

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**  
**Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos**



**Dissertação**

**Atributos físico-hídricos do solo e efeito de boas práticas agrícolas em  
unidades de produção de tabaco na Região Sul do Brasil**

**Eduardo Luceiro Santana**

**Pelotas, 2025**

**Eduardo Luceiro Santana**

**Atributos físico-hídricos do solo e efeito de boas práticas agrícolas em unidades de produção de tabaco na Região Sul do Brasil**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Professor Dr. Luís Carlos Timm

Coorientador: Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg

**Pelotas, 2025**

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

S231a Santana, Eduardo Luceiro

Atributos físico-hídricos do solo e efeito de boas práticas agrícolas em unidades de produção de tabaco na Região Sul do Brasil [recurso eletrônico] / Eduardo Luceiro Santana ; Luís Carlos Timm, orientador ; Adilson Luís Bamberg, coorientador. — Pelotas, 2025.

91 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Conservação do solo. 2. Conservação da água. 3. Qualidade do solo. 4. Retenção de água no solo. 5. Boas práticas agrícolas. I. Timm, Luís Carlos, orient. II. Bamberg, Adilson Luís, coorient. III. Título.

CDD 627

Eduardo Luceiro Santana

**Atributos físico-hídricos do solo e efeito de boas práticas agrícolas em unidades de produção de tabaco na Região Sul do Brasil**

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 07 de março de 2025.

Banca Examinadora:

Professor Dr. Luís Carlos Timm (Orientador)

Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, 2002.

Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg (Coorientador)

Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas, 2010.

Professor Dr. Lessandro Coll Faria

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras, 2011.

Dr. Ivan dos Santos Pereira

Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas, 2012.

## **Agradecimentos**

À Deus, pela força e sabedoria concedidas ao decorrer desta jornada.

Aos meus pais, Mirian Conceição Rodrigues Luceiro e Eduardo Dias Santana, que sempre me incentivaram e sonharam junto comigo na concretização de mais esse objetivo.

À minha namorada, Laura Martins Bueno que, além de dividir comigo toda a jornada acadêmica do mestrado, foi ombro amigo, porto seguro e esteve presente nos momentos mais desafiadores desta trajetória.

Aos meus sogros, Enilda Martins Bueno e Jorge Luiz Gazalle Bueno que, durante esses dois anos, foram fonte constante de incentivo e apoio incondicional.

Ao meu irmão, Mailor Luceiro Gomes, que sempre foi um exemplo para mim e, desde a infância, me incentivou a estudar e buscar novas oportunidades por meio do conhecimento.

À minha cunhada, Simone Silva Gomes, que sempre acreditou no meu potencial e, de todas as formas, buscou contribuir para a conclusão desta jornada.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Luís Carlos Timm e Dr. Adilson Luís Bamberg, pela paciência, dedicação e orientação, que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Lessandro Coll Faria e Dr. Ivan dos Santos Pereira pelas contribuições e sugestões valiosas.

Aos colegas do programa de pós-graduação, Bruna Moura e Ottoni de Leon, pela parceria nos estudos ao longo das disciplinas.

Aos colegas de laboratório, Luciane Alves, Lorrann de Lima Trecha e demais companheiros de pesquisa, pelo apoio e aprendizado compartilhado.

À CAPES, pelo suporte financeiro, e à Embrapa Clima Temperado que, através do Projeto AUERA e pela infraestrutura laboratorial disponibilizada, foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos docentes e técnicos administrativos do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas.

Aos amigos Arthur Giovelli, Eduardo Andia, Estevão Mazzochi, Gabriel Renz, Gustavo Lima, Luiz Henrique Dapper, Maksuel Ferraz, Matheus Schroeder, Rafael Ferrari, Thales Lidor e Thierley Abreu, pelo apoio e companheirismo.

Dedico este trabalho aos meus pais.

A vocês, minha eterna gratidão.

## Resumo

SANTANA, Eduardo Luceiro. **Atributos físico-hídricos do solo e efeito de boas práticas agrícolas em unidades de produção de tabaco na Região Sul do Brasil**. 2025. 91f. Dissertação (Mestrado Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

O Brasil figura no cenário mundial como o segundo maior produtor de tabaco. É uma cultura ligada à agricultura familiar e de grande impacto socioeconômico, onde a Região Sul do país é o principal polo produtor. Parte significativa das áreas carece de maior nível de adoção de boas práticas agrícolas de conservação do solo, para recuperar e preservar a qualidade do solo. Assim sendo, objetivou-se realizar um diagnóstico da qualidade física e hídrica do solo em propriedades produtoras de tabaco, conduzidas sob diferentes sistemas de cultivo e avaliar a efetividade da adoção de boas práticas agrícolas para ampliar o nível de conservação e qualidade do solo e da água na Região Sul do Brasil. No primeiro capítulo, foram estudadas 11 propriedades da Região Sul do Brasil, sendo que em cada uma delas foram analisadas duas camadas (0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m) e três sistemas de cultivos (Tabaco, Outro Sistema e Mata), onde a área de Mata foi utilizada como referência. Os atributos físico-hídricos do solo avaliados foram: densidade, porosidade, macroporosidade, microporosidade e CAD. Os resultados demonstraram que em determinadas propriedades, principalmente onde os solos das áreas são manejados convencionalmente, os limites críticos estabelecidos pela literatura foram superados, bem como permaneceram aquém do sistema Mata, que apresentou as condições mais favoráveis. Para os sistemas de produção de Tabaco e Outro Sistema, identificou-se que há uma menor capacidade de retenção de água no solo, concluindo-se que há uma oportunidade de ampliar o nível de adoção de práticas conservacionistas de solo. No segundo capítulo, utilizando uma propriedade como estudo de caso, foi conduzido em nível de campo uma comparação entre as condições do solo verificadas antes e após a adoção de boas práticas agrícolas. Para isso, abordou-se as mesmas camadas e foram avaliados os mesmos atributos físico-hídricos monitorados no capítulo anterior. As intervenções realizadas foram: correção da acidez, o uso de diferentes plantas de cobertura (mix de sementes e aveia solteira) e a implantação de um terraço de contenção de enxurrada. Os resultados obtidos evidenciaram uma melhoria na retenção de água e na estrutura do solo. Isso é decorrente da avaliação realizada ao longo de um único ciclo agrícola, que reflete apenas os efeitos a curto prazo. Acredita-se que a continuidade do monitoramento, de forma mais prolongada, possibilitará observar efeitos mais consistentes das boas práticas agrícolas sobre a qualidade física e hídrica do solo.

**Palavras-chave:** Conservação do solo e da água; retenção de água no solo; boas práticas agrícolas; qualidade do solo.

## Abstract

SANTANA, Eduardo Luceiro. **Soil physical-hydric attributes and the effect of good agricultural practices in tobacco production units in southern brazil.**

2025. 91p. Dissertation (Master's in Water Resources) – Graduate Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

Brazil ranks as the second-largest tobacco producer in the world. Tobacco cultivation is closely linked to family farming and has a significant socioeconomic impact, with the southern region of the country being the main production hub. A considerable portion of the cultivated areas lacks a higher level of adoption of good agricultural conservation practices to restore and preserve soil quality. Therefore, this study aimed to diagnose the physical and hydric quality of the soil in tobacco-producing farms under different cultivation systems and assess the effectiveness of adopting good agricultural practices to improve soil and water conservation in southern Brazil. In the first chapter, 11 properties in southern Brazil were studied, with soil analyses conducted at two depths (0.0–0.1 m and 0.1–0.2 m) across three cultivation systems (Tobacco, Other System, and Native Forest), where the Native Forest area was used as a reference. The evaluated soil physical-hydric attributes included bulk density, porosity, macroporosity, microporosity, and available water capacity (AWC). The results showed that in certain properties, particularly those managed under conventional practices, the critical limits established in the literature were exceeded, while the values remained below those observed in the Native Forest system, which presented the most favorable conditions. For the Tobacco and Other System production models, a lower water retention capacity in the soil was identified, indicating an opportunity to increase the adoption of soil conservation practices. In the second chapter, a single farm was used as a case study to conduct a field-level comparison of soil conditions before and after the adoption of good agricultural practices. The same soil depths were analyzed, and the same physical-hydric attributes monitored in the previous chapter were evaluated. The interventions applied included soil acidity correction, the use of different cover crops (a seed mix and single oat cultivation), and the implementation of a contour terrace for runoff control. The results demonstrated an improvement in water retention and soil structure. These findings reflect a short-term assessment over a single agricultural cycle. It is believed that continued long-term monitoring will allow for the observation of more consistent effects of good agricultural practices on soil physical and hydric quality.

**Keywords:** Soil and water conservation; water retention in soil; good agricultural practices; soil quality.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Localização das 11 propriedades utilizadas para composição da área do estudo distribuídas na Região Sul do Brasil.....	33
Figura 2 - Fluxograma representando as etapas de coleta e tratamento dos dados experimentais.....	36
Figura 3 - Relação entre o conteúdo de água volumétrico estimado pelo modelo de van Genuchten e os valores mensurados experimentalmente para 11 propriedades produtoras de tabaco da Região Sul do Brasil, avaliados em três distintas áreas da propriedade e em duas camadas de solo, com indicadores de ajuste do modelo.....	39
Figura 4 - Matriz de correlação de Pearson entre parâmetros físico hídricos do solo para a camada de (a) 0,0 - 0,1 m e (b) 0,1 - 0,2 m.....	40
Figura 5 - Distribuição dos valores médios e identificação do valor limite desejável para densidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes camadas do solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.....	42
Figura 6 - Distribuição dos valores médios e identificação do fator limite desejável para porosidade total do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.....	44
Figura 7 - Distribuição dos valores médios e identificação do fator limite desejável para macroporosidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.....	45
Figura 8 - Distribuição dos valores médios e identificação do valor limite desejável para microporosidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.....	47
Figura 9 - Distribuição dos valores médios e identificação do fator limite desejável para capacidade de água disponível do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.....	48

Figura 10 - Curvas características de retenção de água, em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e para 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.....	50
Figura 11 - Densidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 m (A) e 0,1 - 0,2 m (B). Barras representam a média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil $\pm$ os desvios padrões. Letras posicionadas sobre as barras verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.....	52
Figura 12 - Porosidade total do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. As barras representam a média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil $\pm$ os desvios padrões. Letras posicionadas sobre as barras verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.....	53
Figura 13 - Macroporosidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. Barras representam a média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil $\pm$ os desvios padrões. Letras posicionadas sobre as barras verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.....	54
Figura 14 - Microporosidade em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. Barras representam média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil, $\pm$ os desvios padrões. Letras posicionadas sobre as linhas verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.....	55
Figura 15 - Capacidade de água disponível em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. Barras representam a média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil $\pm$ desvios padrões. Letras posicionadas sobre as linhas verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.....	56
Figura 16 - Mapa de localização da propriedade em estudo e das áreas da propriedade onde foram realizadas as coletas de amostras de solo.....	60
Figura 17 - Fluxograma das etapas metodológicas de coleta e análise dos dados...	63

Figura 18 - Relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo, estimado pelo modelo de van Genuchten e os valores mensurados experimentalmente para uma propriedade produtora de tabaco, com indicadores de ajuste do modelo.....	66
Figura 19 - Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros físico-hídricos do solo. Os diagramas (A) e (B) correspondem às profundidades de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m, respectivamente, da primeira coleta. Os diagramas (C) e (D) representam as mesmas profundidades para a segunda coleta.....	67
Figura 20 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta.....	69
Figura 21 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta.....	72

Figura 22 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para  $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta..... 74

Figura 23 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para  $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta..... 76

Figura 24 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para  $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta..... 78

Figura 25 - Curvas características de retenção de água em diferentes sistemas de cultivo (Tabaco Mix, Tabaco Aveia, Outro sistema Mix, Outro sistema Aveia), diferentes profundidades do solo (0,0 - 0,1m e 0,1 - 0,2 m), para as duas coletas realizadas em diferentes momento da pesquisa..... 80

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Culturas agrícolas em duas épocas, diversidade e nível de diversificação em 11 propriedades produtoras de tabaco na região sul do Brasil.....	32
Tabela 2 - Caracterização do solo, manejo e processos erosivos em propriedades produtoras de tabaco na região sul do brasil.....	33
Tabela 3 - Teores de argila e matéria orgânica em diferentes sistemas de uso do solo nas 11 propriedades produtoras de tabaco da região Sul do Brasil.....	40
Tabela 4 - Análise de Variância (ANOVA) dos Fatores de Tratamento: Mata, Outro Sistema e Cultivo de Tabaco.....	50
Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) dos fatores experimentais do tratamento: a) Coleta e b) Sistema de manejo e c) interação entre Coleta x Sistemas de manejo..	67

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>17</b>
1.1. Organização do texto.....	18
1.2. Justificativa da pesquisa.....	18
1.3. Problema de pesquisa.....	19
1.4. Objetivo geral.....	19
1.5. Objetivos específicos.....	19
1.6. Hipótese.....	20
<b>2. Revisão de literatura.....</b>	<b>21</b>
2.1. Cultivo de tabaco.....	21
2.2. Manejo da cultura do tabaco.....	22
2.3. Impacto dos sistemas de preparo sobre a qualidade do solo.....	23
2.4. Física do solo.....	24
2.5. Atributos físico-hídricos do solo.....	26
2.6. Boas práticas agrícolas e a qualidade físico-hídrica do solo.....	28
<b>3. Capítulo 1 - Atributos Físico-Hídricos do Solo em Propriedades Produtoras de Tabaco da Região Sul do Brasil.....</b>	<b>30</b>
3.1. Introdução.....	30
3.2. Metodologia.....	31
3.2.1. Área de estudo.....	31
3.2.2. Coleta de amostras e tratamento dos dados.....	35
3.2.3. Análises estatísticas.....	37
3.3. Resultados e discussão.....	38
3.4. Considerações finais.....	56
<b>4. Capítulo 2 - Avaliação dos Efeitos das Boas Práticas Agrícolas sobre a Qualidade do Solo em uma Propriedade Produtora de Tabaco na Região Sul do Brasil.....</b>	<b>58</b>
4.1. Introdução.....	58
4.2. Materiais e métodos.....	59

4.2.1. Área de estudo e histórico de utilização.....	59
4.2.2. Coleta e tratamento das amostras de solo.....	61
4.2.3. Análises estatísticas.....	64
4.3. Resultados e discussão.....	64
4.4. Considerações finais.....	81
<b>5. Considerações finais da dissertação.....</b>	<b>82</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>83</b>

## 1. Introdução

Segundo dados da Food and Agriculture Organization (FAO), relativos a 2016, o Brasil ocupou a segunda posição no ranking mundial de produção de tabaco, sendo responsável por 10,1% da produção global. O país figura atrás apenas da China e à frente de nações como Índia, Estados Unidos e Indonésia, compondo, assim, o grupo dos cinco maiores produtores, responsáveis por cerca de 71% da produção mundial. Além disso, o Brasil é líder global em exportações de tabaco desde 1993, e essa cultura desempenha um papel estratégico no desenvolvimento regional e na inserção internacional do país. Entre os principais fatores que conferem competitividade à produção nacional estão as condições edafoclimáticas favoráveis, a disponibilidade de mão de obra, o avanço da mecanização e os investimentos em pesquisa agropecuária.

A produção brasileira de tabaco está concentrada majoritariamente na Região Sul, com destaque para microrregiões como Santa Cruz do Sul (RS) e Canoinhas (SC), onde predomina o cultivo em pequenas propriedades familiares. Na safra 2022/2023, foram registradas 124.993 famílias envolvidas na atividade, resultando em uma produção de 605.703 toneladas. O processo produtivo é intensivo em mão de obra e insumos, elementos que exercem papel central na obtenção de elevados índices de produtividade e qualidade do produto.

A Região Sul é responsável por mais de 90% da produção nacional de tabaco, e sua trajetória histórica remonta ao século XIX, com forte influência da imigração europeia, especialmente no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina. Em 2022, a produção nacional totalizou 606 mil toneladas, das quais 95,4% foram destinadas à exportação, gerando R\$ 11 bilhões em receitas para o país.

A inserção do Brasil em um mercado internacional altamente competitivo exige a conformidade com legislações rigorosas e padrões técnicos cada vez mais exigentes, tanto em quantidade quanto em características intrínsecas e extrínsecas do produto. O setor produtivo tem direcionado esforços significativos para atender a essas exigências e garantir a sustentabilidade da cadeia produtiva.

Entretanto, no contexto da agropecuária nacional, a degradação do solo representa um desafio significativo, sobretudo em áreas de cultivo intensivo. O manejo inadequado, caracterizado pelo revolvimento excessivo do solo e pela ausência de práticas como rotação e sucessão de culturas, tem contribuído para

alterações indesejadas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, comprometendo sua qualidade e reduzindo a produtividade agrícola.

Aproximadamente 95% da produção global de alimentos depende diretamente da saúde do solo, o que reforça a importância da adoção de práticas agrícolas sustentáveis. A exploração intensiva dos recursos naturais e o crescimento populacional exercem pressões adicionais sobre os solos, comprometendo sua capacidade de prover serviços ecossistêmicos essenciais.

Apesar da relevância do tema, ainda são escassas as pesquisas voltadas ao cultivo do tabaco na Região Sul do Brasil, especialmente no que se refere à influência dos sistemas de manejo sobre os atributos físico-hídricos do solo. Nesse sentido, os resultados deste estudo poderão oferecer subsídios relevantes ao setor, bem como para a sociedade em geral. Diante disso, este trabalho se propõe a realizar um diagnóstico de atributos físico-hídricos do solo frente aos principais sistemas de cultivo adotados em 11 propriedades produtoras de tabaco no Sul do Brasil, bem como analisar as variações sobre estes mesmos atributos, decorrentes da adoção de boas práticas agrícolas, através de um estudo de caso numa propriedade representativa da produção de tabaco no extremo Sul do Brasil.

### **1.1. Organização do texto**

A presente dissertação está estruturada em capítulos, conforme as diretrizes do manual da Universidade Federal de Pelotas para trabalhos acadêmicos. Inicialmente, são apresentadas a introdução e revisão bibliográfica, na sequência os capítulos 1 e 2, intitulados respectivamente como: “Análise dos Atributos Físico-Hídricos do Solo em Propriedades Produtoras de Tabaco da Região Sul do Brasil” e “Avaliação dos Efeitos das Boas Práticas Agrícolas sobre a Qualidade do Solo em uma Propriedade Produtora de Tabaco na Região Sul do Brasil.”, nos quais estão detalhados os principais aspectos da pesquisa. Por fim, as considerações finais seguidas das referências bibliográficas utilizadas.

