhas (Figuras 12B e 12C, respectivamente), podendo estar relacionados aos maiores valores de Ds (Tabela 3), apresentados na subárea da 2ª folha.

Os atributos utilizados para avaliar a qualidade estrutural dos solos foram aqueles relacionados à estabilidade dos agregados, onde os valores do diâmetro médio ponderado úmido (DMP_U), diâmetro médio ponderado de seco (DMP_S), diâmetro geométrico úmido (DMG_U), diâmetro geométrico seco (DMG_S), e o índice geral de estabilidade de agregados do solo (IGEA), encontram-se apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados de Argissolo, sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes tempos de cultivo (2ª, 3ª e 7ª folha/anos)

| Folha | Prof | DMP_U | DMP_S | DMG_U | DMG_S | IGEA |
|-------|--------|----------------|---------|---------|---------|--------|
| | - cm - | ----- mm ----- | | | | % |
| 2 | | 2,55a | 3,56a | 1,99a | 3,43a | 71,82a |
| 5 | 0-15 | 2,00b | 2,88b | 1,30b | 2,22b | 72,08a |
| 7 | | 2,14b | 2,72c | 1,45b | 1,93c | 78,30a |
| 2 | | 2,46a | 3,43a | 1,90a | 3,45a | 68,93a |
| 5 | 15-30 | 1,94b | 2,80b | 1,27b | 2,08b | 68,78a |
| 7 | | 1,87b | 2,69b | 1,22b | 1,93b | 69,27a |
| CV | | 20,82 | 9,08 | 28,30 | 14,29 | 24,71 |

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna em cada variável não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Prof. = profundidade amostrada; DMP_U = diâmetro ponderado úmido; DMP_S = diâmetro ponderado seco; DMG_U = diâmetro geométrico úmido; DMG_S = diâmetro geométrico seco; IGEA = índice geral de estabilidade de agregados; CV = Coeficiente de variação (%).

É possível observar que apenas o IGEA não apresentou diferenças estatísticas entre as subáreas nas duas profundidades analisadas. Por outro lado, em geral, nas duas profundidades, as médias para os índices DMP_U e DMP_S ficaram acima de 2 mm (valores considerados altos), exceto para os solos das subáreas sob a 5ª e 7ª folhas, na camada de 15-30 cm, onde os valores de DMP_U ficaram abaixo desse limite. Assim, os maiores valores de DMP_U e DMP_S , nas duas profundidades, foram encontrados na subárea sob a 2ª folha. Observa-se também que, na camada de 15-30 cm de profundidade, ocorre a redução do DMP_U para as três áreas.

Esses resultados sugerem que, como as subáreas foram avaliadas sob o efeito dos tempos de implantação do canal, ao longo do cultivo deve ter ocorrido a perda da qualidade estrutural do solo. A estabilidade de agregados em via úmida pode depender dos compostos

orgânicos, como os polissacarídeos, componentes aromáticos resistentes, cátions metálicos polivalentes, polímeros fortemente sorvidos, sistema radicular e hifas fúngicas (TISDALL; OADES, 1982). Nesse sentido, é possível observar que na camada de 0-15 cm de profundidade há aumento nos teores de carbono orgânico (Tabela 1), e que geralmente esse atributo segue o aumento da estabilidade de agregados do solo nas camadas superficiais, influenciado pela ação do carbono particulado, que se associa às partículas de silte e argila (DEVINE et al., 2014), corroborando, dessa forma, os resultados encontrados no presente estudo.

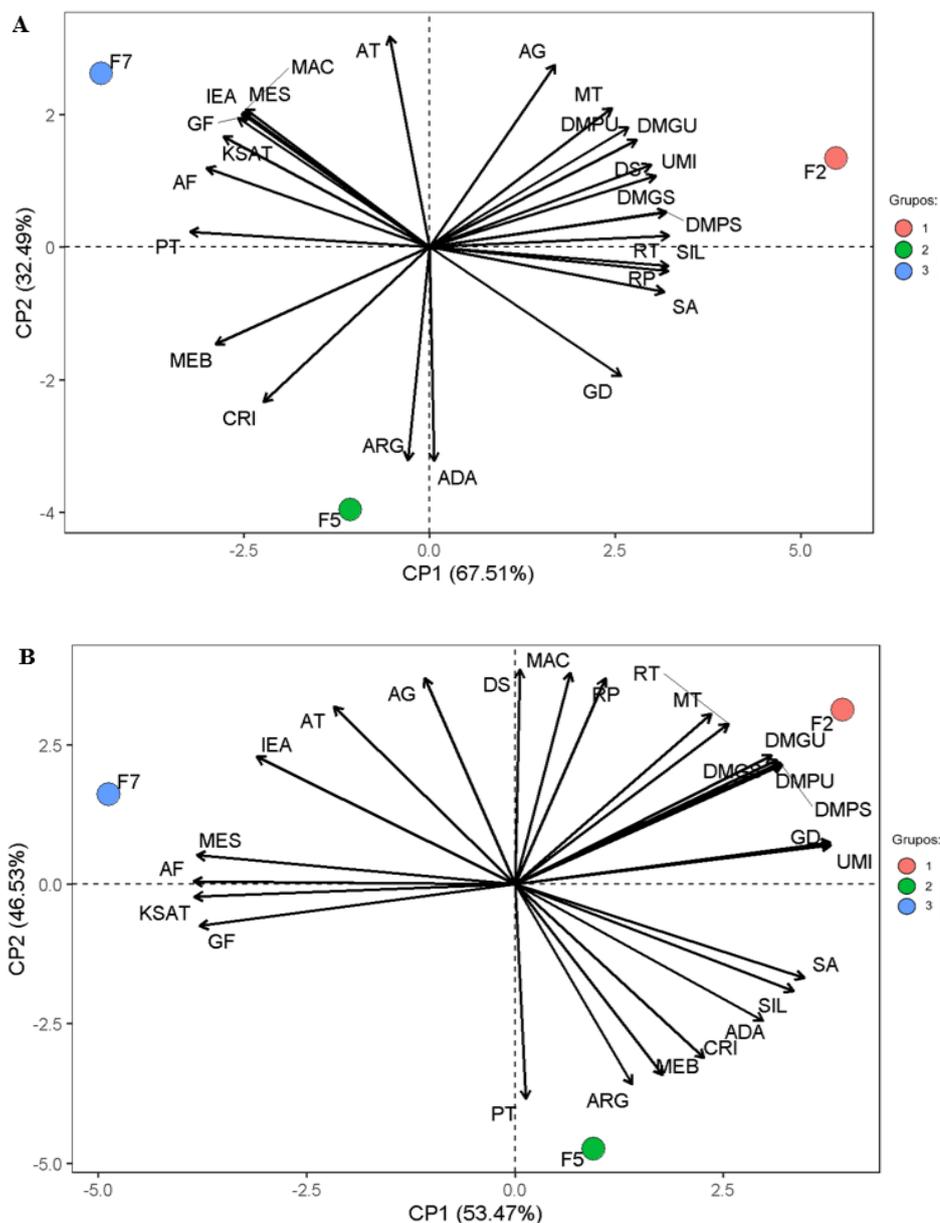
Quanto aos resultados do índice DMG, estes variaram entre 1,22 e 1,99 mm, para via úmida (DMG_U), e de 1,93 e 3,45 mm para via seca (DMG_S), com os solos da subárea sob a 2ª folha apresentando os maiores valores (Tabela 6), seguindo a mesma tendência observada para o DMP. Esses altos valores de DMG_U e DMG_S indicam que os solos estudados têm tamanhos de agregados entre as maiores classes de diâmetros equivalentes ($\varnothing_{eq.}$), isto é, classes 1 e 2, com $\varnothing_{eq.}$ variando de 5,32 – 2,00 mm a < 2,00 – 1,00 mm, respectivamente.

O DMG é considerado como o melhor índice para representação da agregação do solo, por expressar bem a condição estrutural, por meio da distribuição dos agregados em um valor único (DEMARCHI; PERUSI; PIROLI, 2012). Assim, independentemente da via para ruptura dos agregados (úmida ou seca), a maior parte dos agregados permaneceram retidos nas peneiras superiores, confirmando os elevados valores de IGEA e DMP, encontrados para todas as subáreas estudadas. Para o IGEA, observamos que entre todas as subáreas os valores médios absolutos foram maiores que 68%, com o maior valor observado na subárea sob a 7ª folha (78,30%, na camada de 0-15 cm). Ainda nessa mesma subárea, houve uma maior redução nos valores absolutos de IGEA, com o aumento da profundidade, em comparação com as demais subáreas. Quando analisamos as médias entre camadas, verificou-se que o IGEA nas três subáreas estudadas apresentou maiores valores na camada de 0-15 cm, quando comparado à camada de 15-30 cm. Podemos, provavelmente, associar esses resultados ao maior aporte de matéria orgânica nas camadas superficiais, onde se concentra a maior parte da massa de raízes das plantas. A associação da ação mecânica das raízes fasciculadas, junto à renovação do sistema radicular, contribuiu positivamente para a melhoria da estrutura dos solos (SILVA; MIELNICZUK, 1997; SILVA et al., 2022), elucidando dessa forma o motivo pelo qual os maiores valores de IGEA estavam na camada de 0-15 cm, apesar de termos subárea com pouco tempo de implantação do canavial, como no caso dos solos sob a 2ª folha.

Outra abordagem dos resultados pode ser observada na Figura 13 A e B, onde é apresentada a análise de componentes principais (ACP) para atributos físicos dos solos das três subáreas analisadas. Observa-se que na camada de 0-15 cm de profundidade (Figura 13A)

65,71% e 32,49% da variância foram explicadas pelos componentes principais (CP1) e (CP2), respectivamente. Para a camada de 15-30 cm de profundidade (Figura 13B) 53,47% e 46,53% da variância foram explicadas pelos CP1 e CP2, respectivamente. Nas duas camadas de solo avaliadas, os CP1 e CP2 conseguiram explicar 100% da variância acumulada, indicando que as variáveis analisadas foram sensíveis aos tempos de cultivo. nas camadas de 0-15 cm (A) e 15-30 cm (B)

Figura 13 – Análise de componentes principais para os atributos físicos dos solos das subáreas sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo nas camadas de 0-15 cm (A) e 15-30 cm (B). (● 1 = 2ª folha/anos, ● 2 = 5ª folha/anos, ● 3 = 7ª folha/anos).



Fonte: arquivo pessoal

Conforme Fleck e Bourdel (1998), quanto maior o autovalor da ACP, maior é sua capacidade de resumir as variáveis e, portanto, mais provável é o fator de ser importante. Nesse sentido, verifica-se na camada de 0-15 cm de profundidade que as variáveis que apresentaram os maiores autovalores no CP1 foram AF (-0,929), SIL (0,996), GF (-0,797), GD (0,798), AS (0,978) e DS (0,923); no CP2 foram AT (0,986), AG (0,852), ARG (-0,996) e ADA (-1,000) (Apêndice A), por outro lado, na camada de 15-30 cm de profundidade (Apêndice B), as variáveis que apresentaram os maiores autovalores no CP1 foram AF (-1,00), SIL (0,867), ADA (0,773), GF (-0,981), GD (0,981) e AS (0,900); no CP2 foram AT (0,826), AG (0,960), ARG (-0,931) e DS (1,000).

Conforme apresentado na Figura 13 (A, B), a ACP formou dos fatores principais, nas duas camadas de solo analisadas, e levando-se em consideração a abordagem apresentada por Neisse e Hongyu (2016), nas camadas de 0-15 e 15-30 cm de profundidade, a variância dos dados poderia ser explicada pelas seguintes equações:

$$CP1_{0-15} = -0,929AF + 0,996SIL - 0,797GF + 0,798GD + 0,978SA + 0,923DS;$$

$$CP1_{15-30} = -1,00AF + 0,867SIL + 0,773ADA - 0,981GF + 0,981GD + 0,900SA$$

Em ambas as situações, os componentes CP1₀₋₁₅ e CP1₁₅₋₃₀ podem ser denominados componentes F2 (Folha 2), uma vez que com maiores autovalores estão ordenadas no tratamento F2. Porém, algumas variáveis do CP1₁₅₋₃₀ como ARG e ADA apresentaram autovalores contrastantes em relação as variáveis destacadas no CP1₀₋₁₅, pois os valores de correlação foram negativos. Na camada de 15-30 cm de profundidade, as variáveis AF, GF e GD se destacaram indicando relação com a estabilidade estrutural do solo devido os autovalores apresentados. Por outro lado, na camada de 15-30 cm de profundidade, houve destaque para as variáveis DS e ARG, indicando uma relação associativa com a qualidade estrutural do solo (Figura 13B).

Analisando as variáveis da ACP pode-se dizer que o solo das diferentes áreas analisadas (F2, F7 e F5) são mais sensíveis as alterações texturais do solo em superfície (0-15 cm) em relação à subsuperfície (15-30 cm) de profundidade, com maior suscetibilidade à erosão, já que o GF em 0-15 cm foi relativamente inferior ao GF observado na camada de 15-30 cm de profundidade (Tabela 2). Por outro lado, observa-se um incremento de DS na camada de 15-30 cm de profundidade, indicando alteração na qualidade estrutural do solo, contudo vários fatores podem explicar essa alteração, dentre eles a sobreposição de peso da camada superficial, composição mineralógica ou compactação induzida por práticas de manejo.

Ao analisar os autovalores dos tratamentos, de forma individual, verifica-se que o tratamento F2 foi o mais representativo entre os tratamentos analisados na camada de 0-15 cm

de profundidade, pois concentrou a maior parte da variância acumulada, com 5,477 no CP1 e 1,3433 no CP2, o tratamento com menor participação na variância acumulada foi o F5 já que os valores foram negativos nos dois componentes principais, com -1,0619 no CP1 e -3,9625 no CP2. Na camada de 15-30 cm de profundidade, os dois componentes principais foram denominados de F2 (Folha dois), já que esse tratamento foi o responsável pelo acúmulo da variância com autovalores de 3,933 no CP1 e 3,1309 no CP2.

Esse resultado, indica, portanto, que o sistema de manejo implantado no tratamento F2 é responsável por modificar indicadores relacionados a qualidade estrutural do solo, provavelmente ocasionado pela menor capacidade de resiliência do solo. O solo da área F2 apresenta teor de areia total >70% e, como constatado por Bonetti et al. (2017) os solos arenosos e os com baixo teor de matéria orgânica apresentam menor capacidade de resiliência, explicando dessa forma, o resultado na ACP para a F2. Os demais tratamentos F5 e F7 não contribuíram expressivamente com os autovalores da ACP, talvez em função da maior consolidação do solo, devido ao acúmulo de matéria orgânica do longo do tempo.

É interessante observar, que as variáveis com maior participação na variabilidade total dos dados da ACP estão relacionadas com a textura do solo, nos dois componentes analisados (CP1 e CP2). Por outro lado, observa-se que a ACP conseguiu agrupar as variáveis que conseguem melhor explicar o funcionamento físico do solo das diferentes subáreas, dentro de um grupo maior de variáveis originais, corroborando os achados em Jolliffe e Cadima (2015).

De fato, os solos sob o maior tempo de cultivo (7ª folha) foram os que apresentaram melhor qualidade estrutural, ou seja, o sistema de manejo praticado nessa subárea, ou mesmo a melhoria da qualidade estrutural dos solos, pode estar sendo influenciada pelo sistema radicular da cultura, ou pela retenção da palhada em superfície (CARVALHO et al., 2022). Por outro lado, a pior qualidade física dos solos sob a 2ª folha pode ser resultado do uso do maquinário na implantação do canavial, já que um dos principais problemas de degradação física do solo em áreas de cana-de-açúcar é a compactação do solo (FARHATE et al., 2022), dados esses comprovados por meio da ACP (Figura 13), como também com os coeficientes das correlações de Pearson para os atributos físicos dos solos sob as três subáreas estudadas, apresentados na Tabela 7.

Como é observado na Tabela 7, algumas frações granulométricas apresentam correlação significativa e negativas, com relação aos valores de areia e argila, isso acontece pelo fato de terem relação inversa, mesmo caso, acontece para a ADA e o GF.

Tabela 7 – Correlação de Person para os atributos físicos dos solos sob diferentes tempos de cultivo (2ª, 5ª e 7ª folha/anos).

| Variável | AT | AG | AF | Silte | Argila | ADA | GF | Ds | RT | DMP _U | DMP _S | DMG _U | DMG _S | IGEA | Ksat | PT | Macro | Meso | Microe+b | Microt | Cripto | RP | |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|--|
| AT | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AG | 0.468** | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AF | 0.161** | 0.697 | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Silte | -0.399** | -0.331** | -0.179* | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Argila | -0.936** | -0.383** | -0.106 | 0.051** | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ADA | -0.951** | -0.371 | -0.157** | 0.230** | 0.948** | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GF | 0.591 | 0.195 | 0.247** | -0.486** | -0.457** | -0.712** | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ds | 0.155** | -0.169* | -0.310 | 0.299 | -0.284** | -0.282** | 0.152 | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | | |
| RT | 0.062 | -0.343 | -0.592** | 0.241 | -0.160 | -0.112 | -0.111 | 0.563** | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | |
| DMP _U | 0.657** | 0.396** | 0.164** | -0.057 | -0.694** | -0.602 | 0.150 | -0.048* | 0.109** | 1.000 | | | | | | | | | | | | | |
| DMP _S | 0.235 | 0.065** | -0.348** | 0.233 | -0.346 | -0.233 | -0.192** | 0.334** | 0.664** | 0.460** | 1.000 | | | | | | | | | | | | |
| DMG _U | 0.593** | 0.373** | 0.149** | -0.001 | -0.645** | -0.554 | 0.114 | -0.010** | 0.174** | 0.984** | 0.539** | 1.000 | | | | | | | | | | | |
| DMG _S | 0.279 | 0.052** | -0.355** | 0.241 | -0.397 | -0.296 | -0.117** | 0.393** | 0.722** | 0.479** | 0.985** | 0.558** | 1.000 | | | | | | | | | | |
| IGEA | 0.646** | 0.394** | 0.385 | -0.207 | -0.624 | -0.590* | 0.319 | -0.239 | -0.271 | 0.848** | -0.068* | 0.778** | -0.034 | 1.000 | | | | | | | | | |
| Ksat | 0.405* | 0.229 | 0.310** | -0.348 | -0.307 | -0.322* | 0.253** | -0.552** | -0.496** | 0.280 | -0.445** | 0.175 | -0.453* | 0.589** | 1.000 | | | | | | | | |
| PT | 0.138 | 0.163 | 0.288** | -0.280 | -0.043 | -0.028 | 0.008 | -0.818** | -0.487** | 0.252 | -0.157** | 0.200 | -0.215** | 0.381** | 0.578** | 1.000 | | | | | | | |
| Macro | 0.386* | 0.211 | 0.264 | -0.144 | -0.365* | -0.377* | 0.251 | 0.215 | -0.010 | 0.065 | 0.094 | 0.023 | 0.086 | 0.064 | 0.111 | -0.112 | 1.000 | | | | | | |
| Meso | 0.399* | 0.176 | 0.290 | -0.351 | -0.300 | -0.378* | 0.419** | -0.336 | -0.554** | 0.100 | -0.405** | 0.032 | -0.435** | 0.392** | 0.636** | 0.494** | 0.114 | 1.000 | | | | | |
| Microe+b | -0.580** | -0.307 | 0.080 | 0.303 | 0.515** | 0.526** | -0.319 | -0.366* | -0.234 | -0.447** | -0.339 | -0.433* | -0.376* | -0.305 | -0.028 | 0.128 | 0.071 | -0.005 | 1.000 | | | | |
| Microt | 0.482** | 0.027 | -0.294 | 0.302 | -0.641** | -0.574** | 0.173 | 0.523* | 0.652** | 0.545** | 0.759** | 0.594** | 0.835** | 0.189 | -0.267 | -0.295 | 0.134 | -0.290 | -0.425** | 1.000 | | | |
| Cripto | -0.644** | -0.371** | -0.120 | -0.045 | 0.719** | 0.663** | -0.243 | -0.228 | -0.224 | -0.444* | -0.393* | -0.437* | -0.413* | -0.297 | -0.073 | -0.066 | -0.156 | -0.119 | 0.496** | -0.437** | 1.000 | | |
| RP | 0.006 | 0.054 | -0.015 | 0.076 | -0.036 | -0.056 | 0.065 | 0.272* | 0.090 | -0.211 | 0.246 | -0.160 | 0.216 | -0.366 | -0.229 | -0.119 | 0.409* | 0.084 | 0.160 | 0.117 | -0.051 | 1.000 | |

Sendo: * = Correlação significativa a 1%; ** = Correlação significativa a 5%; AT = Areia total; AG = Areia grossa; AF = Areia fina; ADA = Argila dispersa em água; GF = Grau de floculação; Ds = Densidade do solo; RT = Resistência tênsil de agregados, DMP_U = Diâmetro médio ponderado úmido, DMP_S = Diâmetro médio ponderado seco; DMG_U = Diâmetro médio geométrico úmido; DMG_S = Diâmetro médio geométrico seco; IGEA = Índice geral de estabilidade de agregados; Ksat = Condutividade hidráulica saturada; PT = porosidade total; Macro = macroporosidade; Meso = mesoporosidade; Micro e+b = microporosidade estrutural e biológica; Micro t = microporosidade textural; Cripto = criptoporosidade; RP = resistência à penetração de raízes.