### **1.2. Justificativa da pesquisa**

A conservação da qualidade físico-hídrica do solo é essencial para a manutenção da produtividade agrícola e da sustentabilidade ambiental. Estudos anteriores evidenciaram degradação da qualidade dos atributos físico-hídricos do solo decorrente da baixa adoção de práticas de conservação do solo e da água em

propriedades produtoras de tabaco no Sul do Brasil. Adicionalmente, a adoção de algumas recomendações e práticas de cultivo podem retomar a qualidade físico-hídrica do solo, em áreas de produção de tabaco no Sul do Brasil. Dessa forma, esse trabalho se justifica pela oportunidade de diagnosticar de forma representativa e precisa o status atual dos atributos do solo nessas propriedades, bem como para demonstrar como algumas práticas podem ser efetivas.

### **1.3. Problema de pesquisa**

O sistema de preparo convencional do solo, como é o caso das áreas de parte relevante das propriedades envolvidas na produção de tabaco no Sul do Brasil, é caracterizado pelo revolvimento intenso e continuado do solo, e que sem a mudança no sistema de manejo e preparo, acarreta em problemas significativos na qualidade do solo. Dessa forma, a adoção de boas práticas agrícolas permite atenuar os efeitos adversos e inerentes das atividades agrícolas sobre os atributos físico-hídricos do solo.

### **1.4. Objetivo geral**

Avaliar a qualidade física e hídrica do solo em propriedades produtoras de tabaco, conduzidas sob diferentes sistemas de cultivo, bem como o respectivo impacto da adoção de boas práticas de conservação do solo e da água numa propriedade localizada no Extremo Sul da Região Sul do Brasil.

### **1.5. Objetivos específicos**

- I. Quantificar os atributos físicos e hídricos do solo sob cultivo de tabaco e cultivo adicional relevante (outro sistema) em comparação à mata nativa em onze propriedades produtoras de tabaco do Sul do Brasil; (Capítulo 1)
- II. Aprimorar o método de obtenção da curva de retenção de água no solo, através de diferentes métodos de obtenção de dados observados e de modelos de ajuste para a obtenção de dados estimados; (Capítulo 1 e 2)
- III. Avaliar a influência da adoção de boas práticas de conservação sobre os atributos do solo em uma propriedade de produção de tabaco no Sul do Brasil (Capítulo 2).

### **1.6. Hipótese**

O diagnóstico do status geral das condições físico-hídricas, e a correspondente adoção de boas práticas agrícolas permite melhorar a qualidade físico-hídrica do solo em áreas de produção de tabaco no Sul do Brasil, tradicionalmente manejadas sob preparo convencional do solo.

## **2. Revisão de literatura**

### **2.1. Cultivo de tabaco**

As espécies de plantas *Nicotiana tabacum* e *Nicotiana rustica* são originárias da região dos Andes, na América do Sul (MUSK; DE KLERK, 2003). As duas variedades foram as primeiras a serem nomeadas no gênero *Nicotiana*, o feito foi realizado pelo botânico sueco Carolus Linnaeus no ano de 1756 (HANAFIN; CLANCY, 2015). Na atualidade, existem aproximadamente setenta espécies pertencentes ao gênero *Nicotiana*, porém muitas são fruto do cultivo humano (HAUSTEIN; GRONEBERG, 2009).

De acordo com Rheinheimer et al., (1994), o sistema de preparo convencional do solo, na cultura do tabaco, tem ocasionado uma acentuada diminuição nos níveis de matéria orgânica, de atividade microbiológica e da estabilidade de agregados no solo. Um fator agravante adicional é a escassez de áreas disponíveis para o cultivo, o que contribui para a deterioração progressiva da qualidade desses solos ao longo do tempo.

O tabaco é hoje o produto agrícola não alimentar com a maior produção mundial, cultivado em mais de 120 países (BARLA; KUMAR, 2019). É uma cultura que necessita de calor e umidade, por se tratar de um cultivo de baixa exigência, permitiu que essa se expandisse globalmente (HANAFIN; CLANCY, 2015). Sua produção abrange todo o ano e envolve cinco fases distintas: germinação de mudas e preparo do solo, transplante das mudas, cultivo e colheita, cura e pré-classificação (FASSA et al., 2020).

Os maiores produtores de tabaco são China, Brasil e Índia (NARA et al., 2019). No ano de 2020, a produção mundial de tabaco foi de 5,8 milhões de toneladas (STATISTA, 2023).

A cultura do tabaco é uma cultura ligada à agricultura familiar e economicamente figura entre os principais cultivos agrícolas do Brasil (BOETTCHER et al., 2020). Sua produção é caracterizada pelo sistema integrado de produção, no qual a empresa fornece as sementes, fertilizantes e suporte técnico e garante a comercialização do produto para o produtor (THOMAZ; ANTONELI, 2022). As variedades Virgínia, Burley e o Comum são as mais cultivadas em território nacional (MARTINS-DA-SILVA et al., 2022). O Brasil é há 30 anos o maior exportador de tabaco, sendo que o sul é a região responsável pela maior parte da produção, no

ano de 2022 o país exportou mais de 460 mil toneladas do produto (SINDITABACO, 2023).

Apenas no Rio Grande do Sul, a cultura no ano de 2022 teve uma produção superior a 4 bilhões de reais, 294 mil toneladas de tabaco, referentes a 149.149 hectares de tabaco colhidos, em 51.508 propriedades (IBGE, 2022), sendo assim, uma cultura que possui impacto econômico significativo no estado.

## **2.2. Manejo da cultura do tabaco**

A produção do tabaco, no Brasil, possui carência de mecanização, por uma série de fatores, como o tipo de terreno e área à qual esta cultura está ligada (DOS SANTOS et al., 2023). O cultivo do tabaco se inicia pelo preparo do solo, as quais compreendem práticas mecânicas que antecedem a semeadura, como aração e gradagem. Para a obtenção de rendimentos congruentes se faz necessário o preparo adequado do solo (REICHERT et al., 2019).

Após o preparo do solo, é a etapa da semeadura. No Rio Grande do Sul, a semeadura é feita nos meses de junho e julho (THOMAS; BREDEMEIER, 2016). As mudas são germinadas em sementeiras e depois as mudas correspondentes são transplantadas para o solo. Durante o crescimento, uma série de cuidados são necessários, como o controle de pragas, doenças e a nutrição das plantas. A seletividade de nutrientes do solo e a aplicação inadequada de fertilizantes em cultivos sucessivos de tabaco podem resultar em desequilíbrios nutricionais (CHEN et al., 2022), causando uma diminuição no rendimento qualitativo e quantitativo da produção.

Entre os nutrientes cruciais para alcançar um rendimento e qualidade satisfatórios na cultura do tabaco está o nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre e os micronutrientes (SOARES et al., 2020). Existem diversos problemas ligados à nutrição das plantas, que podem afetar a produtividade e qualidade do tabaco autotoxicidade (DENG et al., 2017), que pode ser contornado através do manejo adequado do solo e do controle biológico (CHEN et al., 2023).

Outra questão necessária em algumas regiões, como na Georgia, Estados Unidos da América, é a irrigação. O tabaco, apesar de ser uma planta resistente a condições hídricas inferiores às ideais, apresenta bons resultados quando submetido a irrigação manejada de forma adequada, mantendo os níveis de água no solo próximos à capacidade de campo (MOORE; SUMNER, 2010). O melhoramento

genético das plantas possui como foco a melhora das folhas (REICHERT et al., 2019), e o sistema radicular das plantas possui pouca área de absorção (RHEINHEIMER et al., 1994). As plântulas de tabaco frequentemente enfrentam desafios fisiológicos, incluindo o risco de morte, caso não recebam uma quantidade adequada de água (YANG et al., 2019).

Quando parte das folhas da planta atinge a maturidade fisiológica, é iniciada a colheita. No Brasil o tabaco é uma cultura ligada à agricultura familiar da região sul do país, a mão de obra costuma ser de base familiar, as áreas de cultivo são relativamente pequenas, na maioria das vezes o terreno possui um relevo acentuado, contribuindo para que a colheita seja realizada manualmente (DOS SANTOS et al., 2023).

Entre as variedades de tabaco, seis delas são adequadas para passar pelo processo de secagem, no Brasil, a variedade Virgínia é a mais produzida, correspondendo a 85% do total da produção (HIRSCH; LANDAU, 2020).

Manejos do solo como a cobertura vegetal na entressafra, o revolvimento mínimo, e a utilização de camalhões são técnicas que diminuem as perdas e corroboram para um bom rendimento em cultivos sucessivos (PELLEGRINI et al., 2006).

### **2.3. Impacto dos sistemas de preparo sobre a qualidade do solo**

Muitos dos desafios associados aos cultivos agrícolas estão diretamente relacionados à pressão exercida sobre os recursos naturais locais. Essa pressão decorre do desflorestamento e do uso inadequado do solo, resultando em danos à bioestrutura e aos aquíferos locais devido às práticas de manejo e às técnicas inadequadas associadas ao padrão convencional predominante (LIMA et al., 2005).

De acordo com Rheinheimer et al. (2003), o preparo convencional tem proporcionado uma acentuada diminuição nos níveis de matéria orgânica, da atividade microbiológica e da estabilidade de agregados no solo. Um fator agravante adicional é a escassez de áreas disponíveis para o cultivo, o que contribui para a deterioração progressiva desses solos ao longo do tempo, como apontado por Barton et al. (2004). Isso pode culminar no abandono de áreas cultiváveis devido à redução da produtividade, conforme ressaltado por Bakker et al. (2005). Como se não bastasse, há ainda impactos significativos do preparo convencional sobre a capacidade do solo de reter e armazenar quantidades suficientes de água da chuva

após sua infiltração no perfil de solo. Isso decorre da deterioração da estrutura porosa do solo, principalmente de parte relevante do volume de microporos, responsáveis pela retenção, armazenamento e disponibilização de água às plantas, em especial durante as fases mais críticas das culturas.

O sistema plantio direto pode ser considerado como um conjunto de tecnologias de processos, produtos e serviços que institui ao agroecossistema um menor grau de perturbação e desordem em comparação a métodos de manejo que envolvem intensa mobilização do solo (SEIXAS et al., 2005, FERREIRA et al., 2015). O sistema de plantio direto fundamenta-se na aplicação de rotação de culturas e caracteriza-se pelo cultivo em solo permanentemente coberto por palha, sem a necessidade de preparo do solo por tempo indeterminado (HERNANI et. al., 1997). Sua principal característica é o revolvimento do solo restrito à linha de semeadura, mantendo os resíduos vegetais na superfície e reduzindo os impactos erosivos das precipitações intensas (BARIZON, 2001).

O cultivo mínimo é uma prática conservacionista que busca mexer o solo de forma mínima e preservar os restos de plantas, aplicando técnicas de escarificação e gradagem suave. Este sistema de manejo visa o estabelecimento e a manutenção de uma boa conservação do solo, influenciando diretamente na produtividade de certas culturas (MOREIRA et. al. 2009). O cultivo mínimo associado à utilização de plantas de cobertura do solo podem ter efeitos positivos no que diz respeito à sustentabilidade dos sistemas. Além do mais, oferecem condições mais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas Otsubo et. al. (2008). Identifica-se que com aplicação desta prática de manejo do solo, haja uma tendência de controle da erosão, conservação de água (FAGEIRA et al., 1999).

#### **2.4. Física do solo**

A física do solo é a ciência que se debruça sobre as características e propriedades físicas do solo. Entre os principais atributos físicos do solo estão a textura, a densidade e a (macro e micro) porosidade. Eles exercem influência sobre diversos fatores, como a aptidão deste para determinadas culturas ou a dinâmica da água no solo (SHIRAZI; BOERSMA, 1984). O conhecimento sobre os atributos físicos do solo e seus respectivos limites críticos permite trabalhar com a previsão do comportamento do solo em determinadas situações (LEPSCH, 2020).

A previsão do comportamento do solo, em relação ao uso e ao ciclo da água é de suma importância para o conhecimento científico em diversas áreas, indo da própria ciência do solo, a agronomia, hidrologia, entre outras áreas. Tal conhecimento também permite melhora nas práticas do manejo, potencializando a conservação do solo. A conservação do solo possui papel fundamental na produção de alimentos, na conservação da água, no aquecimento global e conseqüentemente na saúde humana (LEHMANN et al., 2020).

O solo é composto, entre outros elementos, por partículas minerais de diversos tamanhos, a textura é um termo atribuído para a classificação destas em diferentes padrões de tamanho (JONG VAN LIER, 2020). O usual é que se utilize três classes de tamanho: argila, silte e areia, mesmo que exista divergência no limítrofe das classes entre diferentes organizações e estudiosos. Para classificar a textura de um solo é usual que se realize a análise granulométrica e se classifique o resultado por meio do triângulo textural (REICHARDT; TIMM, 2004).

A classificação granulométrica é dividida em, seguindo a ordem decrescente: matacões, calhaus, cascalho, areia grossa, areia fina, silte e argila. No Brasil é utilizado o pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (DOS SANTOS, et al., 2018) que divide a textura do solo em cinco classes: textura muito argilosa, textura argilosa, textura arenosa, textura siltosa e textura média.

A densidade do solo, ou densidade aparente, é um importante parâmetro, sendo resultado da massa do solo seco dividida pelo volume de solo (DE ALMEIDA, 2005). É um atributo chave, por possuir relação com uma propriedade importante que é o nível de compactação do solo (AL-SHAMMARY et al., 2018) que reflete a capacidade do solo em cumprir suas funções ambientais e se relaciona diretamente com a capacidade de permitir a produção agrícola.

O solo é composto por partículas minerais de diversos tamanhos, associadas a óxidos minerais e matéria orgânica. O arranjo dessas partículas forma espaços vazios, conhecidos como poros do solo (HAO et al., 2008). A porosidade do solo é o parâmetro que indica os poros presentes em uma amostra de solo, a fração que pode ser ocupada por ar ou água, ou os dois fluidos (TEIXEIRA et al., 2017). Essa pode ser dividida em porosidade total, microporos e macroporos.

A estrutura do solo descreve como as partículas e os demais componentes do solo estão organizados, formando macro e microagregados, refletindo também a sua capacidade de reter e transmitir fluidos, substâncias orgânicas e inorgânicas (LAL,

1991). É uma propriedade que define a capacidade do solo de suportar a vida animal e vegetal e regular a qualidade da água (BRONICK; LAL, 2005).

## **2.5. Atributos físico-hídricos do solo**

Os atributos físico-hídricos do solo influenciam diretamente no movimento da água no solo (PINHEIRO; TEIXEIRA; KAUFMANN, 2009). O conhecimento destes atributos em relação aos limites críticos estabelecidos pela literatura, auxilia na compreensão da dinâmica da água no solo. Entre os principais processos de transferência de água e de energia influenciados estão a capacidade de infiltração e a condutividade hidráulica do solo saturado que, juntamente com os fenômenos de adsorção e capilaridade, refletem a capacidade que um determinado perfil de solo têm de reter, armazenar e disponibilizar água às plantas, .

A capacidade de infiltração do solo descreve a capacidade máxima do solo de permitir a entrada de água da chuva no perfil em determinada condição e tempo (SALLES et al., 1999). É o processo ligado à conversão da precipitação em umidade do solo (QU et al., 2025). Desta forma, a água ultrapassa a interface atmosfera-solo e é retida nos poros que ficam úmidos, podendo ficar saturados de água no seu nível máximo de acúmulo de água (MIRBABAEI et al., 2021).

O conceito de capacidade de campo expressa a quantidade máxima de água retida nos poros após a drenagem do excesso de água pela ação da força gravitacional (KRUEGER; OCHSNER, 2024). Já o ponto de murcha permanente é um termo atribuído ao teor de água no solo no qual as plantas atingem a murcha irreversível (TORRES et al., 2021). A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente são variáveis utilizadas para calcular o conteúdo de água disponível no solo (MYENI et al., 2021). O conteúdo de água disponível é o teor de água retido no solo entre o limite superior e inferior, obtido pela diferença entre esses limites, sendo que o valor obtido representa a quantidade máxima de água disponível para ser aproveitada pelas plantas (TEIXEIRA et al., 2021).

A densidade do solo ( $D_s$ ) corresponde à relação entre a massa de solo seco e seu volume, incluindo os espaços ocupados por ar e água. Essa propriedade é fundamental para avaliar as condições físicas do solo e pode variar conforme sua textura, sendo geralmente menor em solos de textura fina quando comparada a solos arenosos (De Melo e Da Silva, 2022).

A condutividade hidráulica expressa a facilidade da água de se movimentar pelos poros do solo. A condutividade hidráulica em solo saturado tem origem nos estudos de Darcy realizados em meados no século XIX, onde foi definido que o deslocamento do fluido em material poroso é definido por uma relação linear entre gradiente hidráulico e velocidade (SANCHEZ-VILA; GUADAGNINI; CARRERA, 2006). É um parâmetro que possui influência de diversos fatores físicos do solo, como a textura e a densidade, logo, tais parâmetros com frequência são utilizados como preditores para sua estimativa.

A porosidade total do solo (Pt) representa a fração do volume do solo não ocupada por sólidos, sendo determinada a partir da densidade do solo e das partículas. Fatores como matéria orgânica e textura influenciam essa propriedade, atuando na agregação das partículas e na distribuição dos poros. Além disso, o manejo inadequado pode impactar diretamente a porosidade, afetando a infiltração de água, a densidade do solo e, conseqüentemente, a produtividade (De Melo e Da Silva, 2022).

A microporosidade engloba os poros com diâmetro inferior a 50  $\mu\text{m}$ , responsáveis pelo armazenamento de água disponível para as plantas. Sua determinação é realizada por meio da saturação das amostras e posterior aplicação de uma tensão de 6 kPa em mesa de areia, até que se atinja o equilíbrio hídrico (TEIXEIRA et al., 2017).

A macroporosidade, por sua vez, corresponde aos poros com diâmetro superior a 50  $\mu\text{m}$ , fundamentais para a infiltração e movimentação do ar e da água no solo. A estimativa dessa propriedade é obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, permitindo avaliar a capacidade do solo de promover a drenagem e aeração adequadas (TEIXEIRA et al., 2017).

A capacidade de água disponível (CAD) é um atributo fundamental do solo para o cálculo do balanço hídrico, influenciada por fatores como textura, estrutura, densidade e porosidade, além das características da cultura em questão, especialmente a profundidade do sistema radicular. A definição inadequada desse valor pode comprometer a precisão dos resultados do balanço hídrico (SOUZA; GOMES, 2008).

## 2.6. Boas práticas agrícolas e a qualidade físico-hídrica do solo

Segundo a FAO, as Boas Práticas Agrícolas, conhecidas internacionalmente como Good Agricultural Practices (GAP), consistem em princípios aplicados à produção e ao pós-colheita, garantindo produtos seguros e sustentáveis. Trata-se de uma norma voluntária que busca assegurar a qualidade dos alimentos, ao mesmo tempo em que promove a gestão ambiental responsável nas áreas agrícolas (Amekawa, 2009). Entre os benefícios proporcionados aos produtores, destacam-se a redução do uso de insumos, o aumento da produtividade e a melhoria na qualidade dos produtos agrícolas (Bairagi, 2019). Além disso, as BPAs estão fundamentadas em três pilares essenciais: equidade social, sustentabilidade e segurança alimentar (FAO, 2016).

No contexto do plantio direto, as BPAs incluem estratégias como rotação de culturas diversificadas, utilização de plantas de cobertura, controle integrado de pragas, doenças e plantas invasoras, além da reposição equilibrada de nutrientes e do uso racional de agroquímicos. A adoção conjunta dessas práticas favorece a produtividade agrícola, preservando a capacidade produtiva do solo e dos recursos naturais (Bedano, 2016).

O avanço da agricultura intensiva, caracterizado pelo cultivo em larga escala e pelo uso excessivo de fertilizantes sintéticos, têm impactado negativamente a microbiota do solo, comprometendo sua resiliência e funções ecológicas essenciais. (De Vries et al., 2013; Banerjee et al., 2019). Para reduzir esses impactos, recomenda-se cada vez mais a adoção de estratégias de fertilização equilibrada. Essas práticas favorecem o aumento da biomassa e da diversidade microbiana (Hu et al., 2018; Jat et al., 2022).

Clara et al. (2024) apresentaram que as práticas de agricultura de conservação possuem vantagens significativas em comparação à agricultura convencional, especialmente no que diz respeito à qualidade do solo e dos grãos. A adoção da agricultura de conservação favoreceu a melhoria da estrutura do solo, aumentou sua capacidade de infiltração de água e reduziu os processos erosivos. Evidenciando que sistemas agrícolas menos disruptivos proporcionam benefícios duradouros à qualidade do solo.

Essas práticas são adotadas como uma estratégia para conciliar a produtividade e a rentabilidade no setor agrícola, ao mesmo tempo em que contribuem para a preservação dos recursos naturais. Produtores, instituições

financeiras e organizações ambientais buscam mensurar os benefícios dessas abordagens conservacionistas, avaliando sua eficácia na redução da perda de sedimentos e nutrientes (Momm et al., 2024). Essa quantificação é essencial para embasar a tomada de decisões fundamentadas em dados. A efetividade dessas práticas tem sido analisada por meio de diversos experimentos conduzidos tanto em campo quanto em laboratório (Her et al., 2016).

Dentre as boas práticas agrícolas temos a agricultura de conservação que envolve práticas que minimizam a alteração do solo, preservando sua estrutura, biodiversidade e reduzindo processos de degradação, como erosão e compactação. Entre as principais técnicas estão a semeadura direta, a mobilização reduzida e o uso de coberturas vegetais para proteção do solo. Além de contribuir para a conservação ambiental, esse sistema traz benefícios econômicos ao agricultor ao melhorar a qualidade do solo e reduzir custos com insumos (MAIATO, 2016).

Outro método, conhecido como uso de estruturas de contenção de enxurrada, tem como objetivo maximizar a retenção da água da chuva, adequar sua taxa de infiltração no solo, reduzir a velocidade do escoamento superficial e aumentar a capacidade de armazenamento hídrico. Além disso, essas estruturas contribuem para a melhoria das condições físicas e químicas do solo, favorecendo o desenvolvimento das culturas ( DE CARVALHO et al., 2012).

A cobertura vegetal, viva ou morta, atua na interceptação das gotas de chuva, reduzindo o impacto direto no solo e minimizando a desagregação das partículas, que inicia o processo erosivo. Além de diminuir a velocidade do escoamento superficial, contribui para a manutenção da infiltração de água, evitando o selamento do solo. Também protege contra a radiação solar, reduz a variação térmica, preserva a umidade e favorece a atividade microbiana, auxiliando ainda no controle de plantas daninhas (ROSOLEM et al., 2003).

Outro método utilizado, a rotação de culturas, consiste na alternância temporal do cultivo de diferentes espécies vegetais em uma mesma área, priorizando a diversificação dos sistemas radiculares, como a combinação de gramíneas e leguminosas. Esse manejo contribui para a melhoria das condições do solo, deixando efeitos residuais benéficos tanto para sua estrutura quanto para a cultura subsequente. Em regiões onde a soja é predominante, ela geralmente assume o papel de cultura principal, sendo a principal fonte de renda (Gaudêncio et al., 1986; Calegari, 1990; Broch et al., 1997; Santos & Reis, 2003).

### **3. Capítulo 1 - Atributos Físico-Hídricos do Solo em Propriedades Produtoras de Tabaco da Região Sul do Brasil.**

#### **3.1. Introdução**

O Brasil é o segundo maior produtor global de tabaco, com 10,1% da produção mundial, atrás apenas da China (FAO, 2016). Contudo, assim como outras culturas agrícolas, o cultivo do tabaco, se não acompanhado de boas práticas, pode resultar em significativa degradação do solo (ANTONELI et al., 2023). A compreensão do impacto do cultivo de determinada cultura no solo, em diferentes situações e ao longo do tempo, é de extrema importância para a conservação do solo e para a viabilidade do cultivo a longo prazo.

O Brasil é um dos líderes nas exportações de tabaco. Desde 1993, juntamente com a China, Índia, Estados Unidos e Indonésia, esses países representam cerca de 71% da produção mundial (SINDITABACO, 2023). A cultura do tabaco tem papel fundamental no desenvolvimento regional brasileiro, com destaque para a Região Sul, onde mais de 90% da produção está concentrada, principalmente em microrregiões como Santa Cruz do Sul e Canoinhas (SILVEIRA, 2015).

A produção de tabaco é marcada por ser executada em pequenas propriedades familiares. A atividade envolveu 124.993 famílias na safra de 2022/2023, com uma produção de 605.703 toneladas (AFUBRA, 2023). Em 2022, 95,4% dessa produção foi exportada, gerando R\$11 bilhões em receitas para os produtores e US\$2,4 bilhões em divisas para o país (SINDITABACO, 2022). Contudo, essa participação no mercado internacional requer conformidade com legislações rigorosas e padrões de qualidade (BUAINAIN et al., 2009).

Algumas condições específicas como o sistema de produção menos tecnificado, associado ao cultivo em áreas mais suscetíveis à degradação (perfis de solo mais rasos e áreas de maior declividade) fazem com que a cadeia produtiva do tabaco enfrente desafios, como a degradação do solo. Práticas inadequadas de manejo, como o uso excessivo do revolvimento do solo, a falta de rotação e de sucessão de culturas e a carência do uso de plantas de cobertura, principalmente antes do plantio das mudas no solo são fatores que contribuem para o comprometimento das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Nóbrega, 2020).

As características físico-hídricas do solo exercem influência direta sobre o movimento da água no seu perfil (PINHEIRO; TEIXEIRA; KAUFMANN, 2009). O entendimento desses atributos é essencial para a compreensão da dinâmica hídrica no solo, permitindo avaliar sua capacidade de reter e armazenar água nos poros, transmitir água entre os horizontes e disponibilizá-las às plantas.

O objetivo deste estudo é realizar um diagnóstico das condições físicas e hídricas do solo em 11 propriedades produtoras de tabaco no Sul do Brasil, considerando seus diferentes usos (Tabaco e Outro Sistema), comparando-os com as condições de áreas de referência (Mata Nativa) e em relação a limites críticos estabelecidos pela literatura.

## **3.2. Metodologia**

### **3.2.1. Área de estudo**

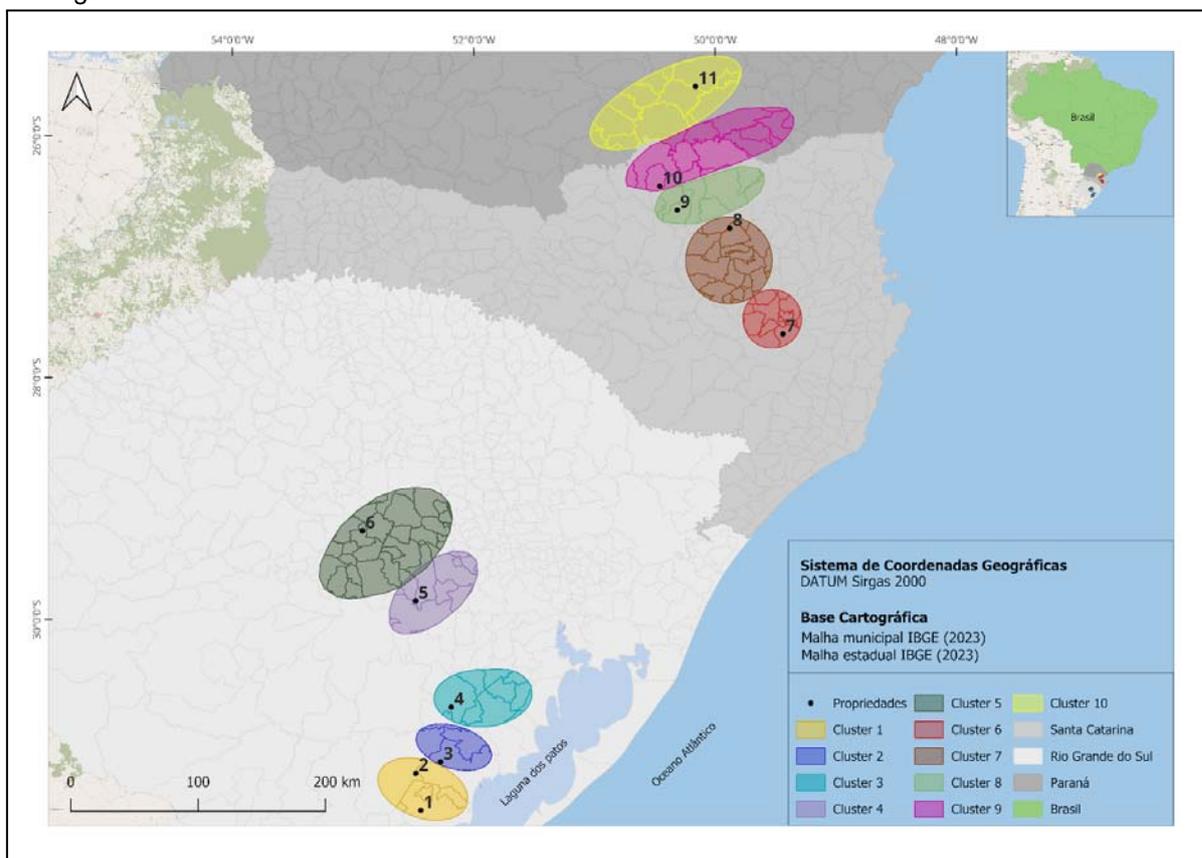
Este trabalho de pesquisa faz parte do Projeto AUERA - Desenvolvimento e avaliação de modelos de sustentabilidade de propriedades produtoras de tabaco no Sul do Brasil, conduzido através da parceria entre a Embrapa e a Philip Morris Brasil.

A população amostral foi composta por 5.283 propriedades rurais atendidas pela empresa, distribuídas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Seguindo a metodologia de Miura et al. (2022), selecionou-se um universo amostral de 101 propriedades para o pré-diagnóstico.

Em seguida, foram realizadas visitas a essas propriedades, as quais foram coletadas informações sobre suas sustentabilidade e seus eixos por meio de um questionário. Com base nesses dados, os indicadores foram definidos, subsidiando a escolha de 11 propriedades para a etapa de Intervenção e Monitoramento, conforme as metodologias de Pereira et al. (2023) e a disponibilidade de recursos financeiros (Pereira et al., 2023).

Após, realizou-se uma análise de agrupamento entre as propriedades e o fator previamente estabelecido, o que possibilitou identificar 10 clusters, cujo quais têm características similares em termos de elementos fundamentais na análise ambiental e geográfica como: morfologia da paisagem, cultura, solo, hidrografia e vegetação. Portanto, foram selecionadas duas propriedades no cluster um e para os demais clusters, uma propriedade para cada um, sendo possível chegar na configuração exposta na Figura 1.

Figura 1 - Localização das 11 propriedades utilizadas para composição da área do estudo distribuídas na Região Sul do Brasil.



Fonte: Autor.

A Tabela 1 apresenta os níveis de diversificação agrícola e as culturas cultivadas nas 11 propriedades produtoras de tabaco da Região Sul do Brasil, considerando a produção nas estações de primavera/verão e outono/inverno.

Tabela 1 - Culturas agrícolas em duas épocas, diversidade e nível de diversificação em 11 propriedades produtoras de tabaco na região sul do Brasil

Propriedade	Nível de Diversificação	Produção Primavera/Verão (culturas/uso)	Produção Outono/Inverno (culturas/uso)
1	Elevado	Tabaco, Milho grão, Milho silagem, Soja, Feijão	Aveia, Azevem
2	Intermediário	Tabaco, Soja, Milho	Aveia-preta, Azevem, Nabo forrageiro
3	Intermediário	Tabaco, Milho grão, Milho silagem	Aveia-preta
4	Intermediário	Tabaco, Milho grão, Feijão, Mandioca, Batata-doce	Aveia-preta, Crotalária
5	Satisfatório	Tabaco, Milho grão, Soja	Não especificado

Tabela 1 - Culturas agrícolas em duas épocas, diversidade e nível de diversificação em 11 propriedades produtoras de tabaco na região sul do Brasil

Propriedade	Nível de Diversificação	Produção Primavera/Verão (culturas/uso)	Produção Outono/Inverno (culturas/uso)
6	Intermediário	Tabaco, Milho grão, Feijão, Mandioca, Batata-doce	Aveia-preta, Brachiária, Tifton
7	Elevado	Tabaco, Soja, Milho grão, Milho silagem, Batata, Feijão, Erva-mate	Aveia, Centeio
8	Intermediário	Tabaco, Milho grão, Feijão, Soja	Aveia-preta, Azevém, Ervilhaca, Nabo, Braquiária, Tifton
9	Intermediário	Tabaco, Milho grão, Erva-mate, Feijão, Batata, Mandioca, Batata-doce, Amendoim	Aveia-preta, Azevém, Ervilhaca
10	Elevado	Tabaco, Milho grão, Feijão, Mandioca, Batata-doce, frutas e hortaliças	Azevém
11	Relevante	Tabaco, Milho grão, Milho silagem, Batata-doce, Mandioca, variedades crioulas (melão, abóbora, moranga, melancia), frutas e hortaliças	Aveia

Fonte: Relatório interno do Projeto AUERA. Dados não publicados

No que se refere à diversificação das culturas, observa-se uma variação de níveis intermediários a elevados, o que favorece uma estrutura do solo com poros mais heterogêneos. As propriedades concentram a produção de primavera/verão no tabaco, integrada a cultivos complementares como milho, soja, feijão e, em alguns casos, mandioca, batata-doce, batata e hortaliças, enquanto o período de outono/inverno é destinado à manutenção da cobertura do solo, favorecendo a proteção ambiental.

A Tabela 2 apresenta o relevo, preparo do solo, plantas de cobertura e informações sobre a adoção de práticas conservacionistas nas 11 propriedades produtoras de tabaco da Região Sul do Brasil.

Tabela 2 - Caracterização do solo, manejo e processos erosivos em propriedades produtoras de tabaco na região sul do Brasil

Propriedade	Relevo	Preparo do Solo / Manejo	Plantas de Cobertura	Observações sobre a adoção de práticas conservacionistas
1	Ondulado	Preparo convencional e baixa adoção do plantio direto	Cobertura insuficiente e palhada escassa	Poucas práticas conservacionistas; manejo da fertilidade sem base em análise de solo
2	Ondulado	Preparo convencional e ausência de plantio direto	Cobertura tardia, exposição ao risco de enxurrada)	Baixa adoção de práticas conservacionistas; manejo da fertilidade inadequado

Tabela 2 - Caracterização do solo, manejo e processos erosivos em propriedades produtoras de tabaco na região sul do Brasil

Propriedade	Relevo	Preparo do Solo / Manejo	Plantas de Cobertura	Observações sobre a adoção de práticas conservacionistas
3	Ondulado a forte ondulado	Preparo convencional e baixa adoção do plantio direto	Manejo inadequado (época de semeadura desfavorável)	Ausência de práticas conservacionistas
4	Acentuado em algumas áreas	Preparo convencional e ausência de plantio direto	Cobertura insuficiente e baixa diversificação	Ausência de práticas conservacionistas
5	Relativamente plano	Cultivo mínimo ou preparo convencional e não utiliza o plantio direto	Ressemeadura natural de azevém (baixa adesão e cobertura parcial)	Baixa adoção de práticas conservacionistas com ocorrência de erosão laminar e por sulcos.
6	Forte ondulado	Preparo convencional	Cobertura insuficiente e baixa diversificação	Baixa adoção de práticas conservacionistas com problemas erosivos evidentes.
7	Ondulado	Preparo convencional e ausência do sistema plantio direto	Baixa taxa de cobertura, principalmente na resteva	Ausência de adoção de práticas conservacionistas;
8	Relativamente plano	Predominância do cultivo mínimo	Cobertura bem diversificada	Algumas práticas conservacionistas adotadas, mas ausência de controle específico da enxurrada
9	Ondulado	Preparo convencional em toda a área	Cobertura intermediária	Baixa adoção de práticas conservacionistas e manejo da fertilidade realizado, porém sem total eficácia.
10	Ondulado a fortemente ondulado	Preparo convencional total	Pouca diversidade destacando a ausência de leguminosas	Apenas práticas pontuais e ausência de medidas como terraceamento e plantio direto; baixa adesão a bioinsumos.
11	Fortemente ondulado	Preparo convencional total	Combinação de aveia-preta e milho (empregado como pastagem)	Baixa adoção de práticas conservacionistas, manejo de fertilidade baseado em análises de solo.