A D_s tem correlação significativa, negativas e forte ($|0,8| < r \leq |0,9|$) com a PT (-0,818**), mostrando que os valores desses atributos são inversamente proporcionais (SILVA; CABEDA; LIMA, 2005). Dentre as correlações significativas e positivas, podemos observar que a de Argila e Cripto ($r = 0,719^{**}$), apresentaram moderada correlação ($|0,3| < r \leq |0,8|$) onde, segundo Lu *et al.* (2015), a quantidade de argila tem relação com os poros muito pequenos.

Assim, avaliando o quanto as variáveis estudadas estão relacionadas entre si, ao nível de significância de 1% (*) e 5% (**), observa-se valores de correlação positivos e significativos entre outros pares de variáveis, como: D_s e RT ($r = 0,563^{**}$); DMP_U e AT ($r = 0,657^{**}$); DMG_S e DMP_S ($r = 0,985^{**}$); IGEA e DMP_U ($r = 0,848^{**}$); Micro t e DMG_S ($r = 0,835^{**}$); Ksat e IGEA ($r = 0,589^*$). Destes, os valores que chamam atenção são as correlações entre o IGEA *versus* DMP_U e Micro t *versus* DMG_S , classificadas como forte ($|0,8| < r \leq |0,9|$). No caso da correlação entre IGEA e DMP_U o valor indica que o maior percentual de agregados úmidos tende a influenciar positivamente o IGEA, e dessa forma, melhoria da qualidade estrutural. Já a forte correlação entre Micro t e DMG_S , sugere que, em solos pouco estruturados, há predomínio de microporos texturais.

Além disso, a correlação entre Ksat e IGEA, apesar de moderada ($|0,3| < r \leq |0,8|$), mostra que a Ksat é positivamente influenciada pelo IGEA, ou seja, quanto maior o IGEA maiores são os fluxos de entrada de água no solo através do sistema poroso; processo aliado à D_s , que tende a reduzir a Ksat. Isso pode ser justificado pelo impacto do aumento da D_s na degradação da estrutura do solo, com redução da sua geometria porosa, principalmente volume e continuidade de poros de maior tamanho, como os macroporos (KRAEMER *et al.*, 2022).

De fato, a Ksat é uma propriedade importante na avaliação da qualidade estrutural do solo, pois, expressa a facilidade com que a água nele se movimenta, e é mais dependente da estrutura do que da textura do solo, aumentando proporcionalmente com a elevação da agregação do solo (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

Por outro lado, alguns atributos apresentaram correlação muito forte ($|0,9| < r \leq |1,0|$), negativa e significativa, como no caso da Argila e Areia total (AT), com $r = -0,936^{**}$, e da Argila Dispersa em Água (ADA) e AT ($r = -0,951^{**}$). Esse resultado para os teores de AT e ADA, indica que a presença de teores elevados de AT tendem a elevar a dispersão de argila através da ação das chuvas. O aumento da ADA com elevação no teor de argila, como verificado na Tabela 7 está de acordo com os resultados apresentados por Corá *et al.* (2013), que estudaram cinco classes de solo, com diferentes teores e tamanho das partículas de areia, e sua relação com a dispersão da fração argila. Nesse contexto, também foi observado que, para solos

arenosos como os aqui estudados, o aumento no teor da subfração areia fina (AF) diminuiu os valores da resistência tênsil de agregados (RT), comprovados pelo valor do coeficiente entre esses atributos ($r = -0,592^{**}$), apesar de sua classificação ser moderada.

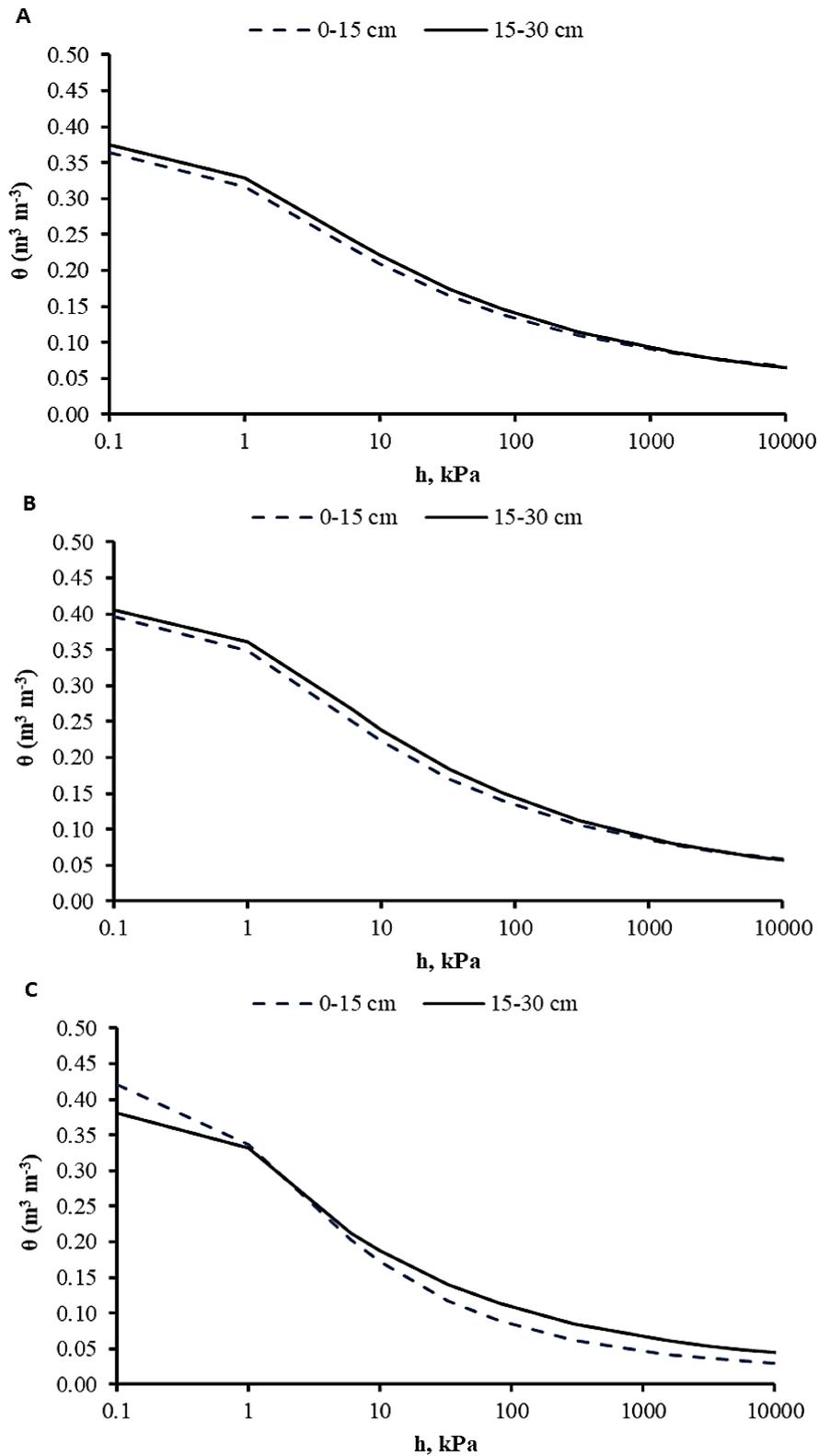
No que se refere à distribuição dos poros e sua relação com os respectivos conteúdo de água, avaliando os solos das subáreas por meio das curvas características de retenção de água nos solos, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten (1980), estas tiveram comportamentos quase que semelhantes para os diferentes tempos de implantação do canavial, onde apenas nos solos sob a 7ª folha foi possível notar maior diferença entre as curvas (Figura 14).

Na subárea sob a 2ª folha (Figura 14A), os solos da camada de 15-30 cm apresentaram pontos da curva superiores aos da camada de 0-15 cm, para os potenciais mais baixos; enquanto que para os mais altos, a partir de 1000 kPa, ocorreu uma sobreposição das curvas. Inicialmente as curvas para as duas profundidades apresentaram valores de umidade volumétrica (θ) na saturação (θ_{sat}) próximos a $0,37 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ($\theta_{sat} = PT$), nas duas profundidades; mas a partir do primeiro ponto da curva (1 kPa), ocorre uma redução acentuada da θ e, conseqüentemente, esvaziamento dos macroporos. Os macroporos são poros que têm relação com a presença de areia, principalmente se for da classe areia grossa (AG). De fato, a camada de 0-15 cm apresentou o maior valor de areia total, com 784 g kg^{-1} , dos quais, a maioria é da classe AG, com 545 g kg^{-1} (Tabela 2).

Este fato, aliado ao seu menor conteúdo de argila total (155 g kg^{-1}), confere a essa camada os menores valores de θ . Corroborando a afirmação de Amaro Filho, Assis Júnior e Mota (2008), que estudando a relação entre textura do solo e a capacidade de retenção de água, concluíram que os solos com maior presença de areia na sua distribuição de partículas tendem a apresentar conteúdo de água reduzido.

Observa-se que houve maior retenção de água no solo na camada de 15-30 cm de profundidade, a partir da capacidade de campo (10 kPa) em todos os tempos de cultivo, indicando haver um reservatório de água para as raízes das culturas em profundidade. O aumento do armazenamento de água em profundidade pode estar relacionado ao maior volume e microporos em relação à camada superficial de 0-15 cm de profundidade. Nos solos sob a 5ª folha (Figura 14B), é possível notar que as curvas para as duas camadas (0-15 cm e 15-30 cm) tiveram comportamento semelhante aos da 2ª folha (Figura 14A), porém com valores de PT mais altos ($\theta_{sat} \cong 0,40 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), com os dados dos solos a 15-30 cm de profundidade ligeiramente superiores aos da superfície (0-15 cm).

Figura 14 – Curva característica de retenção de água dos solos, ajustada pelo modelo de Van Genuchten (1980), sob cana-de-açúcar com diferentes tempos de cultivo (A – 2ª folha/anos, B – 5ª folha/anos, C – 7ª folha/anos).



Fonte: arquivo pessoal

Nota-se que, tanto para os solos sob a 2ª e 5ª folhas, existe, a partir de 1000 kPa, uma sobreposição entre os seguimentos das CCRAS para as duas camadas se sobrepõem, mostrando graus de estruturação próximos, por apresentarem quantidades iguais de poros menores, como os microporos texturais e criptoporos.

Na Figura 14C, as curvas para os solos sob a 7ª folha apresentaram diferenças de comportamento, onde os da camada 0-15 cm, inicialmente tiveram conteúdo de água superior ($\theta \cong 0,42 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) em relação aos da camada 15-30 cm ($\theta \cong 0,38 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$). Porém, a partir da drenagem dos macroporos (potencias $> 1 \text{ kPa}$), há uma inversão nos sentidos das curvas, ficando a dos solos mais profundos (15-30 cm) ligeiramente superior aos da camada 0-15 cm.

Esse comportamento sugere que para na subárea sob a 7ª folha, os solos da camada mais superficial (0-15 cm) apresentaram maior concentração de poros grande (macroporos), enquanto que na camada mais profunda (15-30 cm) encontramos maior quantidade de poros pequenos (microporos e criptoporos), que são poros com maior retenção de umidade sob maiores potenciais, e que têm menor disponibilidade de água para as plantas. Isso levará à necessidade das raízes das plantas apresentarem maiores potenciais do que o solo para absorver água nessa condição, levando à estresse hídrico para a maioria das culturas.

Assim, de modo geral, as curvas ajustadas pelo modelo de Van Genuchten (1980), mostram comportamentos típicos de solos arenosos, com baixa capacidade de retenção de água. Nesse modelo, há parâmetros que podem explicar melhor o comportamento das CCRAS, como os vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros das curvas de retenção de água dos solos, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten, sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (2ª, 5ª e 7ª folha/anos)

| Folha | Prof | Parâmetros | | | | | |
|-------|--------|-------------------|---------------------------|------------|--------|--------|-------|
| | | α | θ_r | θ_s | m | n | R^2 |
| | - cm - | hPa^{-1} | m^3m^{-3} | | | adm | |
| 2 | 0-15 | 0,1256 | 0,037 | 0,369 | 0,2045 | 1,2571 | 0,98 |
| | 15-30 | 0,1153 | 0,027 | 0,379 | 0,1930 | 1,2391 | 0,98 |
| 5 | 0-15 | 0,0990 | 0,031 | 0,400 | 0,2187 | 1,2798 | 0,97 |
| | 15-30 | 0,0924 | 0,017 | 0,409 | 0,2002 | 1,2503 | 0,95 |
| 7 | 0-15 | 0,1328 | 0,019 | 0,427 | 0,2739 | 1,3772 | 0,99 |
| | 15-30 | 0,1714 | 0,018 | 0,381 | 0,0462 | 5,9527 | 0,98 |

adm = adimensional

Os dados experimentais para os coeficientes de ajuste (R^2) apresentaram variação entre 0,95 e 0,99, ou seja, bons ajustes do modelo, sendo que na subárea sob a 5ª folha os solos apresentaram menores ajustes, sendo os maiores para os solos da subárea sob a 7ª folha.

O parâmetro α apresenta relação inversa com o valor da entrada de ar na curva (ponto de inflexão a partir da drenagem da água nos poros, nesse caso, macroporos). Esse parâmetro não altera a forma da curva, mas sim a posição da curva em direção de menores ou maiores valores de sucção. Já parâmetro n , está relacionado com a declividade da curva de retenção ajustada (MARTINEZ et al., 1995). Nesse estudo, os valores do parâmetro n mostram pouca variação para as curvas dos solos da 2ª e 5ª folhas em relação aos solos sob a 7ª folha, onde foi encontrado o maior valor na camada 15-30 m (5,9527).

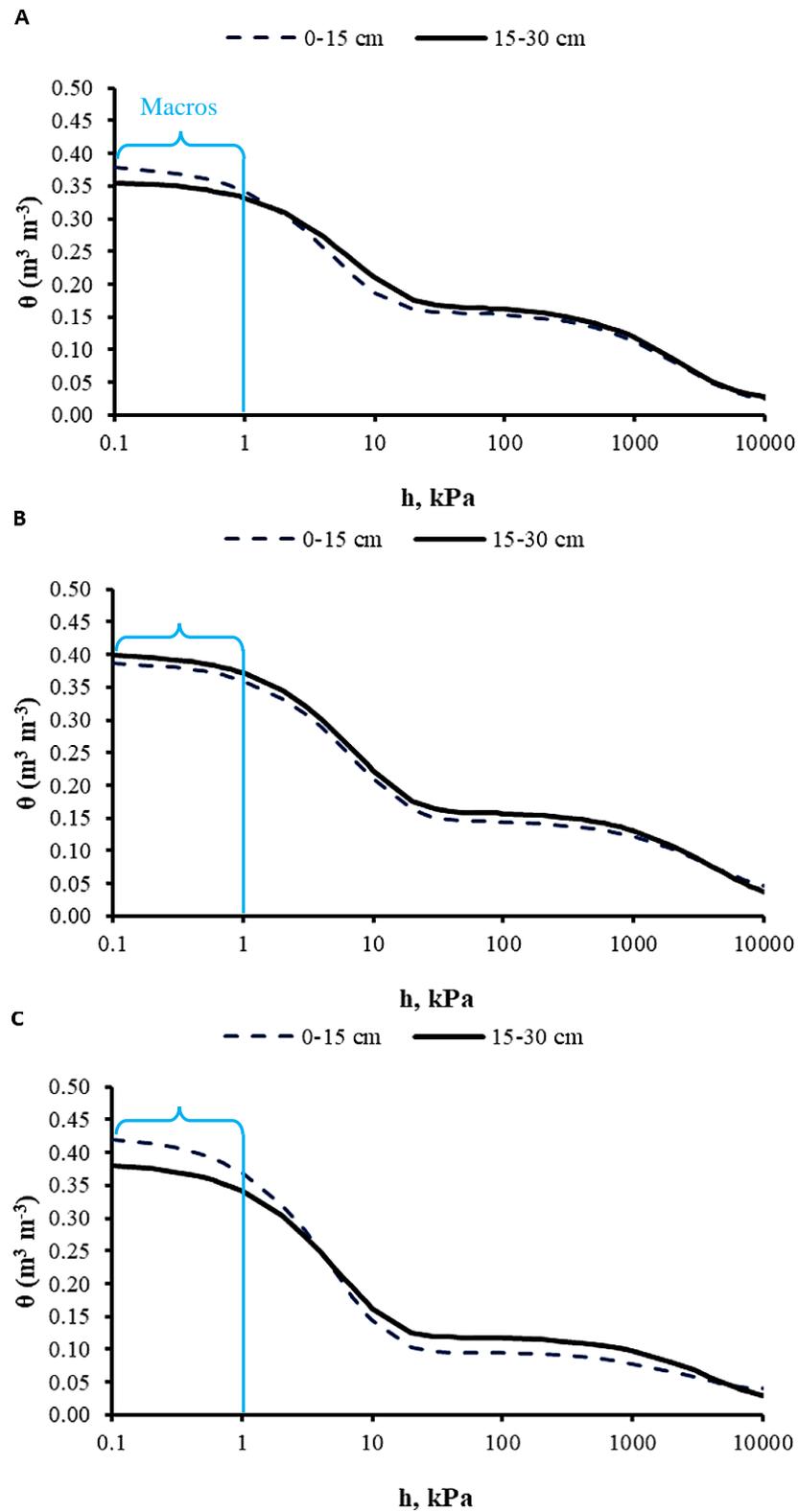
O parâmetro m está relacionado com a inflexão da parte inferior da curva e o valor mínimo da mesma (VAN GENUCHTEN, 1980). Nesse caso, o uso do modelo de Van Genuchten (1980) é mais comum de ser aplicado, devido a proposta da presença de uma continuidade na declividade da função de retenção (VAN GENUCHTEN; NIELSEN, 1985).

A maior disponibilidade de água para os solos da subárea sob a 7ª folha, ocorre na camada de 15-30 cm de profundidade, e pode ser comprovada pelos seus menores valores de umidade residual (θ_r), em relação aos solos da camada superficial (0-15 cm). Esse mesmo comportamento é observado para os solos das subáreas sob as 2ª e 5ª folhas (Tabela 8), embora as suas respectivas curvas não ilustrem bem os resultados, já que elas estão, praticamente, sobrepostas (Figuras 14 A e B, nessa ordem)

Como os solos das subáreas apresentam acentuada concentração de areia, o maior armazenamento e disponibilidade de água em subsuperfície pode estar relacionada a maior proporção de argila em relação ao observado em superfície. A argila, diferente da areia, tem cargas em sua superfície responsáveis por adsorver as moléculas de água no solo, contribuindo para a capacidade de armazenamento (KLEIN et al., 2010). É importante salientar que o modelo de Van Genuchten (1980), conseguiu bons ajustes, como destacado pelos valores de R^2 , apresentados na Tabela 8.

As CCRAS também foram ajustadas pelo modelo proposto em Dexter et al. (2008), cujos comportamentos podem ser observados na Figura 15. Nota-se que as curvas possuem formato bimodal, possivelmente devido à existência de dois valores de entrada de ar, ocorridos, primeiramente, em poros com maior diâmetro, e depois nos de menor.

Figura 15 - Curva característica de retenção de água dos solos, ajustada pelo modelo de Dexter et al. (2008), sob de cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (A – 2ª folha/anos, B – 5ª folha/anos, C – 7ª folha/anos).



Fonte: arquivo pessoal

Dessa forma, observa-se pequena variação da umidade (θ) sob os potenciais equilibrados entre 0,1 e 1 kPa (macroporos, indicados pela chave em azul, Figura 15), passando a ser maior no segmento da curva entre 1 e 10 kPa, definindo o primeiro valor de entrada de ar, confirmado pela grande variação da θ ao longo desse segmento. Analisando a segunda parte da curva, após 10 kPa, há um seguimento (entre 10 e um pouco antes de 1000 kPa) onde se observa pequenas variações de umidade, notando-se a partir desse ponto (1000 kPa) uma maior dessaturação da umidade residual, presente nos microporos da fração fina do solo, onde se tem um novo ponto de entrada de ar na curva, levando a uma maior inflexão da curva, ilustrado pelo novo formato que decresce até 10.000 kPa.

Nessa parte mais seca das curvas há uma pequena variação da capacidade de retenção de água entre as profundidades, característica que podemos relacionar com diversos fatores, como a composição mineralógica, granulometria, massa específica do solo e distribuição dos tamanhos de poros (SAAB, 2016).