Fonte: Relatório interno do Projeto AUERA. Dados não publicados

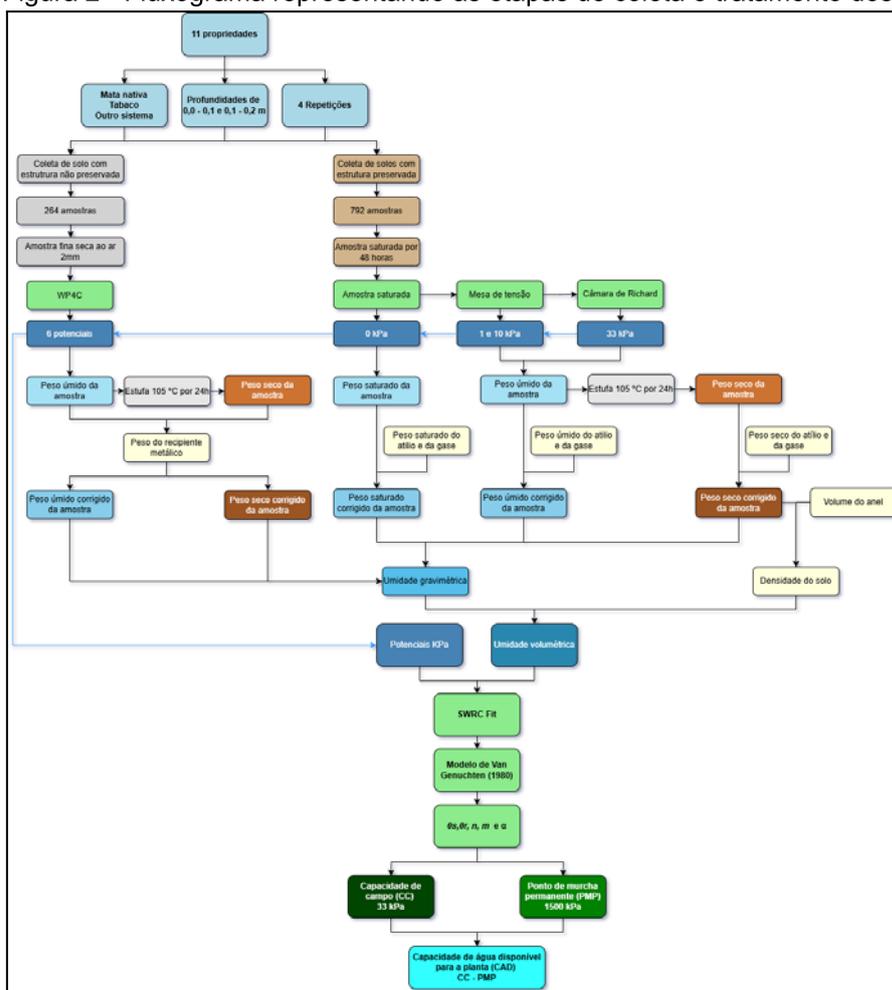
De maneira geral, o relevo varia de plano a fortemente ondulado, mas com predomínio de declividades acentuadas em boa parte dos casos, especialmente em Santa Catarina e Paraná. Esse fator, somado ao preparo convencional do solo, contribui diretamente para o processo erosivo e a perda de solo e água. Observa-se que há baixa adoção de práticas conservacionistas, como terraceamento, plantio direto e diversificação efetiva de plantas de cobertura. Embora quase todas as propriedades utilizem alguma forma de cobertura, o manejo é frequentemente

insuficiente ou tardio, resultando em períodos prolongados de solo descoberto e suscetível à erosão. Evidencia-se que a maioria dos produtores não realiza a correção da fertilidade com base em análise de solo ou, quando realizam a análise, nem sempre seguem suas recomendações.

### 3.2.2. Coleta de amostras e tratamento dos dados

Com o intuito de ilustrar de maneira sistemática o processo de coleta e tratamento dos dados utilizados neste estudo, apresenta-se o fluxograma da Figura 2. Nele, são detalhados todos os processos metodológicos adotados, desde o número de propriedades, camadas do solo, repetições, coleta das amostras de solo (deformadas e indeformadas) até a análise dos parâmetros físico-hídricos no laboratório.

Figura 2 - Fluxograma representando as etapas de coleta e tratamento dos dados experimentais.



Fonte: Autor.

Visando compreender o comportamento dos parâmetros físico-hídricos do solo em propriedades produtoras de tabacos da região sul do Brasil, foram avaliados os seguintes indicadores: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, capacidade de água disponível (CAD). Destaca-se que a determinação dos parâmetros supracitados foi realizada no Laboratório de Análises Físicas de Solos e Substratos da Embrapa Clima Temperado, e todas as análises físicas do solo seguiram as metodologias constantes no Manual de Métodos de Análises de Solo (Teixeira, 2017).

As coletas de amostras deformadas e indeformadas de solos foram realizadas no ano de 2021. Em cada propriedade, foram utilizados para o diagnóstico dos sistemas de uso do solo distintos: Tabaco (área de produção atual de tabaco na propriedade), Outro Sistema (utilizado como fonte de renda adicional na propriedade), Mata (área de mata nativa, considerada referência). Em cada sistema, foram realizadas coletas em quatro pontos amostrais (repetições) e em duas profundidades, de 0 - 0,1 m e de 0,1 - 0,2 m, sendo que, para cada repetição, foram coletadas três amostras. Ao final, totalizaram-se 792 amostras de solo indeformado e 264 amostras de solo deformado. As camadas amostradas foram escolhidas com base em sua suscetibilidade a mudanças físicas e hídricas decorrentes do preparo do solo e da atividade do sistema radicular das culturas cultivadas ao longo do tempo.

As amostras com estrutura preservada foram coletadas utilizando anéis volumétricos cilíndricos de aço de 4,8 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura. Para determinação da curva de retenção de água no solo, as amostras foram inicialmente saturadas por 48 horas, correspondentes assim ao potencial matricial ( $\Psi_m$ ) de 0 kPa e posteriormente quantificada a massa saturada. Em seguida, submetidas a tensões de 6 kPa em uma mesa de tensão, e a tensões de 10 e 33 kPa em uma câmara de pressão de Richards.

Para as amostras de solo com estrutura não preservada, foi realizada a coleta utilizando o trado convencional e, para as determinações dos potenciais matriciais, foi utilizado um potenciômetro de ponto de orvalho modelo WP4C da METER Group, visando obter leituras precisas para  $\Psi_m$  superiores a 300 kPa.

Dessa forma, os valores de conteúdo gravimétrico de água foram obtidos em base de massa e, posteriormente, convertidos em conteúdo volumétrico de água, multiplicando-se o conteúdo gravimétrico pela densidade do solo.

Os dados experimentais de  $\Psi_m$  (kPa) em relação ao conteúdo volumétrico de água ( $\theta \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) foram ajustados para a obtenção das curvas de retenção de água no solo (SWRC) por meio da combinação dos três métodos, utilizando o software SWRC Fit (SEKI et al., 2023), totalizando 792 curvas de retenção de água no solo.

Os parâmetros empíricos  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  foram obtidos e utilizados para ajustar as curvas de retenção de água, conforme o modelo proposto por van Genuchten (1980). Os conteúdos de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) a 33 kPa e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) a 1500 kPa foram determinados através desse modelo. A capacidade de água disponível (CAD) foi calculada como a diferença entre esses dois parâmetros.

### 3.2.3. Análises estatísticas

O desempenho estatístico do ajuste entre os conteúdos volumétricos de água observados e estimados pelo modelo de van Genuchten foi avaliado utilizando estatísticas como Erro Quadrático Médio (MSE), Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio (ME) e Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ). Essas análises foram realizadas no software R.

Em seguida, em relação aos atributos físicos do solo, a possível presença de valores discrepantes foi investigada por meio de análise de boxplots. A análise de normalidade de distribuição de frequência dos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, considerando um nível de significância de 0,05, também no software R.

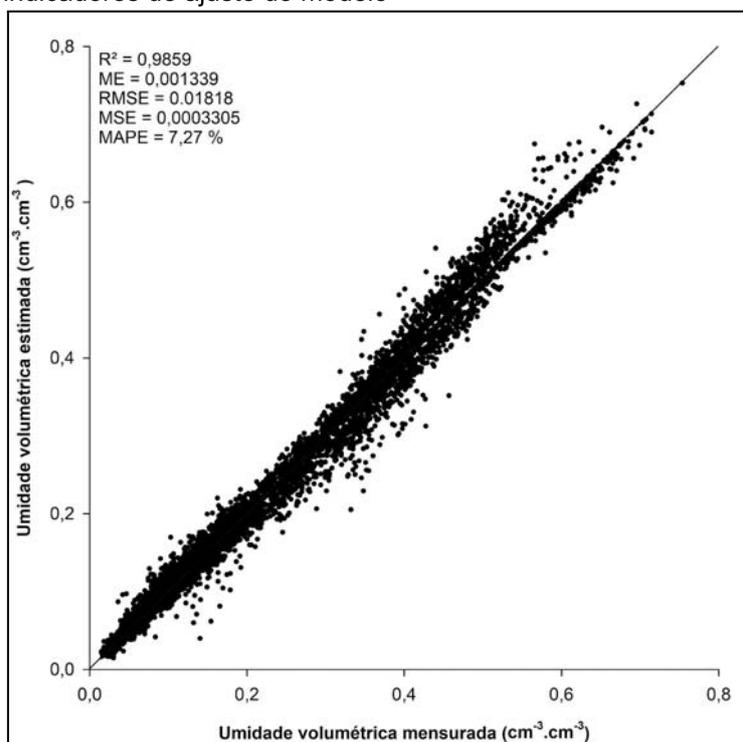
Os dados médios de cada atributo foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando detectado efeito significativo de tratamento, procedeu-se ao teste de comparações de médias de Tukey (5% de probabilidade de erro), utilizando o software estatístico Winstat.

Utilizou-se a correlação de Pearson para quantificar e avaliar relações lineares entre as variáveis. O coeficiente resultante varia de -1 a +1, indicando uma correlação mais forte quanto mais próximo estiver dos extremos. Valores negativos representam uma relação inversa, enquanto positivos indicam uma associação direta. Já coeficientes próximos de zero sugerem uma correlação fraca ou inexistente (Sousa, 2019).

### 3.3. Resultados e discussão

Na Figura 3, é apresentado um gráfico de dispersão com uma linha de concordância perfeita, que estabelece a relação entre os valores estimados pelo modelo de van Genuchten e os valores mensurados experimentalmente. Os pontos representam as observações individuais, e a linha de regressão permite a visualização da tendência entre os dados observados e estimados. Ademais, são apresentados os índices estatísticos que permitem avaliar a adequação e aplicabilidade do modelo.

Figura 3 - Relação entre o conteúdo de água volumétrico estimado pelo modelo de van Genuchten e os valores mensurados experimentalmente para 11 propriedades produtoras de tabaco da Região Sul do Brasil, avaliados em três distintas áreas da propriedade e em duas camadas de solo, com indicadores de ajuste do modelo



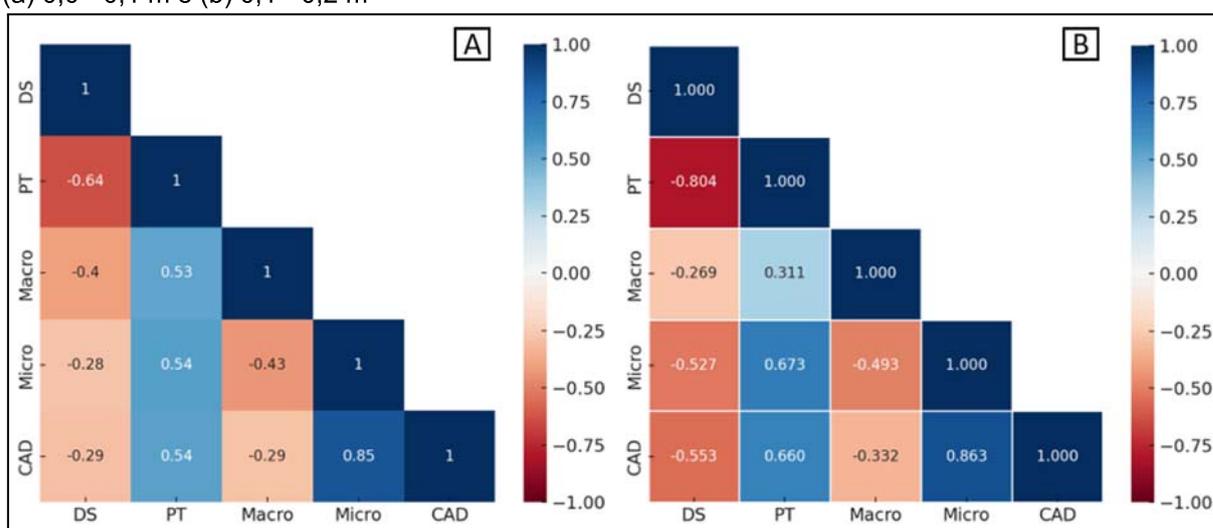
Fonte: Autor.

O elevado coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) de 0,9859 indica que 98,59% da variação nos dados experimentais são explicados pelo modelo, refletindo em uma alta relação entre os valores estimados e mensurados. Os valores de Erro Quadrático Médio (MSE) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) foram, respectivamente, de 0,0003305 e 0,01818, demonstram que as diferenças entre os valores estimados e os observados são mínimos. Além disso, o Erro Médio (ME) de -0,001339 e o Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE) de 7,27% confirmam que o

erro médio de previsão é baixo. Os resultados dos índices combinados indicam que o modelo de van Genuchten apresentou um excelente ajuste para estimativa do conteúdo volumétrico de água, independente do cultivo e da camada observada.

A Figura 4 apresenta a matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros físicos hídricos do solo: Densidade do solo (DS), Porosidade total (PT), Macroporosidade (Macro), Microporosidade (Micro) e Capacidade de água disponível (CAD), para as duas camadas analisadas.

Figura 4 - Matriz de correlação de Pearson entre parâmetros físico hídricos do solo para a camada de (a) 0,0 - 0,1 m e (b) 0,1 - 0,2 m



Fonte: Autor.

Observou-se que a densidade do solo apresenta correlações negativas com a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade e a capacidade de água disponível em ambas as camadas analisadas, sendo esses vínculos mais intensos na profundidade de 0,1 – 0,2 m. Esse aumento na magnitude dos coeficientes na camada mais profunda indica que a compactação do solo torna-se um fator determinante na formação de sua estrutura à medida que a profundidade aumenta.

Em contrapartida, a porosidade total exibe correlação positiva com os demais parâmetros, demonstrando que a maior disponibilidade de espaços porosos está associada a melhores condições de retenção hídrica. Além disso, a capacidade de água disponível apresenta uma relação positiva com a macroporosidade, sugerindo que solos com uma maior fração de microporos possuem maior potencial para reter água, enquanto solos com predominância de macroporos tendem a favorecer o escoamento da água.

A Tabela 3 apresenta os teores de argila e matéria orgânica em diferentes sistemas de uso do solo nas 11 propriedades produtoras de tabaco da região Sul do Brasil.

Tabela 3 - Teores de argila e matéria orgânica em diferentes sistemas de uso do solo nas 11 propriedades produtoras de tabaco da região Sul do Brasil

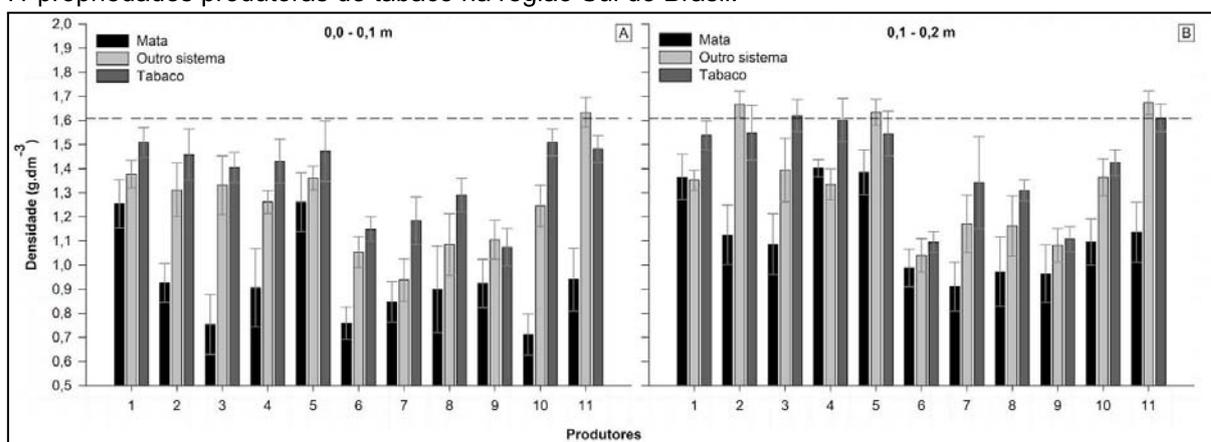
<b>Propriedades</b>	<b>Sistemas</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Matéria orgânica (%)</b>
1	Mata	19,00	2,70
	Outro sistema	19,00	1,50
	Tabaco	24,80	1,60
2	Mata	20,50	3,40
	Outro sistema	19,50	2,20
	Tabaco	25,30	2,60
3	Mata	21,00	4,00
	Outro sistema	19,00	2,00
	Tabaco	13,50	1,10
4	Mata	12,00	2,40
	Outro sistema	13,80	1,50
	Tabaco	16,30	1,20
5	Mata	16,80	2,30
	Outro sistema	18,80	1,70
	Tabaco	22,30	1,60
6	Mata	29,80	3,80
	Outro sistema	23,50	2,10
	Tabaco	32,50	2,80
7	Mata	44,50	4,30
	Outro sistema	31,30	3,70
	Tabaco	43,50	2,50
8	Mata	23,30	3,10
	Outro sistema	34,50	4,00
	Tabaco	35,80	4,00
9	Mata	27,50	4,60
	Outro sistema	29,50	4,10
	Tabaco	34,80	3,50
10	Mata	25,00	4,30
	Outro sistema	28,30	2,60
	Tabaco	29,30	2,60
11	Mata	13,00	4,40
	Outro sistema	24,50	1,30
	Tabaco	22,80	1,30

Fonte: Relatório interno do Projeto AUERA. Dados não publicados

De modo geral, os valores de matéria orgânica foram superiores nas áreas com presença de mata nativa. Este comportamento é típico de ambientes menos antropizados, sem ou com pouca presença de mecanização e adição com maior frequência de matéria orgânica. No que tange às áreas cultivadas com tabaco, os teores de matéria orgânica tendem a ser menores. Pode-se atrelar este fato às intensivas práticas agrícolas como evidenciado na Tabela 1. Destaca-se a propriedade 8, cuja qual foi caracterizada com uma adoção de plantas de cobertura bem diversificada, correspondendo com maior índice quando comparados a área de mata de referência, destacando que a adoção de boas práticas agrícolas podem auxiliar no aumento do teor de matéria orgânica no solo.

A Figura 5 apresenta os valores médios obtidos para a densidade do solo dos três sistemas (Mata, Outro sistema e Tabaco), avaliados em duas camadas (0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m) para as 11 propriedades analisadas.

Figura 5 - Distribuição dos valores médios e identificação do valor limite desejável para densidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes camadas do solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.



Fonte: Autor

O limite crítico para densidade do solo de 1,61 g.dm<sup>-3</sup> utilizado, tem como referência os resultados obtidos nos trabalhos de Jones et al. (1993) e Reichert et al. (2009). Na camada de 0,0 a 0,1 m somente o sistema de cultivo “Outro sistema” na propriedade 11 ultrapassou o limite pré-estabelecido, estando também muito superior ao valor médio observado para o tratamento considerado como referência (Mata). Entretanto, para a camada de 0,1 a 0,2 m, três propriedades apresentaram valores superiores a limite para o “Outro sistema” e duas para o sistema “Tabaco”. Destaca-se também que os valores obtidos para densidade média do solo,

independentemente da propriedade e camada, considerando o sistema Mata, foram sempre inferiores ao limite estabelecido.

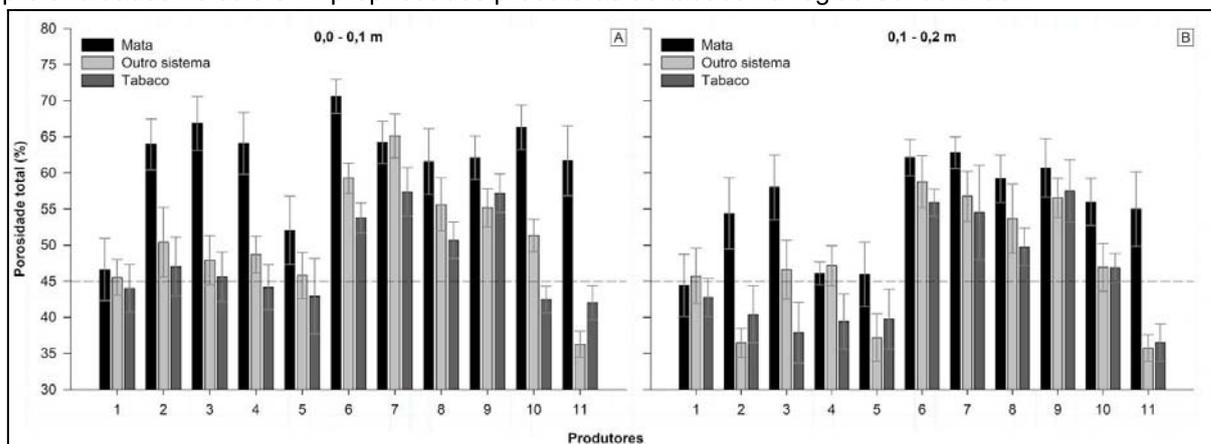
As propriedades 1, 2, 3, 4, 5, 10 e 11 apresentaram valores mais elevados de densidade do solo em comparação às propriedades 6, 7, 8 e 9. A predominância do preparo convencional do solo, aliada à baixa adoção do sistema de plantio direto e à presença de cobertura vegetal insuficiente ou mal distribuída, favoreceu a compactação das camadas superficiais. Ademais, observou-se que os sistemas de cultivo presentes nas propriedades de maior densidade apresentaram teores mais baixos de matéria orgânica, especialmente nos sistemas de produção de tabaco, com valores variando de 1,1% a 2,6%. Por outro lado, nas propriedades 6, 7, 8 e 9, os teores de matéria orgânica foram relativamente superiores, com destaque para valores de até 4,0%, associados à presença de maior diversidade de espécies vegetais e ao uso de plantas de cobertura.

As propriedades que apresentaram valores acima do considerado como condições restritivas, podem ocasionar uma limitação ao pleno desenvolvimento radicular das plantas nas camadas mais profundas. Assim sendo, quando detectados estes valores podem ser correlacionados com a compactação do solo. Portanto, identifica-se uma necessidade na adoção de boas práticas agrícolas que visem atenuar a compactação do solo e recuperar a estrutura do solo.

Turšić et al. (2016) realizou um estudo na Faculdade de Agricultura de Zagreb/Croácia, objetivando mensurar a compactação do solo em sistema convencional de tabaco, onde foi possível identificar que com o manejo tradicional de cultivo ocorreu um aumento da densidade do solo e uma maior resistência a penetração. Cavalieri et al. (2006) também encontraram resultados que corroboram com os achados do presente estudo, onde o sistema de manejo teve impacto direto na densidade do solo.

Na Figura 6 são apresentados os valores médios para a porosidade total do solo das 11 propriedades produtoras de tabaco considerando os três sistemas de cultivos (Mata, Outro sistema e Tabaco).

Figura 6 - Distribuição dos valores médios e identificação do fator limite desejável para porosidade total do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.



Fonte: Autor

O limite crítico para porosidade do solo de 45% utilizado, tem como referência os resultados obtidos nos trabalhos de Jones et al. (1983) e Reichert et al. (2009). Pode-se observar que, de modo geral, há uma diminuição nos valores de porosidade, da camada de 0,1 - 0,2 em relação a camada superficial do solo, indicando que há níveis de compactação progressiva ao longo do perfil. No que diz respeito ao sistema Mata, em ambas camadas, exceto para a propriedade 01 para a camada de 0,1 - 0,2 m, os valores foram sempre superiores quando comparados ao fator limitante. Evidencia-se também que os valores de porosidade total obtidos para o sistema Tabaco, na camada de 0,0 a 0,1 m, foram menores que os demais sistemas, exceto para a propriedade 11. No que refere-se a camada 0,1 a 0,2 m, esse comportamento se repete em mais da metade das propriedades observadas.

Os resultados obtidos demonstram que as propriedades 1, 2, 3, 4, 5, 10 e 11 apresentaram menores valores de porosidade total, enquanto as propriedades 6, 7, 8 e 9 exibiram porosidades maiores. Pode-se relacionar esses achados com os valores encontrados para a densidade, onde as propriedades que demonstraram maiores valores de densidade vieram a apresentar menores valores de porosidade total. Esse comportamento pode ser explicado pelo preparo convencional do solo e pela baixa adesão a práticas conservacionistas, que resultam na redução da matéria orgânica e na deterioração da estrutura dos agregados.

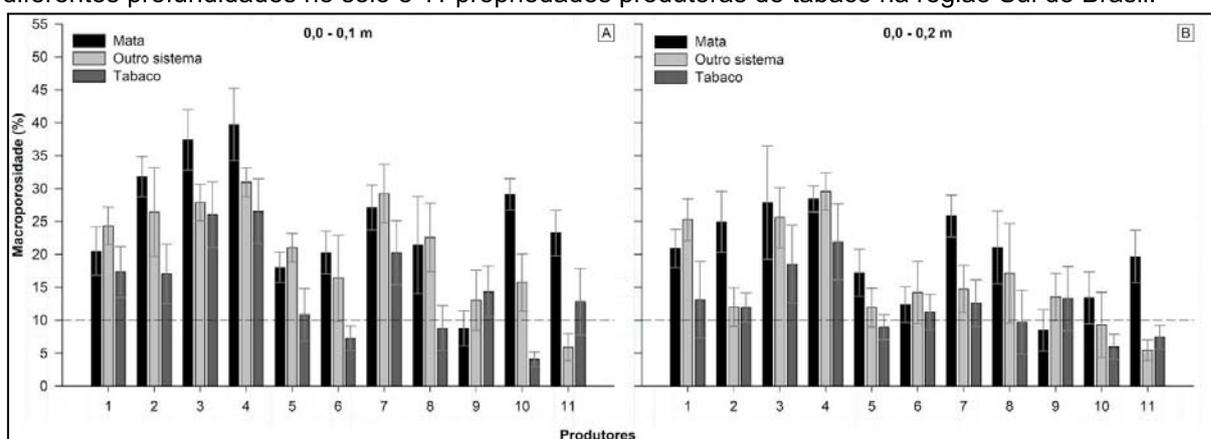
Assim, esses resultados ressaltam que há a necessidade das propriedades que se situam abaixo do limite crítico da inclusão de práticas conservacionistas que visem a minimização do revolvimento do solo e promovam a sustentabilidade

agrícola, como a rotação de culturas, cobertura vegetal e/ou adição de materiais orgânicos (ex.: esterco, resíduos orgânicos) e manejo adequado da mecanização, especialmente em sistemas de cultivo de tabaco, que apresentaram as condições mais limitantes.

De acordo com Antonelli et al. (2011), o preparo convencional do solo é comum no cultivo do tabaco e potencializa a degradação dos solos nas áreas agricultáveis. Portanto, os diferentes sistemas de manejo tem impacto direto sobre as propriedades físicas do solo, sendo estes fatores impactantes diretamente para o desenvolvimento das plantas (KLEPKER & ANGHINONI, 1995).

A Figura 7 expõe os valores médios obtidos para a macroporosidade dos três sistemas de cultivo (mata, outro sistema e tabaco), duas camadas de profundidades e para as 11 propriedades produtoras de tabaco da região sul do Brasil.

Figura 7 - Distribuição dos valores médios e identificação do fator limite desejável para macroporosidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.



Fonte: Autor

O limite crítico de 10% indica onde a macroporosidade do solo prejudica o fluxo de ar e de água no perfil, podendo comprometer a infiltração, aumentar o escoamento superficial e reduzir a oxigenação da zona radicular. Para a camada de 0,0 a 0,1 as propriedades 6, 8 e 10 apresentaram valores médios inferiores para o sistema Tabaco, já a propriedade 11 apresentou os valores médios menores para o sistema de cultivo Outro sistema. Na camada de 0,1 a 0,2 m todas as propriedades que demonstraram valores inferiores para o sistema Tabaco voltaram a apresentar tal comportamento, adicionalmente a propriedade 11, que apresentou juntamente com a propriedade 10 valores inferiores para o Outro sistema também.

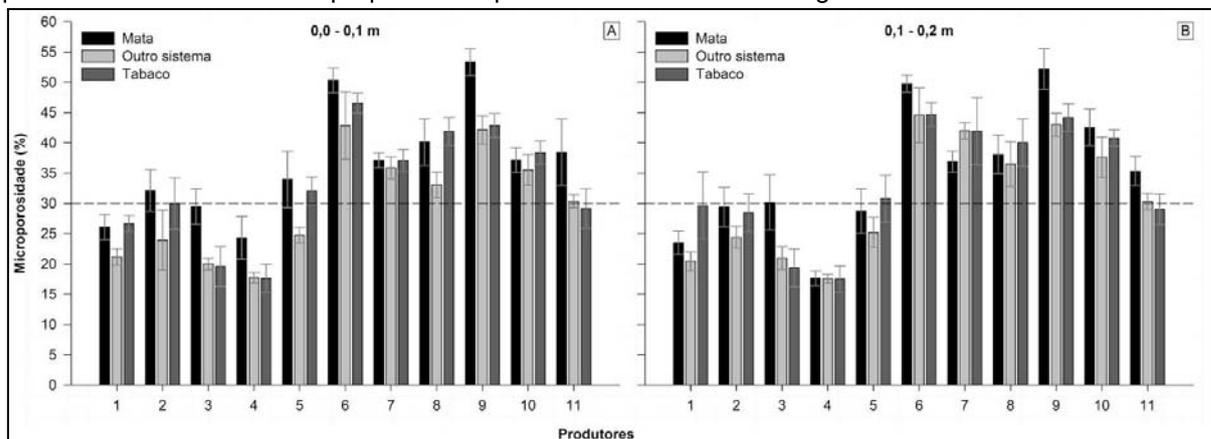
No que refere-se ao sistema Mata apresentou os maiores valores de macroporosidade, resultado de uma menor perturbação do solo, maior aporte de matéria orgânica e maior estabilidade de agregados, e somente a propriedade 9 apresentou valores médios inferiores ao limite, demonstrando que em certos cenários até mesmo áreas naturais podem apresentar tal limitação.

É possível identificar que o sistema Tabaco apresenta os menores valores quando comparados aos demais sistemas para ambas camadas, sobretudo nas propriedades 1, 2,3 e 4 caracterizadas em propriedades com preparo convencional, pouca cobertura vegetal e baixo nível de práticas conservacionistas. Frequentemente, estas áreas estão com valores próximos ao valor crítico ou até mesmo abaixo deste. Além disso, a Tabela 3 revela que os teores de MO no sistema tabaco costumam ser significativamente menores em relação à mata ou até mesmo a outros usos. Esse comportamento pode, também, estar ligado com o manejo intensivo do solo, revolvimento frequente ou demais fatores que promovem a degradação dos agregados, da estrutura e aumento da compactação do solo.

De acordo com Corsini (1993), o revolvimento intenso e continuado do solo afeta sua estrutura, provocando a oxidação progressiva da matéria orgânica, resultando em desagregação e fragmentação dos agregados. Esse efeito torna o solo mais vulnerável à erosão, favorecendo a remoção e transporte das partículas mais finas pelo escoamento superficial.

Os gráficos da Figura 8 apresentam os valores médios obtidos para a microporosidade dos três sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), duas camadas de profundidades e para as 11 propriedades.

Figura 8 - Distribuição dos valores médios e identificação do valor limite desejável para microporosidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.



Fonte: Autor

As propriedades 1, 2, 3 e 4 apresentaram valores inferiores ao limite pré estabelecido, para ambas as camadas e para os sistemas Outro sistema e Tabaco. Além do mais, a propriedade 11 também apresentou valores inferiores para o sistema Tabaco e muito próximos do limite para o Outro sistema. Pode-se observar que há uma distribuição relativamente estável para a Mata, ao longo do perfil de solo, enquanto que as variações para os solos cultivados são mais acentuadas.

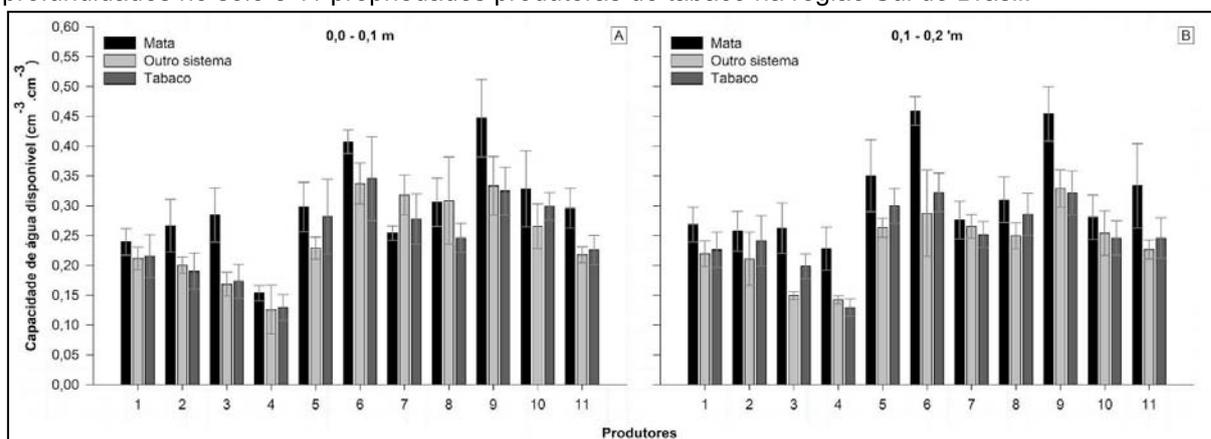
O sistema Mata apresentou valores mais elevados de microporosidade em comparação aos demais sistemas, o que pode ser explicado pelo maior aporte de matéria orgânica, conforme demonstrado na Tabela 3. Esse incremento na matéria orgânica favorece a estabilização dos agregados e a formação de microporos. Em contrapartida, o sistema de tabaco apresentou valores inferiores de microporosidade, mesmo em propriedades como 6, 8 e 9, onde os teores de matéria orgânica são relativamente mais elevados, reflexo de um manejo um pouco mais diversificado. Além disso, as propriedades 7, 8 e 9, que possuem teores de argila acima de 30% no sistema de tabaco, demonstram a manutenção de níveis razoáveis de microporosidade, especialmente quando há um aporte adequado de matéria orgânica e menor compactação do solo.

Os resultados apresentados na Figura 8 reforçam que os solos cultivados com sistemas agrícolas intensivos, tendem a apresentar piores condições estruturais, a menos que sejam conduzidos sob sistemas conservacionistas do solo. Assim sendo, tendem a reduzir a microporosidade, tornando-os menos resilientes e tornando os cultivos mais vulneráveis a situações de déficit hídrico.

A adoção de um manejo mais sustentável, com a adição abundante e diversificada de matéria orgânica, como é o caso do uso de plantas de cobertura, pode auxiliar as propriedades produtoras de Tabaco a mitigar esses impactos e por sua vez garantir uma melhora progressiva da estrutura do solo a médio e longo prazo.

A Figura 9 apresenta os gráficos dos valores médios das capacidades de água disponível (CAD) para as camadas de 0,0 - 0,1 m (A) e 0,01 - 0,2 m (B), 11 propriedades produtoras de tabaco e 3 sistemas de cultivo (mata, outro sistema e tabaco).

Figura 9 - Distribuição dos valores médios e identificação do fator limite desejável para capacidade de água disponível do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.



Fonte: Autor

A capacidade de água disponível (CAD) acompanhou de forma consistente a variação da microporosidade, corroborando os dados da correlação de Pearson apresentados na Figura 4. Evidenciando assim, a importância da manutenção de poros de tamanho médio e pequeno para a retenção de água em níveis acessíveis às plantas. No que diz respeito às camadas, observou-se que a CAD tende a ser maior na camada mais profunda quando comparada à superficial, o que fica ainda mais evidente ao se considerar os valores médios apresentados pelo sistema Mata como referência.

O sistema Mata apresentou, independentemente da camada, os maiores valores de CAD, pode-se correlacionar o fato com a maior presença de matéria orgânica e a maior estabilidade estrutural do solo. Em contraste, o outro sistema apresenta valores intermediários na grande maioria das propriedades, em ambas

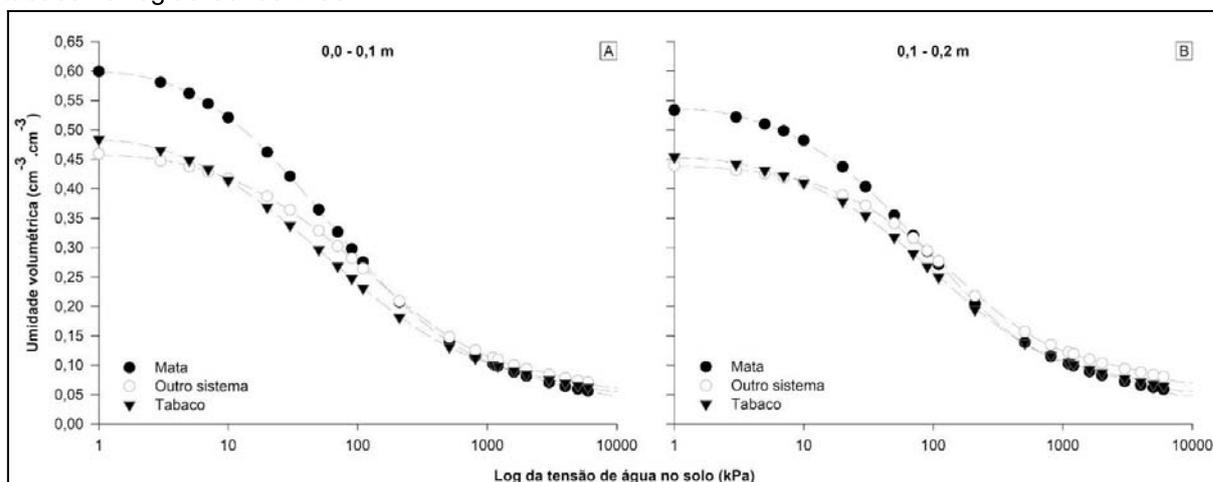
camadas analisadas. Contudo, os valores médios obtidos para o Tabaco são, de forma geral, menores. Evidencia-se que, ao cultivo de Tabaco, está atrelada a forma intensiva e reiterada de revolver o solo anualmente, além de trafegar para reconstruir os camalhões, fatos que têm um impacto negativo sobre a estrutura e retenção hídrica do solo.