Os coeficientes de determinação (R^2) das CCRAS, ajustas pelo modelo proposto em Dexter et al. (2008), ficaram acima de 0,97, conforme apresentado na Tabela 9. A proximidade dos resultados dos coeficientes de ajustes demonstra a grande semelhança entre as curvas dos solos das três subáreas, para as duas profundidades (Figura 15), o que indica se tratar de solos com as mesmas características entre as profundidades analisadas. Essa baixa capacidade de retenção de água em solos arenosos, como indicado pelo formato bimodal das curvas, tem sido elencada na literatura (SILVA et al., 2020; FIDALSKI; TORMENA, 2022).

Tabela 9 – Coeficientes das curvas de retenção de água nos solos, obtidos a partir dos ajustes pelo modelo de Dexter et al. (2008), sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (2^a, 5^a e 7^a folha/anos)

| Folha | Prof | Coeficientes | | | | | R^2 |
|-------|--------|--------------|-------------|--------|------------|-------|-------|
| | | C | a1 | a2 | h1 | h2 | |
| | - cm - | | m^3m^{-3} | | hPa^{-1} | | |
| 2 | 0-15 | 0,0217 | 0,1367 | 0,2245 | 2434 | 4,858 | 0,97 |
| | 15-30 | 0,0259 | 0,1415 | 0,1907 | 2333 | 6,712 | 0,97 |
| 5 | 0-15 | 0,0390 | 0,1076 | 0,2436 | 3735 | 7,426 | 0,97 |
| | 15-30 | 0,0264 | 0,1336 | 0,2419 | 4068 | 7,395 | 0,97 |
| 7 | 0-15 | 0,0377 | 0,0583 | 0,3304 | 2688 | 5,171 | 0,98 |
| | 15-30 | 0,0208 | 0,0982 | 0,2660 | 4019 | 5,533 | 0,98 |

C é a assíntota da equação e corresponde ao conteúdo de água residual; a1 e a2 descrevem o conteúdo de água referente à porosidade textural e estrutural, respectivamente; e h1 e h2 correspondem aos potenciais mátricos, aplicados para esvaziar o espaço poroso textural, e estrutural, respectivamente.

Na Figura 16, são apresentadas as distribuições do tamanho dos poros, derivadas dos dados das CCRAS, ajustadas pelo modelo de Dexter et al. (2008), nas três subáreas sob cana-

de-açúcar em diferentes tempos de cultivo (Tabela 9). As curvas das subáreas, com os picos correspondentes à porosidade estrutural (a2), foram superiores aos picos da porosidade textural (a1).

De fato, a curva para os solos sob a 2ª folha, verifica-se maior volume de poros com raios entre a faixa < 100 a $> 0,1 \mu\text{m}$ (Figura 16A), com $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a camada de 0-15 cm (seta azul) e $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (seta vermelha) para a camada de 15-30 cm. Esse comportamento das curvas para os solos sob a 2ª folha, diferiu do observado nas demais subáreas (5ª e 7ª folhas, Figuras 16B e 16C, respectivamente), e isso deve estar relacionado à prática de manejo adotada durante o preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar.

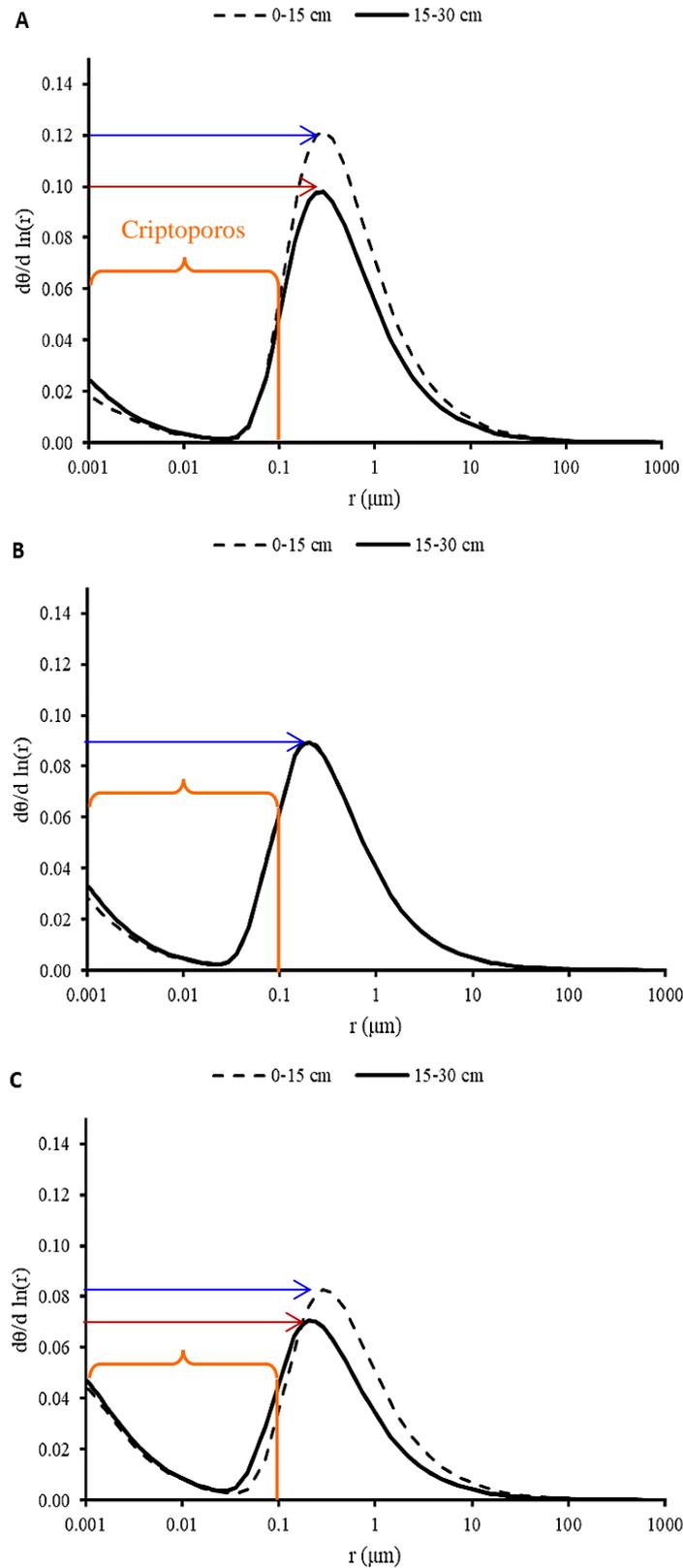
Verifica-se que todas as curvas apresentaram dois picos, sendo um deles com frequência de poros com raio $< 0,1 \mu\text{m}$, ou seja, podem ser caracterizados como criptoporos (indicado pela chave em laranja, Figura 16), uma classe de poros intrinsecamente relacionada à matriz do solo, em potenciais maiores que 1500 kPa, caracterizando dessa forma um comportamento bimodal.

Para os solos da subárea sob a 5ª folha, verifica-se que as curvas de frequência para as duas camadas avaliadas (0-15 e 15-30 cm) apresentaram comportamento semelhante, ou seja, o volume de poros caracterizados como macroporos, mesoporos e microporos é praticamente semelhante nas duas camadas, ilustrado pela sobreposição das curvas, que atingem um volume médio de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (seta azul, Figura 16B) para poros com raio $< 100 \mu\text{m}$.

Em relação às curvas para os solos sob a 7ª folha (Figura 16C), a frequência de poros foi menor ao observado nas curvas dos solos das subáreas sob as 2ª e 5ª folhas, com a valores variando de $\cong 0,082$ para a camada 0-15 cm (seta azul) e $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a camada 15-30 cm (seta vermelha).

Assim, avaliando o comportamento das curvas de distribuição de poros dos solos das três subáreas, pode-se concluir que os resultados indicam que os solos das subáreas sob a 2ª e 7ª folhas têm distribuição de poros mais heterogênea do que o observado nos solos da subárea sob a 5ª folha.

Figura 16 – Curva de distribuição de poros dos solos, ajustada pelo modelo de Dexter et al. (2008), sob cana-de-açúcar, com diferentes tempos de cultivo (A – 2ª folha/anos, B – 5ª folha/anos, C – 7ª folha/anos).



Fonte: arquivo pessoal

A redução da frequência de poros de maior tamanho com o passar do tempo de cultivo pode estar relacionada ao sistema de manejo adotado, já que o revolvimento do solo cria condições propícias para a formação de poros, mesmo que sejam estruturalmente instáveis, indicando assim, o maior volume na subárea sob a 2ª folha. É interessante destacar que, para os solos da subárea sob a 5ª folha, nas duas camadas avaliadas, a curva de frequência de distribuição de poros (Figura 16B) correlacionou-se com o comportamento da curva característica de retenção de água no solo (Figura 15B). Esse resultado está de acordo com os achados em Kraemer et al. (2022), ao afirmarem que a partir das CCRAS é possível ajustar funções matemáticas que permitem a determinação de diferentes características de poros, para estudar a degradação estrutural do solo, principalmente os macroporos, que são os primeiros a serem perdidos quando o solo é compactado.

Na literatura são sugeridas algumas classificações quanto ao tamanho de poros do solo, medidos em função do raio ou diâmetro equivalente – $r_{eq.}$ ou $\varnothing_{eq.}$ (KRAEMER et al., 2022), sendo a faixa de $\varnothing_{eq.}$ entre 30 e 1000 μm uma das utilizada para caracterizar os macroporos (REYNOLDS et al., 2022). Levando-se em consideração as curvas da Figura 16, pode-se afirmar que o maior volume de poros encontrados nos solos das subáreas teve tamanho em $r_{eq.}$ variando de 1 a 100 μm , com maior proporção entre 1 a 10 μm . Verifica-se, portanto, que as três subáreas analisadas (2ª, 5ª e 7ª folha) apresentam uma maior frequência de poros com menor $r_{eq.}$, como os mesoporos, que são responsáveis, juntamente com a classe dos macroporos, pela drenagem da água no solo até o mesmo atingir a condição da capacidade de campo (CARDUCCI et al., 2013).

Assim, as curvas da Figura 16 mostram que os solos das camadas 0-15 e 15-30 cm têm poros com $r_{eq.} < 0,1 \mu\text{m}$, tendo volume de aproximadamente $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para as subáreas sob as 2ª e 5ª folha, respectivamente; com $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a 7ª folha. Esses resultados indicam que há uma tendência de reconsolidação, ou acomodação do solo, com o passar do tempo e que isso influenciou a distribuição de poros do solo por tamanho, tornando-o mais heterogêneo.