Destaca-se, ainda, que as propriedades 7, 8 e 9, que apresentam teores de argila acima de 30% no sistema de Tabaco, demonstraram níveis razoáveis de CAD. Nesses casos, a presença de uma cobertura vegetal mais diversificada e um manejo relativamente melhor contribuíram para a conservação da microporosidade, mesmo sob o manejo intensivo. Além disso, a Propriedade 6, que se destaca pela maior diversificação de culturas e pelo uso de plantas de cobertura, manteve níveis elevados de microporosidade, refletindo diretamente em uma CAD superior.

O comportamento da CAD está de acordo com o comportamento apresentado na Figura 8 para a microporosidade. Assim sendo, as propriedades que demonstraram maiores valores de micro voltaram a apresentar maiores valores de cad. este fator está diretamente ligado com as questões de manejo e formação dos solos das regiões de estudo.

A Figura 10 apresenta as curvas características de retenção de água no solo estimadas pelo modelo van Genuchten, para os 3 diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) e para as camadas de 0,0 - 0,1 m (A) e 0,1 - 0,2 m (B). O gráfico expressa a quantidade de água disponível no solo sob a aplicação de diferentes tensões, onde no eixo x a variável representada é o logaritmo da tensão de água no solo (kPa), no eixo y está a umidade volumétrica ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ).

Figura 10 - Curvas características de retenção de água, em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco), diferentes profundidades no solo e para 11 propriedades produtoras de tabaco na região Sul do Brasil.



Fonte: Autor.

Evidencia-se com os resultados apresentados na Figura 10 que, independente da camada, os valores de CAD tendem a apresentar valores maiores para o sistema Mata, seguido pelo sistema Outro sistema e os valores inferiores estão ligados ao sistema Tabaco.

Na camada superficial (Fig. 10A), há uma variação mais acentuada entre os sistemas quando comparado à camada subjacente (Fig. 10B), também apresentando valores de umidade maiores para o potencial de 0 kPa. Em tensões maiores do que o limite de ponto de de murcha permanente as curvas tendem a ter o mesmo comportamento. Esse resultado, sugere que a cultura do Tabaco encontra condições menos favoráveis quando comparadas às demais no que refere-se a CAD.

Mello (2006) em seu estudo utilizando sete áreas cultivadas com tabaco na localidade de Cândido Brum, no município de Arvorezinha/RS, comparado com uma área de mata nativa como referência, observou que, em todas as camadas do solo, os valores de umidade retida foram menores nas áreas cultivadas com tabaco para os mesmos potenciais. Esses resultados corroboram com os achados do presente estudo, reforçando a influência do manejo agrícola sobre a retenção de água no solo.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da Análise de variância aplicada aos fatores de tratamento (mata, outro sistema e tabaco), avaliados em duas camadas (0,0 - 0,1 m e 0,01 a 0,2 m) para as variáveis: densidade ( $\text{g.dm}^{-3}$ ),

porosidade total (%), macroporosidade (%), microporosidade (%) e Capacidade de Água Disponível (CAD,  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ).

Tabela 4 - Análise de Variância (ANOVA) dos Fatores de Tratamento: Mata, Outro Sistema e Cultivo de Tabaco

Camada (m)	Densidade ( $\text{g}.\text{dm}^{-3}$ )	Porosidade total (%)	Macroporosidade (%)	Microporosidade (%)	CAD ( $\text{cm}^{-3}.\text{cm}^{-3}$ )
0,0 - 0,1	**	**	**	**	**
0,1 - 0,2	**	**	**	**	**

Teste F: \*\*Significante para  $p < 0,01$

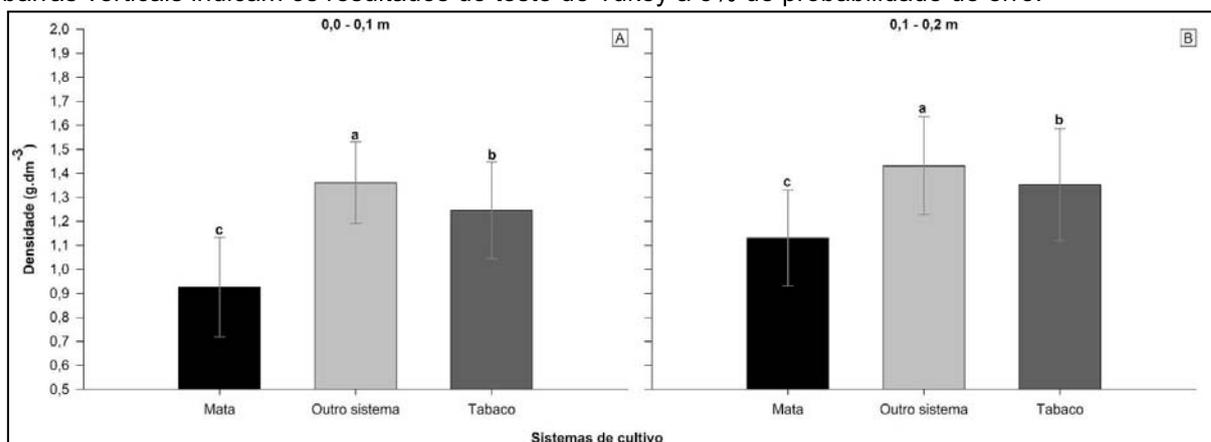
Para as duas profundidades e as variáveis analisadas, houveram diferenças significativas das médias (Teste F,  $p < 0,01$ ) para os tratamentos avaliados. Assim sendo, a análise de variância (ANOVA) evidencia que os sistemas de cultivo e respectivos manejos aplicados à produção de tabaco e outro sistema nas propriedades produtoras de tabaco na região sul do Brasil influenciam diretamente os atributos físico-hídricos do solo em relação à Mata.

Nunes (2017) em seu estudo realizado sobre a avaliação da qualidade do solo sob cultivo de tabaco para propriedades agrícolas familiares, identificou uma diferença significativa em relação às médias para todos dos indicadores físico hídricos (porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, diâmetro médio ponderado e resistência a penetração) comparando os valores obtidos por áreas cultivadas com tabaco e um valor de vegetação nativa como referência, corroborando com os dados do presente estudo.

Logo após a confirmação das diferenças significativas entre os sistemas de cultivo do solo, realizou-se uma análise pós-hoc utilizando o teste de Tukey a 5% de significância, para identificar de maneira exata quais os tratamentos apresentaram diferenças estatisticamente significativas, em cada variável analisada.

A Figura 11 apresenta as médias de densidade do solo por meio de gráficos de barras para os três sistemas de cultivo avaliados (Mata, Outro sistema e Tabaco) em duas camadas de profundidade 0,0 - 0,1 m (A) e 0,1 - 0,2 m (B).

Figura 11 - Densidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 m (A) e 0,1 - 0,2 m (B). Barras representam a média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil  $\pm$  os desvios padrões. Letras posicionadas sobre as barras verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



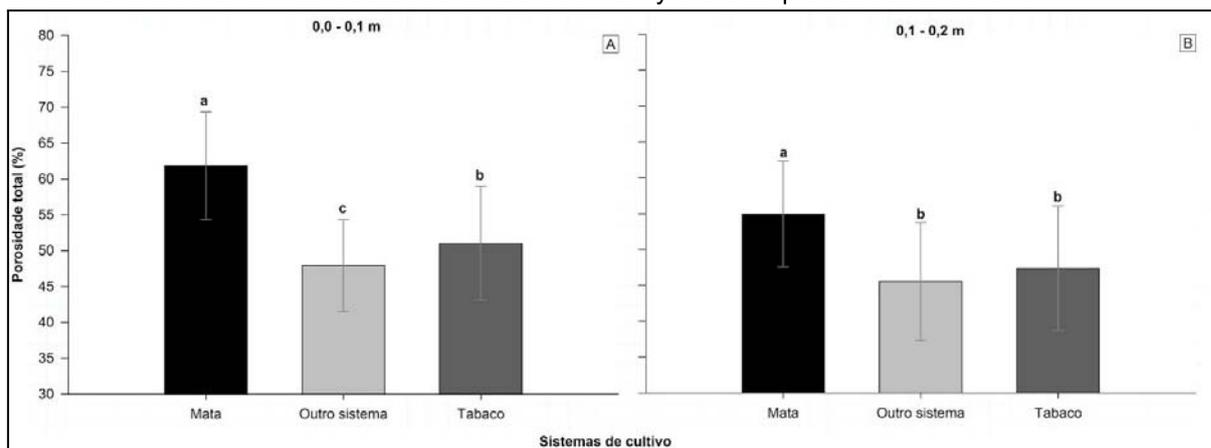
Fonte: Autor.

Os resultados do teste de Tukey, presentes na Figura 11, para as ambas camadas de solo em estudo, demonstram diferença estatisticamente significativa entre todos os tratamentos. Na camada superficial (0,0 - 0,1 m), o sistema denominado Outro sistema apresentou a maior densidade média ( $1,3606 \text{ g.dm}^{-3}$ ) destacando diferença significativa em relação aos demais tratamentos. O sistema Tabaco apresentou uma densidade média de  $1,2462 \text{ g.dm}^{-3}$ , também diferindo-se estatisticamente dos demais tratamentos, enquanto a Mata apresentou menor valor médio de densidade do solo. O comportamento descrito para a camada de 0,1 - 0,2 m manteve-se similar para a camada superficial. Portanto, de acordo com os resultados expostos acima, o manejo agrícola intensivo, caracterizado pelos sistemas Outro Sistema e Tabaco, contribui para a elevação significativa dos valores da densidade média na camada de 0 - 0,1 m para as 11 propriedades.

Audeh et al. (2011) em seu estudo para caracterização de solos de alta qualidade e baixa qualidade para produtores de tabaco verificou resultados médios de densidade muito semelhantes ao do presente estudo. Estudos, como de Matias et al. (2013) e Fontenele et al. (2009), corroboram com os resultados obtidos, onde os autores observaram valores inferiores de densidade do solo em solos sob mata nativa quando comparados a solos cultivados. De acordo com Lima et al. (2014) a identificação desse comportamento na análise pode estar diretamente correlacionado ao maior teor de matéria orgânica presente nessas áreas nativas, além do impacto do uso contínuo de maquinário agrícola na estrutura do solo.

A Figura 12 apresenta as médias da porosidade do solo por meio de gráficos de barras para os três sistemas de cultivo avaliados (Mata, Outro sistema e Tabaco) em duas camadas de profundidade 0,0 - 0,1 m (A) e 0,1 - 0,2 m (B).

Figura 12 - Porosidade total do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. As barras representam a média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil  $\pm$  os desvios padrões. Letras posicionadas sobre as barras verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



Fonte: Autor.

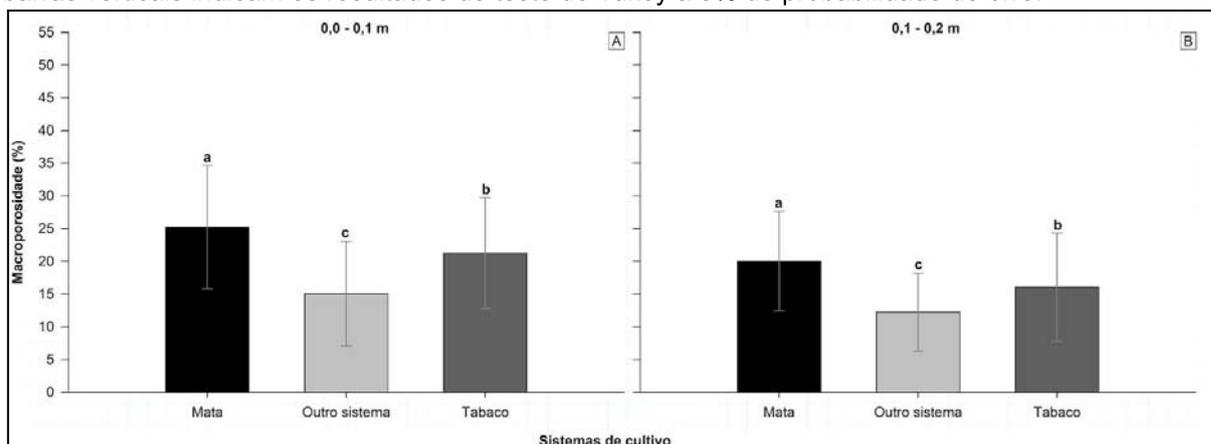
Ao analisar a porosidade média do solo para as 11 propriedades, evidencia-se a existência de diferenças significativas entre os sistemas para ambas camadas do solo. Na camada superficial (0,0 - 0,01 m) a Mata apresentou os maiores valores de porosidade total média, diferenciando-se significativamente dos demais sistemas. O solo sob o cultivo do tabaco apresentou valores intermediários, significativamente inferiores ao valor da Mata e significativamente superior ao Outro sistema. Entretanto, na camada mais profunda (0,1 - 0,2 m) apenas a mata manteve valores significativamente superiores, enquanto os demais sistemas não apresentaram diferenças estatísticas entre si. Desta forma, esses resultados sugerem que o manejo agrícola impacta negativamente a estrutura do solo, reduzindo a porosidade total, especialmente na camada superficial, e alteram a estrutura do solo, podendo comprometer sua qualidade física a longo prazo.

Luciano et. al, (2010) em seu estudo evidenciou que o uso do solo influenciou significativamente a porosidade do solo em todas as camadas analisadas, quando comparado à mata natural.

A Figura 13 ilustra a distribuição da macroporosidade média do solo por meio de gráficos de barras para os três sistemas de cultivo avaliados (Mata, Outro

sistema e Tabaco) em duas camadas de profundidade 0,0 - 0,1 m (A) e 0,1 - 0,2 m (B).

Figura 13 - Macroporosidade do solo em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. Barras representam a média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil  $\pm$  os desvios padrões. Letras posicionadas sobre as barras verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



Fonte: Autor.

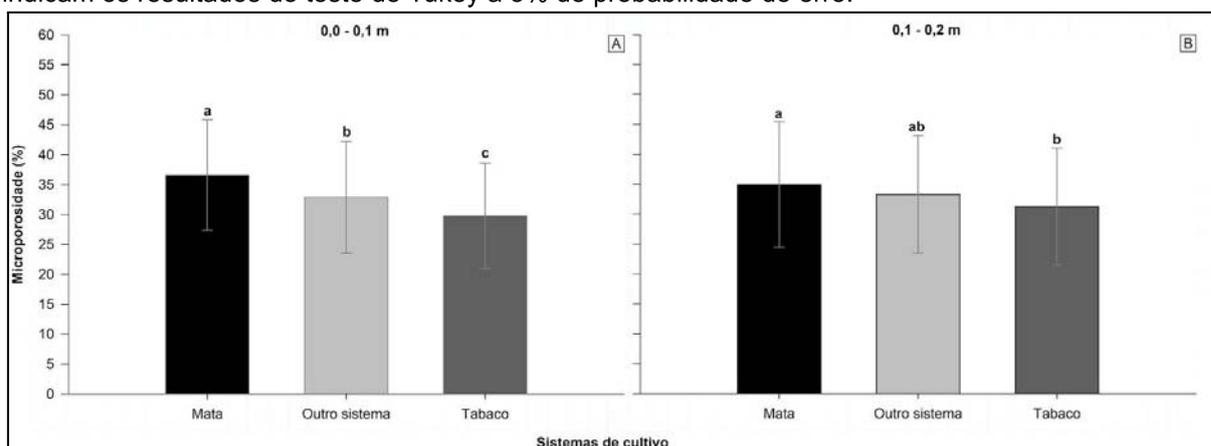
Nota-se que o comportamento da macroporosidade segue um comportamento semelhante ao da porosidade total, sendo influenciada diretamente pelo sistema de manejo do solo. Na camada de 0,0 - 0,1 m, novamente, a Mata volta a apresentar os maiores valores médios, sendo estatisticamente superior aos demais sistemas. Por sua vez, o sistema Tabaco e o Outro sistema demonstraram menores valores médios para propriedade em estudo. A análise da camada mais profunda, revela o mesmo comportamento da camada superficial. Desta maneira, caracteriza-se uma diminuição significativa no que diz respeito a macroporosidade nas camadas aráveis do solo com o cultivo tradicional, seja do tabaco ou de outros sistemas. Os resultados expostos na Figura 13 corroboram com os resultados obtidos na Figura 10, onde a densidade foi impactada diretamente e o outro sistema apresentou valores médios superiores aos demais. Evidencia-se a relação inversa entre a densidade e a macroporosidade, demonstra-se que os solos sob o cultivo do outro sistema tendem a ter uma redução dos poros responsáveis pelo armazenamento e movimentação de água, tornando-os mais suscetíveis à geração de escoamento superficial direto e, possivelmente, à erosão do solo.

Mello (2006) realizou um estudo em sete áreas cultivadas com tabaco na localidade de Cândido Brum, no município de Arvorezinha/RS, comparado com uma área de mata nativa como referência. Os resultados indicaram um efeito significativo

sobre a microporosidade do solo nas áreas cultivadas, quando comparadas à mata nativa. A análise estatística por meio do teste de Tukey revelou diferenças médias estatísticas em todas as camadas do solo para seis das áreas avaliadas. A única exceção foi a área onde o cultivo do tabaco havia sido implementado há apenas dois anos sob o sistema tradicional, a qual não apresentou diferença média significativa em relação à mata nativa.

A Figura 14 exibe, em gráficos de barras, a microporosidade média do solo para os três sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) nas profundidades de 0,0 - 0,1 m (A) e 0,1 - 0,2 m (B).

Figura 14 - Microporosidade em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. Barras representam média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil,  $\pm$  os desvios padrões. Letras posicionadas sobre as linhas verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



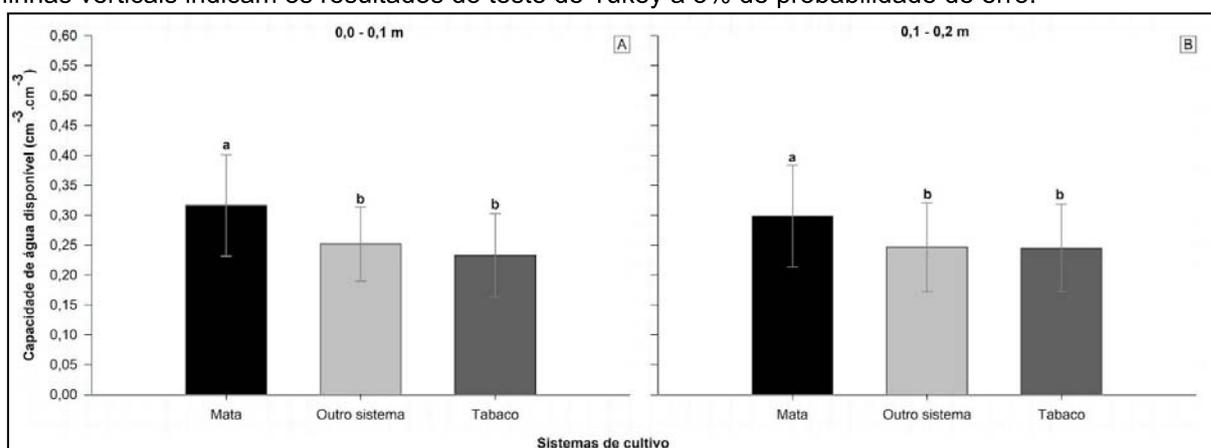
Fonte: Autor.

Tal como os resultados obtidos anteriormente para densidade, porosidade total e microporosidade, houve diferença significativa entre os sistemas de manejo para a microporosidade do solo. Na camada de 0,0 a 0,1 m, a Mata mais uma vez destaca-se com valores significativamente maiores no que diz respeito aos demais sistemas (Outro sistema e Tabaco). Em contrapartida, na camada de 0,1 - 0,2 m a Mata diferenciou-se significativamente somente do sistema Tabaco, que por sua vez não teve diferença significativa do Outro sistema. Do mesmo modo, nota-se que na camada mais profunda as diferenças foram menores e na camada superficial ela é mais acentuada. Os resultados indicam que os manejos agrícolas reduzem a microporosidade em comparação à Mata, sobretudo no caso do Tabaco, que apresentou os menores valores em ambas as camadas.

Os achados do presente estudo corroboram os resultados de Nunes (2017), que também identificou uma redução significativa da microporosidade em áreas cultivadas com tabaco, utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A Figura 15 explicita os valores médios da capacidade de água disponível (CAD) do solo para os sistemas de cultivo Mata, Outro sistema e Tabaco, avaliados em duas faixas de profundidade: 0,0 - 0,1 m (A) e 0,1 - 0,2 m (B).

Figura 15 - Capacidade de água disponível em diferentes sistemas de cultivo (Mata, Outro sistema e Tabaco) para camadas de 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. Barras representam a média de cada sistema para 11 produtores de tabaco da região Sul do Brasil  $\pm$  desvios padrões. Letras posicionadas sobre as linhas verticais indicam os resultados do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



Fonte: Autor.

Os resultados do Teste de Tukey para a capacidade de água disponível (CAD) presentes na Figura 15 vão de encontro aos resultados apresentados para a densidade, porosidade total e microporosidade.

Na análise da capacidade de água disponível (CAD), os resultados do teste de Tukey corroboram os achados obtidos para a densidade, porosidade total e microporosidade. A Mata, que apresentou os melhores índices nesses parâmetros, foi classificada com a letra "a", destacando-se significativamente dos sistemas cultivados. Em contrapartida, tanto o Tabaco quanto o Outro sistema foram agrupados na mesma categoria, com a classificação "b", evidenciando a ausência de diferenças estatísticas entre eles. Assim, mediante a maior compactação do solo nas áreas cultivadas e também da redução da porosidade, estão diretamente associadas à diminuição da capacidade de água disponível (CAD).

Os resultados de Mello (2006) indicaram que a capacidade de retenção média de água no solo nas áreas cultivadas com tabaco foi superior e estatisticamente diferente, a um nível de significância de 5%, em relação à mata nativa. Esses

achados contrastam com os resultados esperados e com os obtidos no presente estudo, que apontaram uma menor retenção de umidade nas áreas cultivadas.

### **3.4. Considerações finais**

Este trabalho realizou um diagnóstico de atributos físico-hídricos do solo de 11 propriedades envolvidas na produção de tabaco no Sul do Brasil. Os resultados obtidos para a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, e capacidade de água disponível evidenciam a influência dos diferentes sistemas de cultivos sobre, tanto frente aos valores obtidos para a Mata nativa, quanto em relação aos e limites críticos estabelecidos pela literatura.

Avaliou-se também a performance do modelo de van Genuchten, que foi eficaz e robusto na estimativa do conteúdo volumétrico de água do solo.

De modo geral, demonstra-se que a densidade do solo tende a ser maior, enquanto a porosidade total do solo tende a ser menor nos sistemas agrícolas, quando comparados com a vegetação nativa (Mata) e os valores de referência da literatura, indicando um efeito negativo do manejo tradicional sobre as estruturas do solo. Revela-se com o presente estudo uma redução da macroporosidade e microporosidade do solo, trazendo efeitos negativos no que diz respeito a infiltração, aeração, retenção hídrica e a resiliência do solo em períodos de déficit hídrico.

Em relação aos sistemas de uso do solo, verifica-se que o manejo agrícola intensivo, em especial o revolvimento anual adotado para o Tabaco, impacta negativamente e resulta em redução do volume e da estrutura de poros e consequentemente da qualidade estrutural do solo quando comparado à área sob vegetação nativa (Mata). Houve também uma redução na capacidade do solo em armazenar água disponível para as plantas, podendo gerar uma menor sustentabilidade do sistema produtivo. As curvas características de retenção de água no solo para os sistemas produtivos corroboram com esses resultados, especialmente na camada de 0,0 - 0,1 m, onde os impactos das práticas agrícolas foram mais evidentes. O cultivo intensivo do solo sob Tabaco atenua a disponibilidade hídrica para as plantas, o que pode ser um fator crucial para produtividade, especialmente considerando o cenário atual de baixa adoção de sistemas de irrigação nas áreas de estudo.

Finalmente, esse trabalho revela e reforça a necessidade de adotar práticas de manejo agrícolas sustentáveis, especialmente no sistema Tabaco, buscando a

preservação da qualidade do solo. A implementação de estratégias como a perenização dos camalhões (migrando do preparo convencional para o cultivo mínimo ou plantio direto), a rotação e sucessão de culturas, a diversificação da cobertura vegetal com o uso de mix de plantas de cobertura, a adição mais frequente e mais abundante de matéria orgânica, além de correções das eventuais deficiências químicas no solo podem promover melhorias significativas na qualidade físico-hídrica do solo a médio e longo prazo, contribuindo para o aumento do nível de sustentabilidade da produção agrícola nas propriedades envolvidas com o cultivo de tabaco no Sul do Brasil.

## **4. Capítulo 2 - Avaliação dos Efeitos das Boas Práticas Agrícolas sobre a Qualidade do Solo em uma Propriedade Produtora de Tabaco na Região Sul do Brasil.**

### **4.1. Introdução**

No Brasil, a produção de tabaco destaca-se com notoriedade como uma atividade agrícola de grande relevância e impacto socioeconômico, posicionando o país como o segundo maior produtor mundial, com a Região sul concentrando a maior parcela dessa produção (FAO, 2016; SINDITABACO, 2023).

Dados do IBGE, 2022 apontam que, apenas no Rio Grande do Sul, a cultura no ano de 2022 teve uma produção superior a 4 bilhões de reais, 294 mil toneladas de tabaco, referentes a 149.149 hectares de tabaco cultivadas, totalizando 51.508 propriedades envolvidas durante todo o processo da cadeia produtiva. As restrições decorrentes da degradação do solo desse modelo de agricultura incluem erosão do solo, degradação dos recursos naturais e da produtividade (Reichert et.al., 2019).

No Brasil, a grande maioria dos produtores não adota práticas de conservação do solo, resultando em degradação físico-química significativa (THOMAZ; ANTONELI, 2022). A adoção de boas práticas agrícolas se mostra uma alternativa para a recuperação da qualidade do solo, especialmente em um contexto onde a saúde do solo é vital para a produção sustentável de alimentos, conforme apontado pela FAO (2022).

Destaca-se entre as práticas sustentáveis os seus princípios: i) minimizar a perturbação do solo, (ii) maximizar a cobertura do solo e (iii) diversificar as espécies de cultivo em um campo (FAO, 2016). Yang et al. (2020) evidenciam que essas técnicas protegem os solos da degradação, reduzem a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e melhoram a resiliência ecológica.

A atividade produtiva de tabaco no Sul do Brasil tem se mantido como uma relevante alternativa de renda e manutenção de famílias no ambiente rural. Paralelamente, hipotetiza-se que somente através da migração de sistemas de preparo convencional, que adotam o revolvimento anual intensivo e continuado do solo, para sistemas com o mínimo revolvimento e cobertura vegetal permanente do solo, será possível promover a sustentabilidade da produção agrícola para as gerações atuais e futuras.

O objetivo deste estudo é avaliar a influência da adoção de boas práticas agrícolas (BPAs) sobre a qualidade do solo e seus diferentes usos (tabaco e outro sistema) através da avaliação de atributos-chave da qualidade física e hídrica do solo em uma propriedade produtora de tabaco na Região Sul do Brasil.

## 4.2. Materiais e métodos

### 4.2.1. Área de estudo e histórico de utilização

A área de estudo compreende uma propriedade rural situada no município de Pelotas/RS (Figura 16), sendo esta caracterizada pela adoção de usos do solo e de práticas diversificadas de produção agrícola de base familiar, incluindo a produção de leite, milho para grãos, milho-silagem e tabaco. Ademais, são cultivadas diversas hortaliças e frutíferas, além de carne e ovos para autoconsumo.

Figura 16 - Mapa de localização da propriedade em estudo e das áreas da propriedade onde foram realizadas as coletas de amostras de solo.



Fonte: Autor.

Este estudo integra o Projeto AUERA – Desenvolvimento e Avaliação de Modelos de Sustentabilidade de Propriedades Produtoras de Tabaco no Sul do

Brasil, realizado em parceria entre a Embrapa e a Philip Morris Brasil. O estudo iniciou no ano de 2022 e estendeu-se até outubro de 2024. Historicamente, o manejo agrícola nessas áreas tem sido amplamente caracterizado pela aplicação do sistema de cultivo e preparo convencional, marcado por práticas de revolvimento intenso e continuado do solo. Este sistema apresenta desvantagens importantes, como a redução do índice de cobertura vegetal da superfície, a exposição do solo à ação das chuvas, com impacto direto das gotas e ampliação do coeficiente de escoamento superficial, o aumento da suscetibilidade à erosão hídrica, perda de matéria orgânica e frequentemente sem correção do pH (valores abaixo de 6,0). Adicionalmente, quando cultivadas com tabaco nessas áreas, realizava-se a construção de camalhões sem equipamentos topográficos, ou com ferramenta similar, resultando em alocação em desnível acentuado ao longo de seu comprimento. Ademais, antes do revolvimento anual com arado de discos e conformação dos camalhões, costuma-se realizar a subsolagem da área anteriormente ao início do estudo.

A intervenção abrangeu a implementação das seguintes Boas Práticas Agrícolas (BPAs) em ambas as áreas: a) correção da acidez do solo, por meio da aplicação de calcário para ajustar o pH a 6,0, valor ideal para o cultivo do tabaco; b) construção de um terraço destinado ao controle de enxurradas; e c) semeadura de um mix de plantas de cobertura de inverno em metade da área e cultivo de aveia-preta na outra metade, como estratégia de aumento da cobertura vegetal e adição de matéria orgânica ao solo.

A correção da acidez foi realizada após a colheita do milho (em 26/05/2023), com a aplicação de 11 toneladas por hectare de calcário calcítico (com PRNT de 54,9%), incorporado ao solo até 40 cm de profundidade utilizando subsolador e grade. A escolha do tipo e da quantidade de calcário seguiu as diretrizes estabelecidas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2016).

Considerando a declividade da área, foi implementado um terraço na região central da área de estudo, com a finalidade de reduzir a extensão da rampa de declividade e minimizar os riscos de erosão hídrica. Após a aplicação do calcário, realizou-se a semeadura do mix de sementes (Raíx© - RX 330), composto por aveia-preta, centeio e duas cultivares de ervilhaca, em metade da área em 30/05/2023, com a aplicação de 100 kg/ha antes da construção dos camalhões e 50

kg/ha em cobertura, diretamente sobre os camalhões. Na outra metade, foi semeada aveia-preta solteira, conforme o manejo usual do produtor, na dose de 80 kg/ha.

O estudo teve como objetivo inicial comparar a adoção de intervenções propostas pela pesquisa (calagem, controle de enxurrada e uso do mix de plantas de cobertura) com o manejo tradicionalmente utilizado por grande parte dos produtores de tabaco na região. Entretanto, optou-se por utilizar como referência o sistema padrão do produtor, que consistiu na realização da calagem associada ao cultivo de aveia-preta como cobertura do solo. Esse sistema representa um estágio intermediário de adoção de boas práticas agrícolas. Embora esse manejo indique um avanço significativo em relação ao histórico da área, não foi possível realizar a comparação direta com o manejo antecedente, já que a aveia-preta proporciona benefícios relevantes ao sistema de produção, os quais não faziam parte das práticas históricas adotadas pelo agricultor.

#### **4.2.2. Coleta e tratamento das amostras de solo**

Para representar de forma sistemática as etapas de coleta e tratamento dos dados deste estudo, apresenta-se o fluxograma da Figura 17. O diagrama detalha o processo metodológico adotado, abrangendo desde a seleção das propriedades, estratificação das camadas do solo e definição das repetições, até a coleta das amostras de solo (deformadas e indeformadas) e a posterior análise dos parâmetros físico-hídricos em laboratório.



Clima Temperado, e todas as análises físicas do solo seguiram as metodologias constantes no Manual de Métodos de Análises de Solo Teixeira (2017).

As coletas de amostras deformadas e indeformadas de solos foram realizadas em dois momentos, Coleta 01 e Coleta 02. Ressalta-se que a 2ª Coleta foi realizada logo após a realização de um ciclo de cultivo de tabaco na propriedade.

Dentro da propriedade, foram utilizados para o diagnóstico dos sistemas de uso do solo: Tabaco (área de produção atual de tabaco na propriedade), Outro Sistema (utilizado como fonte de renda adicional na propriedade). Em cada sistema, foram realizadas coletas em quatro pontos amostrais (repetições) e em duas camadas de solo, de 0-0,1m a 0,1 a 0,2m, sendo que, para cada repetição, foram coletadas três amostras para a Coleta 01 e duas amostras para a Coleta 02. As camadas amostradas foram escolhidas com base em sua suscetibilidade a mudanças físicas e hídricas decorrentes do preparo do solo e da atividade do sistema radicular das culturas cultivadas ao longo do tempo. Ao final totalizaram-se 160 amostras de solo indeformado e 80 amostras de solo deformado.

As amostras com estrutura preservada foram coletadas utilizando anéis volumétricos cilíndricos de aço de 4,8 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura. Para determinação da curva de retenção de água no solo, as amostras foram inicialmente saturadas por 48 horas ( $\Psi_m = 0$  kPa) e posteriormente quantificada a massa saturada. Em seguida, submetidas a tensões de 6 kPa em uma mesa de tensão, e a tensões de 10 e 33 kPa em uma câmara de pressão de Richards.

Para as amostras de solo com estrutura não preservada, foi realizada a coleta utilizando o trado convencional e para determinação do potencial matricial foi medido utilizando um potenciômetro de ponto de orvalho modelo WP4C da METER Group, visando obter leituras precisas para  $\Psi_m$  superiores a 300 kPa. Dessa forma, os valores de conteúdo gravimétrico de água foram obtidos em base de massa e, posteriormente, convertidos em conteúdo volumétrico de água, multiplicando-se o conteúdo gravimétrico pela densidade do solo.

Os dados experimentais de  $\Psi_m$  (kPa) em relação ao conteúdo volumétrico de água ( $\theta$  m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) foram ajustados para a obtenção das curvas de retenção de água no solo (SWRC) por meio da combinação dos três métodos, utilizando o software SWRC Fit (SEKI et al., 2023), totalizando 180 Curvas de retenção de água no solo.

Os parâmetros empíricos  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  foram obtidos e utilizados para ajustar as curvas de retenção de água, conforme o modelo proposto por van

Genuchten (1980). Os conteúdos de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) a 33 kPa e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) a 1500 kPa foram determinados através desse modelo. A capacidade de água disponível (CAD) foi calculada como a diferença entre esses dois parâmetros.

#### **4.2.3. Análises estatísticas**

O desempenho estatístico do ajuste entre os conteúdos volumétricos de água observados e estimados pelo modelo de van Genuchten foi avaliado utilizando estatísticas como Erro Quadrático Médio (MSE), Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio (ME) e Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ). Essas análises foram realizadas no software R.

Em seguida, a presença de valores discrepantes foi investigada por meio de análise de boxplots. A análise da normalidade de distribuição dos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, considerando um nível de significância de 0,05, também no software R.

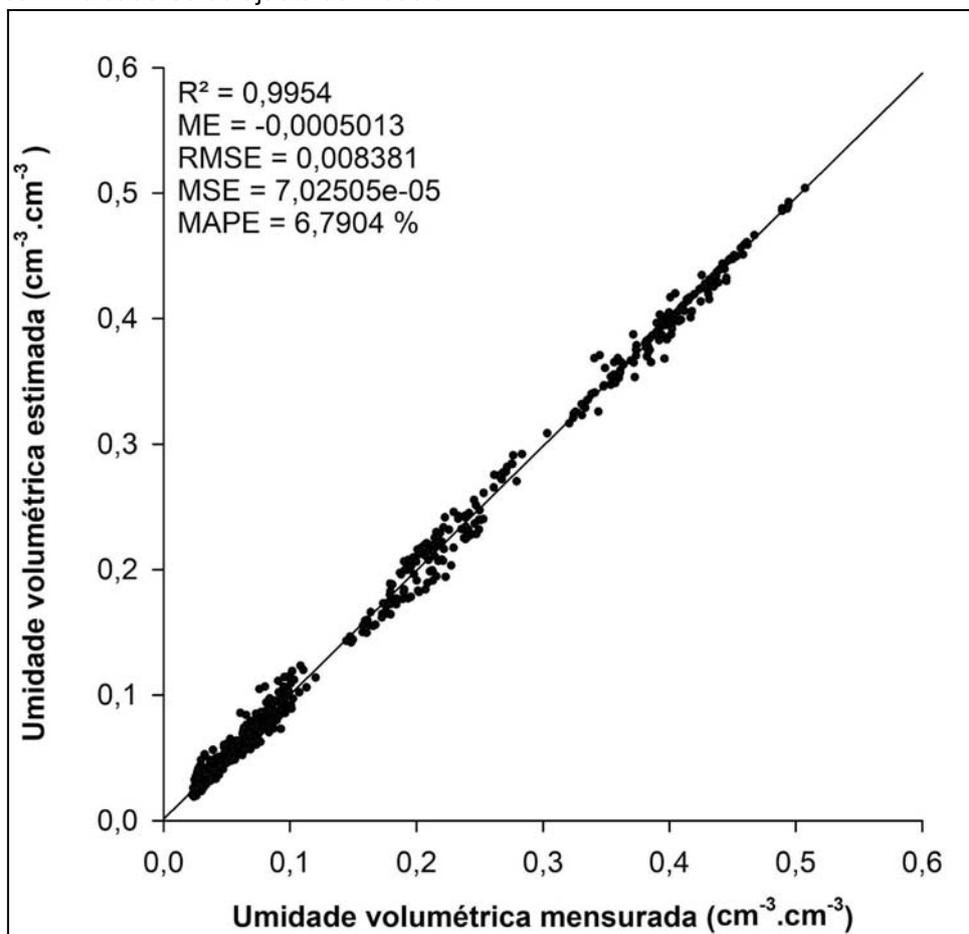
Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, havendo efeito de tratamento, ao teste de comparações múltiplas de Tukey, utilizando o software estatístico SigmaPlot.