Nesse contexto, conforme apresentado na Tabela 9, maiores valores de tensão (h) foram necessários para esvaziar os poros texturais (h_1) dos solos da subárea sob a 5ª folha, nas duas camadas de solo avaliadas, ou seja, esse fator pode estar relacionado as maiores quantidades de argila desses solos (215 e 238 g kg^{-1} , para 0-15 e 15-30 cm, respectivamente, Tabela 2). Aliado a isso, percebe-se também que a D_s dos solos da subárea sob a 5ª folha foi menor (1,47 e 1,44 g cm^{-3} , 0-15 e 15-30 cm, nessa ordem), que o constatado nas demais subáreas avaliadas (Tabela 3). A D_s é diretamente relacionada ao volume de poros, e dessa forma, modificações na

porosidade textural (a_1) e estrutural (a_2) podem implicar em mudanças na D_s (BARROS et al., 2016). Conforme destacado em Dexter et al. (2008), a porosidade estrutural é significativamente sensível ao aumento de D_s ; por outro lado, a porosidade textural é pouco influenciada pela D_s , e alterações nessa classe de poros pode vir a ocorrer quando é submetida a uma pressão mecânica considerável.

Em solos onde os poros apresentam comportamento bimodal os microporos são difíceis de serem comprimidos sob carga mecânica; e a água retida nos poros estruturais, os macroporos pode ser dividida em duas partes, água bruta e água do menisco (CHEN et al., 2019). Os poros do solo desempenham papel fundamental no funcionamento hidrológico do solo como retenção, condução de gases e solutos e propicia espaço para a vida microbiana, além do transporte e reação de produtos químicos (NIMMO, 2013). A distribuição de poros do solo tem estreita relação com as curvas características de retenção de água no solo e sua capacidade de armazenar água (ZHANG; ASCE; CHEN, 2005).

Apesar dos solos arenosos apresentarem distribuição de poros com característica unimodal (DEXTER et al., 2008; WANG et al., 2023), os teores de argila e silte dos solos das diferentes subáreas avaliadas no presente estudo, apresentaram comportamento bimodal, mesmo que a porosidade estrutural tenha sido baixa.

Contudo, podem ocorrer situações onde a distribuição bimodal de partículas dos solos não produzam curvas com comportamento bimodal, mas sim unimodal, a depender da estrutura do solo e da umidade (SATYANAGA et al., 2013).

Nessas circunstâncias, Zhang et al. (2022), estudando duas funções matemáticas para a predição dos espaços porosos do solo, constataram que de 192 amostras de solos analisadas, 66% apresentaram distribuição bimodal de poros, e a bimodalidade não se limitou a solos de textura fina, mas também a solos de textura mais grossa. Os autores também constataram que o parâmetro α para o domínio dos macroporos e matriz correlacionou-se com a fração de macroporos e o teor de areia do solo, já que o parâmetro α é um fator de escala para (h) ou potencial matricial da água dentro do sistema poroso do solo (DEXTER et al., 2008). Os solos arenosos devem apresentar, na grande maioria das vezes, uma distribuição monomodal de poros em função de sua estrutura não ser bem definida, como destacado em Huang e Hartemink (2021).

A distribuição de tamanho de poros apresentada na Tabela 4 está de acordo com o comportamento apresentado pelas CCRAS na Figura 15 A, B, C, que mesmo apresentando um comportamento bimodal, verifica-se a presença de poros classificados como mesoporos, seguidas de microporos estrutural e criptoporos. Os criptoporos são poros que armazenam

água, contudo, a sucção necessária para absorver essa água pelas plantas é muito elevada, em função do elevado potencial qual a mesma está adsorvida as partículas do solo.

Os solos com estrutura heterogênea tendem a apresentar maior proporção de macroporos, cerca de 50% a mais que os solos homogêneos e que a complexidade do sistema poroso nos solos heterogêneos é benéfica para o crescimento das raízes das plantas (GIULIANI; HALLET; LOADES, 2024). Além do mais, estudos como o de Ribeiro et al. (2007) indicam que as propriedades físicas do solo não são influenciadas pelos poros com diâmetro entre 30 e 37,5 μm para o solo em questão. Dessa forma, afirma-se que os poros caracterizados como microporos pouco influenciam no comportamento físico do solo, função esta direcionada aos macroporos e mesoporos.

Em solos com menor teor de silte e argila há predomínio de mesoporos, enquanto os macroporos e microporos são comuns em solos com maior teor de argila (LIMA et al., 2022). Isso explica o fato das curvas de distribuição de poros do solo (Figura 16 A, B e C) apresentarem frequência de poros com raio variando de 0,1 a 100 μm . Os poros do solo, de acordo com o seu diâmetro efetivo, podem ser classificados em macroporos ($> 100\mu\text{m}$), mesoporos (100-30 μm) e microporos ($<30 \mu\text{m}$) (LIMA et al., 2022).

Portanto, afirma-se que o comportamento das curvas de retenção de água no solo e da distribuição de poros por tamanho estão de acordo com o apresentado em Dexter et al. (2008), ao descreverem a relação entre as curvas de retenção com as de distribuição de poros do solo por tamanho. Outro ponto a ser destacado é que, levando-se em consideração os atributos físicos do solo e a análise de componentes principais, pode-se afirmar que os solos da subárea sob a 7ª folha apresenta melhor qualidade estrutural e física, quando comparados com os solos das demais subáreas analisadas.

5 CONCLUSÕES

Os tempos de implantação do canavial nas subáreas estudadas estão influenciando as propriedades físicas do solo, mostrando que os solos da subárea sob a 7ª folha/anos têm as melhores condições de qualidade física dos solos estudados, sendo confirmadas pelas técnicas multivariadas de ACP.

As curvas de retenção de água dos solos ajustadas pelo modelo de Dexter refletiram melhor as características dos solos tropicais, em apresentar mais de um ponto de inflexão nas curvas, sendo a segunda tensão de entrada de ar relacionada à drenagem dos microporos dos agregados do solo.

As curvas de distribuição de poros, ajustadas por meio dos dados das curvas de retenção de água do solo pelo modelo de Dexter, apresentaram comportamento bimodal, mas não sendo possível realizar a divisão da criptoporosidade, em subclasses de poros grandes e pequenos.

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**. 2008. 103f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2008.
- 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. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 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. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 65-75.
- ANDERSON, J. L.; BOUMA, J. Relationships between saturated hydraulic conductivity and morphometric data of an argillic horizon. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v. 37, n. 3, p. 408-413, 1973.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700030029x>
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 1, p. 111-116, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000900004>
- ANDRADE, R. S.; STONE, L.F.; GODOY, S. G. de. Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 9, p. 932-937, 2013.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000900004>
- ARAÚJO, F. S.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MATSURA, E. E.; BARBOSA, R. S. Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, p. 651-660, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000600011>
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200012>
- ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A.; SUAREZ, A. H. T.; COLMAN, B. A.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 6, n. 1, p. 41-47, 2019. <https://doi.org/10.32404/rean.v6i1.2761>
- AULER, A. C.; MIARA, S.; PIRES, L. F.; DA FONSECA, A. F.; BARTH, G. Soil physico-hydrical properties resulting from the management in Integrated Production Systems. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 976-989, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500013>

AULER, A. C.; PIRES, L. F.; DOS SANTOS, J. A. B.; CAIRES, E. F.; BORGES, J. A. R.; GIAROLA, N. F. B. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a Dystrudept soil. **Soil Use and Management**, v. 33, p. 129-140, 2017. <https://doi.org/10.1111/sum.12330>

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; RODRIGUES, S.; KERN, D. C. Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de Terra Preta Arqueológica. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 47, n. 4, p. 609-615, 2016. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160073>

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300029>

BITTELLI, M.; FLURY, M. Errors in water retention curves determined with pressure plates. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 73, p. 1453-1460, 2009. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0082>

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. Harlow: Prentice Hall, 2016. p. 1104.

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M. T.; FINK, J. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 174, n. 1, p. 104-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008>

BUSCH, S. L.; WEIHERMULLER, J. A.; HUISMAN, C. M.; STEELMAN, A. L.; ENDRES, H.; VERECKEN, J.; VAN, D. K. Coupled hydrogeophysical inversion of time-lapse surface GPR data to estimate hydraulic properties of a layered subsurface. **Water Resources Research**, Estocolmo, v. 49, p. 8480-8494, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/2013WR013992>

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. de; MAIA DE OLIVEIRA, L.; BARBOSA, S. M.; SILVA, E. A. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista Ciência Agrária- Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Pará, v. 58, n. 3, p. 284-291, 2015. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2014>

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 77-86, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100007>

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P.; SERAFIM, M. E. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 2, p. 291-302, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000200008>

CARVALHO, M. L.; LUZ, F. B.; LIMA, R. P.; POLIZELI, K. M. V. C.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Assessment of soil physical quality and water flow regulation under straw removal management in sugarcane productions fields. **Sustainability**, Basel v. 14, n. 2, p. 841, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14020841>

CÁSSARO, F. A. M.; BORKOWSKI, A. K.; PIRES, L. F.; ROSA J. Á.; SAAB, S. C. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, p. 175-179, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.10.004>

CESÁRIO, F. V.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BALIEIRO, F. C. **Estabilidade de agregados em água: análise crítica e padronização**. Rio de Janeiro: Embrapa: CNPS, 2010. 7 p. (Embrapa-CNPS. Comunicado Técnico, 57).

CHEN, R. P.; LIU, P.; WANG, P. F.; XANG, X. Pore-scale model for estimating the bimodal soil water characteristics curve and hydraulic conductivity of compacted soils with different initial density. **Engineering Geology**, v. 260, n. 1, p. 105199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105199>

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Primeiro levantamento/Maio 2020, safra 2020/2021. Brasília, v.7, n.1, p.1-62, 2020.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Terceiro levantamento/Novembro 2023, safra 2023/2024. Brasília, v.11, n.3, p.1-56, 2023.

CORÁ, J. E.; FERNANDES, C.; BERALDO, J. M. G.; MARCELO, A. V. Adição de areia para a dispersão de solos na análise granulométrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 33, n. 2, p. 255-262, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000200003>

CORREA, E. A.; MORAES, I. C.; GUEDES JÚNIOR, E.; COUTO JÚNIOR, A.; PINTO, S. A. F. P. Resistência à penetração e densidade do solo como indicadores na análise da susceptibilidade a erosão hídrica dos solos. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 10, n. 1, p. 141-146, 2014. <https://doi.org/10.1590/2237-1419>

CORTEZ, J. W.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; ARCOVERDE, S. N. S.; OLSZEVSZKIN, N. Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 11, n. 42, p. 343-351, 2018. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v11i42.7466>

COSTA, L. M.; DRESCHER, M. S. Implications of agricultural management on the epigeic fauna and soil physical properties of clayey Oxisol. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 65, n. 5, p. 443-449, 2018. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865050009>

DANE, J. H.; HOPMANS, J. W. Water retention and storage. In: DANE, J. H ; TOPP, G. C. (Ed). **Methods of soil analysis: Part 4 – physical methods**. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, p. 671-720, 2002. <https://doi.org/10.4236/ojss.2020.107015>

DEMARCHI, J.; PERUSI, M.; PIROLI, E. Análise da estabilidade de agregados de solos da microbacia do Ribeirão São Domingos, Santa Cruz do Rio Pardo – SP, sob diferentes tipos de uso e ocupação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 4, p. 7-29, 2012. <https://doi.org/10.5777/PAeT.V4.N2.01>

DEVINE, S.; MARKEWITZ, D.; HENDRIX, P.; COLEMAN, D. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades. **PLOS ONE**, v.9, n. 1, p. 1-12, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084988>

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I. Theory, effects, density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geodermaa.2003.09.005>

DEXTER, A. R.; CZYŻ, E. A.; RICHARD, G.; RESZKOWSKA, A. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, p. 243-253, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.010>

DEXTER, A. R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research-Elsevier**, San Diego, v. 31, p. 139-147, 1985. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90066-6)

DING, D.; ZHAO, Y.; FENG, H.; PENG, X.; SI, B. Using the double-exponential water retention equation to determine how soil pore-size distribution is linked to soil texture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 119-130, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.007>

DOS REIS, A. M.; ARMINDO, R. A.; DURAES, M. F.; LIER, Q. J. V. Evaluating pedotransfer functions of the Splintex model. **European Journal of Soil Science**, London, v. 69, n. 4, p. 685-697, 2018. [10.1111/ejss.12675](https://doi.org/10.1111/ejss.12675)

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, p. <https://doi.org/211-223>, 1994.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>

FAGUNDES, E. A. A.; SILVA, T. J. A.; SILVA, E. M. B. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 188-193, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000200009>

FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M.; CHERUBIN, M. R.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N.; JÚNNYOR, W. S. G.; JUNIO, N. S. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 46, e0210123, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210123>

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. 4 p. (Embrapa Pantanal. Comunicado técnico, 69).

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Physical quality of sandy soils under orange orchards in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, e0220006, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220006>

FLECK, M. P. A.; BOURDEL, M. C. Modelo de simulação e escolha de fatores na análise dos componentes principais. **Journal of Public Health**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 267-272, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0034-89101998000300010>

FRANCZISKOWSKI, M. A.; SEIDEL, E. P.; FEY, E.; ANSCHAU, K. A.; MOTTIN, M. C. Propriedades físicas do solo nos sistemas de plantio direto e preparo reduzido com diferentes plantas de cobertura. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.27, n.6, p.556-564, 2019. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i6.966>

GAO, L.; WANG, B.; LI, S.; WU, H.; WU, X.; LIANG, G.; GONG, D.; ZHANG, X.; CAI, D.; DEGRE, A. Soil wet aggregate distribution and pore size distribution under different tillage systems after 16 years in the Loess Plateau of China. **Catena**, v. 173, p. 38-47, 2018. . <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.043>

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C., eds. Methods of soil analysis: Part 4 – physical methods. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, p. 255-293, 2002. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>

GIULIANI, L. M.; HALLETT, P. D.; LOADES, K. W. Effects of soil structure complexity to root growth of plants with contrasting root architecture. **Soil and Tillage Research**, v. 238, n. 1, p. 106023, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106023>

GONÇALVES, A. D. A. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica saturada pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1174-1184, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500007>

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soils and environmental issues in sandy soils. **Earth-Sciences Review**, v. 208, n. 1, p. 103295, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>

JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: A review and recent developments. **Philosophical Transactions of The Royal Society**, v. 374, n. 2065, p. 1-16, 2016. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>

JONARD, F.; WEIHERMULLER, L.; SCHWANK, M.; JADOON, K. Z.; VEREECKEN, H.; LAMBOT, S. Estimation of hydraulic properties of a sandy soil using ground-based active and passive microwave remote sensing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 53, p. 309-3109, 2015. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2368831>

KARUP, D.; MOLDRUP, P.; TULLER, M.; ARTHUR, E.; DE JONGE, L. W. Prediction of the soil water retention curve for structured soil from saturation to oven-dryness. **European Journal of Soil Science**, London, v. 68, p. 57-65, 2017. <https://doi.org/10.1111/ejss.12401>

- KAY, B. D.; DEXTER, A. R. 1992. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown earth. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, p. 297-310. <https://doi.org/10.1071/SR9920297>.
- KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate Stability and Size Distribution. In: KLUTE, A. **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods**. 2 ed. Madison: John Wiley & Sons, Ltd, 1986. cap. 17, p. 425-442. <https://doi.org/10.12691/wjar-1-4-2>
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. p. 262.
- KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com o psicrômetro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000110>
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000600006>
- KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 150 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.
- KRAEMER, F. B.; CASTIGLIONI, M.; MORRÁS, H.; FERNÁNDEZ, P.; ÁLVAREZ, C. Pore size distribution and pores volume density of Mollisols and Vertisols under different cropping intensity managements with no-tillage. **Geoderma**, v. 405, n. 1, 115398, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115398>
- KRAVCHENKO, A. N.; GUBER, A. K.; RAZAVI, B. S.; KOESTEL, J.; QUIGLEY, M. Y; ROBERTSON, G. P; KUZYAKOV, Y. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. **Nature Communications**, v. 10, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11057-4>.
- KUTILEK, M. Soil hydraulic properties as related to soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 175-184, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.006>
- KUTÍLEK, M.; JENDELE, L.; PANAYIOTOPOULOS, K. P. The influence of uniaxial compression upon pore size distribution in bi-modal soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 27-37, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.001>
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no Solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2005. p. 344.
- LIBARDI, P. L., LIER, Q. J. V. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: MEDOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, 1999, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa:Tabuleiros Costeiros, 1999. p.47-56.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E.; JACOMINE, P. T. K. Comportamento físico de um Argissolo Acinzentado Coeso no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 33-40, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000100004>

LIMA, R. P.; ROLIM, M. M.; TOLEDO, M. P. S.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. R.; SILVA, I. A. C.; PEDROSA, E. M. R. Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 215, n. 1, p. 105215, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105215>

LU, S. G.; MALIK, Z.; CHEN, D. P.; WU, C. F. Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. **Catena**, v. 123, p. 79-87, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.07.010>

LU, S.; MALIK, Z.; CHEN, D.; WU, C. Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. **Catena** 123, 79-87, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.07.010>

LUXMOORE, R. J. Micro, meso and macroporosity of soil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 45, p. 671-672, 1981. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500030051x>

MARASCA, I.; LEMOS, S. V.; SILVA, R. B.; GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P. Soil Compaction Curve of an Oxisol under Sugarcane Planted after In-Row Deep Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 39, p. 1490-1497, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140559>

MARQUES, J. D. de O. **Horizontes pedogenéticos e sua relação com camadas hidráulicas do solo**. 2000. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

MARTINEZ, M. A.; TIMM, L. C.; MARTINS, J. H.; FERREIRA, P. A. Efeito da textura do solo sobre os parâmetros de alguns modelos matemáticos usados para estimar a curva de retenção de água no solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 4, n. 48, p. 1-9, 1995. <https://doi.org/10.13083/reveng.v32i1.15549>

MILAGRES, R. S.; MACHADO, T. A.; VIEIRA, L. B.; FERNANDES, H. C. Avaliação dos atributos físicos do solo em áreas inclinadas com sistema de plantio direto. **Revista Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 16, n. 3, p. 57-63, 2018. <https://doi.org/10.28998/rca.v16i3.4203>

MOREIRA, W. H.; JUNIOR, E. B.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, M. A. T.; FRANCO, H. H. S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 389-400, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200008>

NAVEED, M.; MOLDRUP, P.; VOGEL, H-JÖ.; LAMANDÉ, M.; WILDENSCHILD, D.; TULLER, M.; DE JONGE, L. W. Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution. **Geoderma**, Amsterdam, v. 217, p. 181-189, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.001>

NEISSE, A. C.; HONGYU, K. Aplicação de componentes principais e análise fatorial a dados criminais de 26 estados do EUA. **Engineering and Science**, Campo Grande, v. 5, n. 2, p. 105-115, 2016. <https://doi.org/10.18607/ES201654354>

NIMMO, J. R. Porosity and pore size distribution. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, v. 2005, p. 295-303, 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05265-9>

NIMMO, J. R.; PERKINS, K. S. Aggregate Stability and Size Distribution. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. **Methods of Soil Analysis: part 4 physical methods**. Madison: John Wiley & Sons, Ltd, 2002. cap. 14, p. 317–328. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c14>

NUNES, J. A.; SOUZA, E. R.; GUIMARÃES, R. M. L.; NUNES, C. C. C. G., DOS SANTOS, M. A.; SCHAFFER, B. Effect of controlled traffic on maintaining physical soil quality in sugarcane fields under different crop management systems. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-18, 2023. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2217746>

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de Manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, n.2, p.327-336, mar./abr. 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200011>

OTHMER, H.; DIEKKRUGER, B.; KUTILEK, M. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science**, Baltimore, v. 152, n. 3, p. 139-150, 1991. <https://doi.org/10.1097/00010694-199109000-00001>

PEREIRA, L. dos S.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. do C. O.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 17, n. 2, 2016. <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i2.877>

PIRES, L. F.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DIAS, N. M. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; DE ALCÂNTARA, E. N. Soil physico-hydrical properties changes induced by weed control methods in coffee plantation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam v. 246, p. 261-268, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.008>

PIRES, L. F.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DIAS, N. M. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; DE ALCÂNTARA, E. N. Weed control methods effect on the hydraulic attributes of a Latosol. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 39, p. 119-128, 2017b. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i1.30814>

POTT, C. A.; BARETA JÚNIOR, E.; MÜLLER, M. M. L.; GENÚ, A. M.; SANDINI, I. E.; KRAMER, L. F. M. Qualidade física do solo e produtividade da cultura do feijoeiro em sistema de integração lavoura-pecuária. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 7, n. 3, p. 85-98, 2018. <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v7i3.17442>

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos - 2ª Edição revisada e ampliada**. Curitiba, p. 474, 2015.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Constant head well permeameter (vadose zone). In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed), *Methods of soil analysis: Part 4 – physical methods physical methods*. **Soil Science Society of America**, Madison, p. 844-858, 2002.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400033>

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials, 1965. p. 128-152.

ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J. Describing soil hydraulic properties with sums of simple functions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 26-29, 1993. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010006x>

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, p. 472-479, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000500002>

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Use of S-index as a structural quality indicator for a compacted Latosols cultivated with maize. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 2, p. 455-465, 2018. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n222rc>

SAAB, A. L. **Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado**. 2016. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2016.

SALTON, J. C.; SILVA, W. M.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 129-138.

SANTOS, F. C.; VIANA, J. H. M.; PAIVA, C. A. D. **Caracterização química, física e microbiológica de solo arenoso no sudoeste baiano**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 42p. (Documento, n. 232).

SATYANAGA, A.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C.; WANG, J. Y. Water characteristics curve of soil with bimodal grain-size distribution. **Computer and Geotechnics**, v. 48, n. 3, p. 51-61, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.09.008>

SCALON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Water potential: miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J.H.; TOPP, C., eds. **Methods of soil analysis: Part 4 – Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 643-670.

- SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 3, p. 362-370, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400002>
- SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; COSTA, K. A. P.; SILVA, F. G.; FERREIRA FILHO, S. M. Structural changes in latosols of the cerrado region: I - relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 773-782, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300013>
- SHI, F.; ZHANG, C.; ZHANG, J.; ZHANG, X.; YAO, J. The changing pore size distribution of swelling and shrinking soil revealed by nuclear magnetic resonance relaxometry. **Journal Soils Sediments**, v. 17, p. 61-69, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1511-5>
- SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Mercator**, v. 3, n. 4, p. 169-185, 2015. <https://doi.org/10.4215/RM2015.1403.0010>
- SILVA, A. J. **Índices de agregação de solos: influência da fração areia**. 2022. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2022.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; LIMA, J. F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um argissolo amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 833-842, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600001>
- SILVA, É. A.; BENEVENUTE, P. A. N.; MELO, L. B. B. Qualidade física de um Latossolo estimada por estudos de curvas de retenção de água, indicadores de fácil determinação e índice S. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v. 11, n. 4, p. 49-54, 2017. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7522>
- SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 597-608, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140429>
- SILVA, I. F.; MIELNICKZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000700009>
- SILVA, J. E. D.; GONTIJO NETO, M. M.; SILVA, G. F. da; BORGHI, E.; CALONEGO, J. C. Soil organic matter and aggregate stability in soybean, maize and urochloa production systems in a very clayey soil of the Brazilian Savanna. **Agronomy**, v. 12, n. 1, p. 1652, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071652>

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544-552, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300009>

SILVA, M. P.; A. R. F., O.; SÁ, M. E.; ABRANTES, F. L.; BERTI, C. L. F.; SOUZA, L. C. D. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 1, p. 60-67, 2017. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i1a5424>

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; MARTINS, A. F.; SANTOS, T. E. D.; AMARAL, A. J. Caracterização físico-hídrica de solos arenosos através da curva de retenção de água, índice S e distribuição de poros por tamanho. **Agrarian**, v. 13, n. 50, p. 478-492, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7519123>

SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington: Usdasc, 2017. p. 437.

STARKLOFF, T.; LARSBO, M.; STOLTE, J.; HESSEL, R.; RITSEMA, C. Quantifying the impact of a succession of freezing-thawing cycles on the pore network of a silty clay loam and a loamy sand topsoil using X-ray tomography. **Catena**, Amsterdam, v. 156, p. 365-374, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.026>

SUZUKI, L. E. A. S.; LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; PILLON, C. N. Estrutura e armazenamento de água em um Argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 94-106, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100009>

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A.A.; MAGALHÃES, A. G.; BARRETO, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1207-1214, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100009>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos e análise de solos**. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**. V. 33, n. 2, p. 141-163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A. P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 943-952, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300004>

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**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>

VALADÃO, F. C. A.; WEBER, O. L.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; SCARPINELLI, A.; 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**, Viçosa, v. 39, p. 243-255, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150144>

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, p. 892–898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

VAN GENUCHTEN, M. T.; NIELSEN, D.R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annales Geophysicae**, v.3, n.5, 615-628, 1985. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)91047-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)91047-8)

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade de partículas. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. p.76-81.

VIANA, J. L.; DE SOUZA, J. L. M.; AULER, A. C.; DE OLIVEIRA, R. A.; ARAÚJO, R. M.; HOSHIDE, A. K.; DE ABREU, D. C.; DA SILVA, W. M. Water dynamics and hydraulic functions in sandy soils: Limitations to sugarcane cultivation in southern Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 9, p.7456, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15097456>

VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. A.; LIMA, C. C.; PEREIRA, D. M. G.; LIMA, M. E.; SOUSA, A. C. M.; SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v. 50, p. 322-332, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000400008>

VOMOCIL, J. A. **Porosity**. New York: Academic, 1965. p. 299-314.

WANG, M.; CHEN, P.; YI, P.; MA, T. Effect of fines content on pore distribution of sand/clay component soil. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 9216, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15129216>

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, London, v. 49, p. 73-84, 1998. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00129.x>

ZHANG, L.; ASCE, M.; CHEN, Q. Predicting bimodal soil-water characteristics curves. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 5, p. 666-670, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:5\(666\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:5(666))

ZHANG, Y.; WEIHERMÜLLER, L.; TOTH, B.; NOMAM, M.; VERECKEN, H. Analyzing dual porosity in soil hydraulic properties using soil databases for pedotransfer function development. **Vadoze Zone Journal**, v. 21, n. 5, e20227, 2022. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20227>

ŽYDELIS, R. L.; WEIHERMULLER, M.; HERBST, A.; KLOSTERHALFEN, S.; LAZAUSKAS, S. A model study on the effect of water and cold stress on maize development under nemoral climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 263, p. 169-179, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.011>

APÊNDICES

APÊNDICE A – Resultados dos autovalores e autovetores extraídos da análise de componentes principais na camada de 0-15 cm para os solos das três subáreas estudadas (2^a, 5^a e 7^a folha).

| Variável | CP1 | CP2 |
|-------------------------|------------|------------|
| Autovalores | 16,878 | 8,122 |
| Variância explicada (%) | 67,511 | 32,489 |
| Variância acumulada (%) | 67,511 | 100,00 |
| Autovetores | CP1 | CP2 |
| AT | -0,166 | 0,986 |
| AG | 0,524 | 0,852 |
| AF | -0,929 | 0,371 |
| Silte | 0,996 | -0,088 |
| Argila | -0,090 | -0,996 |
| ADA | 0,019 | -1,000 |
| GF | -0,797 | 0,604 |
| GD | 0,798 | -0,603 |
| S/A | 0,978 | -0,210 |
| Ds | 0,923 | 0,384 |
| RT | 0,243 | 0,018 |
| DMP _U | 0,202 | 0,196 |
| DMP _S | 0,240 | 0,057 |
| DMG _U | 0,211 | 0,176 |
| DMG _S | 0,240 | 0,058 |
| IGEA | -0,190 | 0,219 |
| Ksat | -0,209 | 0,180 |
| PT | -0,243 | 0,025 |
| Macro | -0,186 | 0,226 |
| Meso | -0,189 | 0,221 |
| Micro e+b | -0,217 | -0,159 |
| Micro t | 0,185 | 0,228 |
| Cripto | -0,168 | -0,254 |
| θ | 0,229 | 0,117 |
| RP | 0,242 | -0,039 |

AT = Areia total; AG = Areia grossa; AF = Areia fina; ADA = Argila dispersa em água; GF = Grau de flocação; GD = Grau de dispersão; S/A = relação silte/argila; Ds = Densidade do solo; RT = Resistência tênsil de agregados, DMP_U = Diâmetro médio ponderado úmido, DMP_S = Diâmetro médio ponderado seco; DMG_U = Diâmetro médio geométrico úmido; DMG_S = Diâmetro médio geométrico seco; IGEA = Índice geral de estabilidade de agregados; Ksat = Condutividade hidráulica saturada; PT = porosidade total; Macro = macroporosidade; Meso = mesoporosidade; Micro e+b = microporosidade estrutural e biológica; Micro t = microporosidade textural; Cripto = criptoporosidade; θ = Umidade volumétrica do solo; RP = resistência do solo à penetração de raízes.

APÊNDICE B – Resultados dos autovalores e autovetores extraídos da análise de componentes principais na camada de 0-15 cm para os solos das três subáreas estudadas (2^a, 5^a e 7^a folha).

| Variável | CP1 | CP2 |
|-------------------------|------------|------------|
| Autovalores | 13,367 | 11,633 |
| Variância explicada (%) | 53,470 | 46,530 |
| Variância acumulada (%) | 53,470 | 100,00 |
| Autovetores | CP1 | CP2 |
| AT | -0,564 | 0,826 |
| AG | 0,280 | 0,960 |
| AF | -1,000 | 0,012 |
| Silte | 0,867 | -0,498 |
| Argila | 0,365 | -0,931 |
| ADA | 0,773 | -0,634 |
| GF | -0,981 | -0,193 |
| GD | 0,981 | 0,193 |
| S/A | 0,900 | -0,435 |
| Ds | 0,015 | 1,000 |
| RT | 0,182 | 0,219 |
| DMP _U | 0,226 | 0,165 |
| DMP _S | 0,227 | 0,163 |
| DMG _U | 0,219 | 0,176 |
| DMG _S | 0,223 | 0,170 |
| IGEA | -0,220 | 0,174 |
| Ksat | -0,273 | -0,017 |
| PT | 0,009 | -0,293 |
| Macro | 0,047 | 0,289 |
| Meso | -0,271 | 0,040 |
| Micro e+b | -0,126 | -0,260 |
| Micro t | 0,167 | 0,232 |
| Cripto | -0,161 | -0,237 |
| θ | 0,269 | -0,053 |
| RP | 0,077 | -0,281 |

AT = Areia total; AG = Areia grossa; AF = Areia fina; ADA = Argila dispersa em água; GF = Grau de flocculação; GD = Grau de dispersão; S/A = relação silte/argila; Ds = Densidade do solo; RT = Resistência tênsil de agregados, DMP_U = Diâmetro médio ponderado úmido, DMP_S = Diâmetro médio ponderado seco; DMG_U = Diâmetro médio geométrico úmido; DMG_S = Diâmetro médio geométrico seco; IGEA = Índice geral de estabilidade de agregados; Ksat = Condutividade hidráulica saturada; PT = porosidade total; Macro = macroporosidade; Meso = mesoporosidade; Micro e+b = microporosidade estrutural e biológica; Micro t = microporosidade textural; Cripto = criptoporosidade; θ = Umidade volumétrica do solo; RP = resistência do solo à penetração de raízes.