Utilizou-se a correlação de Pearson para quantificar e avaliar relações lineares entre as variáveis. O coeficiente resultante varia de -1 a +1, indicando uma correlação mais forte quanto mais próximo estiver dos extremos. Valores negativos representam uma relação inversa, enquanto positivos indicam uma associação direta. Já coeficientes próximos de zero sugerem uma correlação fraca ou inexistente (Sousa, 2019).

#### **4.3. Resultados e discussão**

A Figura 18 apresenta um gráfico de dispersão com linha de regressão, da relação entre os valores estimados pelo modelo de van Genuchten e mensurados experimentalmente. Os pontos no gráfico representam as observações individuais, enquanto que a linha de regressão apresenta de forma visual a tendência entre os dados. Além disso, são apresentados os índices estatísticos que permitem avaliar a adequação e aplicabilidade do modelo.

Figura 18 - Relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo, estimado pelo modelo de van Genuchten e os valores mensurados experimentalmente para uma propriedade produtora de tabaco, com indicadores de ajuste do modelo.



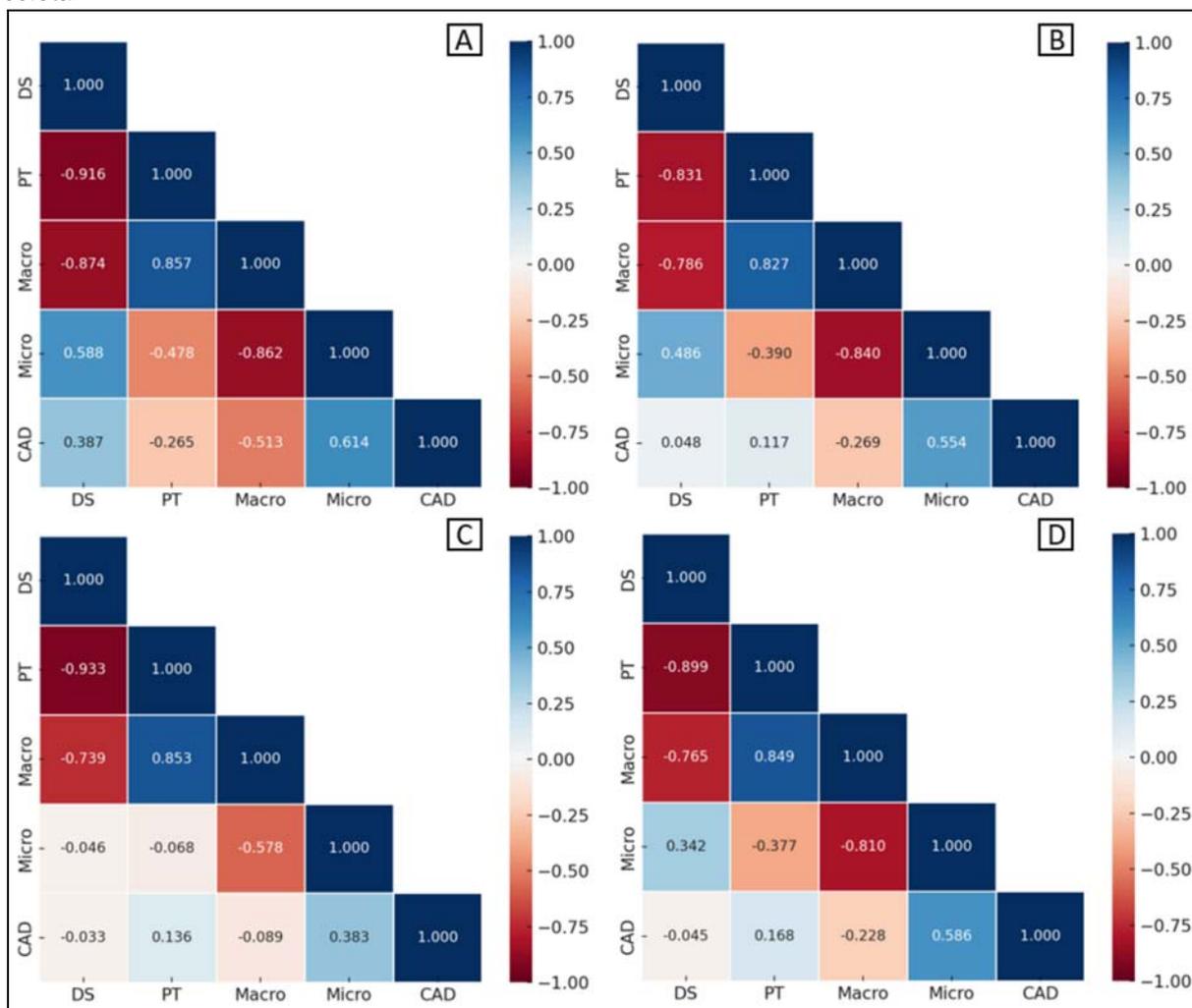
Fonte: Autor.

O elevado coeficiente de Determinação ( $R^2 = 0,9954$ ) indica que 99,54% da variação dos dados experimentais são explicados pelo modelo, demonstrando uma forte correlação entre os valores estimados e mensurados. Os valores de Erro Quadrático Médio ( $MSE = 7,02505 \cdot 10^{-5}$ ) e da Raiz do Erro Quadrático Médio ( $RMSE = 0,008381$ ) demonstram que as discrepâncias entre os valores estimados e os observados são mínimos. Além disso, o Erro Médio ( $ME = -0,0005013$ ) e o Erro Absoluto Percentual Médio ( $MAPE = 6,7904\%$ ) confirmam que o erro médio de previsão é baixo. Os resultados dos índices combinados indicam que o modelo de Van Genuchten apresentou um excelente ajuste para estimativa do conteúdo volumétrico de água independente do cultivo e da camada observada.

A Figura 19 apresenta uma matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros físico-hídricos do solo obtidos nas coletas realizadas. No gráfico, cada

célula exibe o coeficiente de correlação entre dois parâmetros, permitindo identificar visualmente as relações diretas e inversas entre eles.

Figura 19 - Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros físico-hídricos do solo. Os diagramas (A) e (B) correspondem às profundidades de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m, respectivamente, da primeira coleta. Os diagramas (C) e (D) representam as mesmas profundidades para a segunda coleta



Fonte: Autor.

Observa-se uma forte correlação forte e negativa entre a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade. Evidenciando que o aumento da compactação resulta na diminuição dos espaços porosos. Em contrapartida, a microporosidade (Micro) demonstra uma correlação positiva com a capacidade de água disponível (CAD), reforçando seu papel fundamental na retenção hídrica.

A Tabela 5, apresenta os valores dos resultados da análise de variância (ANOVA) aplicada aos fatores experimentais “Coleta” e “Sistema de manejo”, bem como a interação entre os fatores, avaliados em duas camadas (0,0 - 0,1 m e 0,01 a

0,2 m) e aplicados aos atributos físico-hídricos do solo: densidade ( $\text{g.dm}^{-3}$ ), porosidade total (%), macroporosidade (%), microporosidade (%) e Capacidade de Água Disponível (CAD,  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ).

Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) dos fatores experimentais do tratamento: a) Coleta e b) Sistema de manejo e c) interação entre Coleta x Sistemas de manejo

Camada (m)	Fonte de variação experimental	Atributos do solo				
		Ds ( $\text{g.dm}^{-3}$ )	Pt (%)	Macro (%)	Micro (%)	CAD ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ )
	Coleta	NS	NS	NS	NS	**
0,0 - 0,1	Sistema de manejo	NS	NS	NS	*	NS
	Coleta x Sistema de manejo	*	*	*	NS	NS
	Coleta	NS	NS	NS	**	*
0,1 - 0,2	Sistema de manejo	NS	NS	*	**	*
	Coleta x Sistema de manejo	NS	NS	NS	NS	NS

Ds: Densidade do solo; Pt: Porosidade total; Macro: Macroporosidade; Micro: Microporosidade; CAD: Capacidade de água disponível; Teste F: \*Significante para  $p < 0,05$ ; \*\*Significante para  $p < 0,01$ ; NS não significativa para  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ .

Na camada superficial (0,0 - 0,1 m) o fator “Coleta” influenciou significativamente somente a capacidade de água disponível (CAD) para um  $p < 0,01$ , indicando assim, que o tempo de coleta pode interferir nos resultados obtidos para a CAD. O fator “Sistema de manejo” teve efeito significativo sobre somente a microporosidade. Além do mais, a interação entre os fatores “Coleta x Sistema de manejo” revelou impactar significativamente sobre a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade.

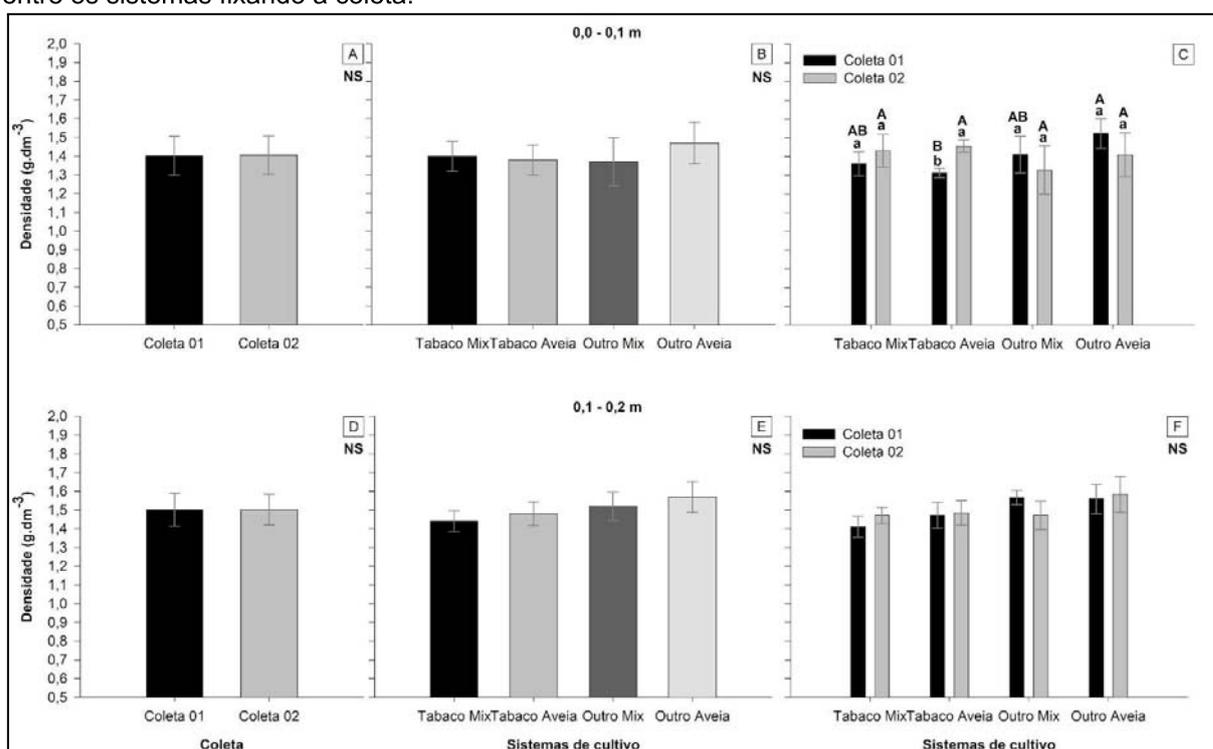
Para a camada de 0,1 - 0,2 m, a interação entre os fatores não teve efeito significativo sobre nenhum atributo físico hídrico do solo. Em contrapartida, o fator “Sistema de manejo” teve efeito significativo considerando um  $p < 0,01$  para a microporosidade e considerando um  $p < 0,05$  para a macroporosidade e capacidade de água disponível. O fator “coleta” teve efeito significativo para a microporosidade ( $p < 0,01$ ) e capacidade de água disponível ( $p < 0,05$ ).

Reichert et al. (2019) destaca que o preparo intensivo do solo e a realização da sulcagem, antes do transplante das mudas de tabaco e, posteriormente, favorecem a degradação do solo e o aumento das perdas de solo e água. Sistemas de manejo conservacionista para o cultivo do tabaco, incluindo o uso de culturas de

cobertura de inverno, como aveia preta e mobilização mínima do solo para construção e manutenção de sulcos, tornam-se alternativas indicadas para redução drástica nas perdas de solo e água.

A Figura 20 explicita os valores médios da densidade do solo para os sistemas de cultivo Outro sistema e Tabaco, com a implementação de dois cenários de plantas de cobertura e boas práticas agrícolas, avaliados para as profundidades 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. No gráfico, as barras correspondem às médias dos valores, acompanhadas por linhas verticais que representam os respectivos desvios padrões.

Figura 20 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para  $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta.



Fonte: Autor.

De acordo com os resultados expostos na Figura 20a e 20b, os fatores coleta (Coleta 01 e Coleta 02) e Sistemas de cultivo (Tabaco Mix, Tabaco Aveia, Outro Mix e Outro Aveia), analisados isoladamente não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ( $p > 0,05$ ) na densidade do solo. Contudo, a interação

entre os fatores, Figura 19c, (Coleta x Sistema de cultivo) apresentou diferença significativa indicado pelas letras minúsculas e maiúsculas.

Ao comparar os dados médios para cada sistema entre as coletas, somente o sistema Tabaco Aveia demonstrou diferença significativa, sendo a Coleta 01 inferior à Coleta 02. Por sua vez, ao fixar a coleta e comparar os sistemas, constatou-se que, na Coleta 01, o sistema Outro Sistema Aveia (A) apresentou diferença significativa em relação ao Tabaco Aveia (B), contudo não apresentou diferença significativa dos outros dois sistemas. Todavia, o sistema Tabaco Mix (AB) e Outro sistema Mix (AB) não obtiveram diferença significativa do sistema Tabaco Aveia. Na Coleta 02, não foram encontradas diferenças significativas entre os sistemas.

Os resultados indicam que embora os efeitos isolados dos fatores (tempo de coleta e sistema de manejo) sejam determinantes, a interação entre os dois influencia significativamente a densidade do solo para a camada 0,0 - 0,1 m. Assim dizendo, a ausência de diferença significativa significa indica, no geral, que a densidade do solo para a camada em questão não se alterou nem ao longo do tempo e nem com a implementação de um sistema específico. Desta forma, demonstra-se a importância de considerar o tempo de amostragem e o manejo agrícola para uma compreensão mais assertiva do solo com um todo.

Na Figura 20, referente aos valores de densidade do solo para a camada de 0,1 - 0,2 m, verificou-se que os tratamentos Coleta (Coleta 01 e Coleta 02) e Sistemas de cultivo (Tabaco Mix, Tabaco Aveia, Outro Mix e Outro Aveia), analisados independentemente, bem como a interação entre eles não apresentaram diferenças estatisticamente significativas na densidade do solo (Figuras 20d, 20e e 20f).

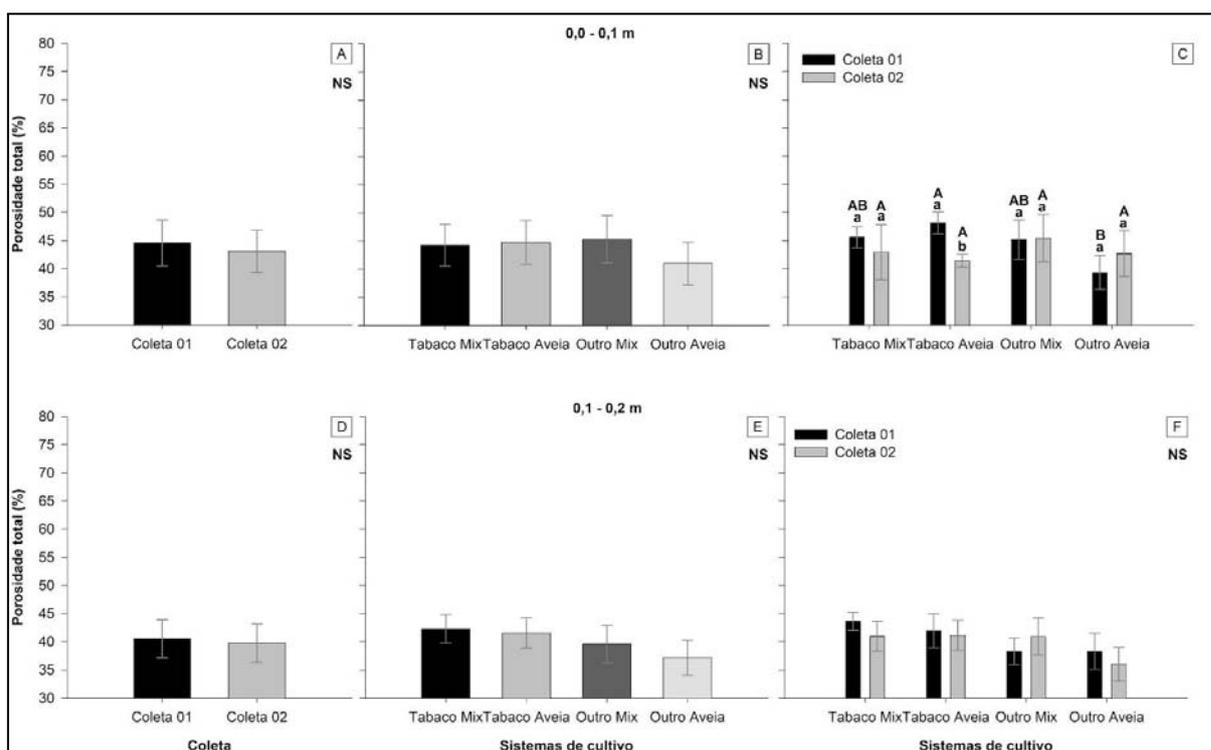
Esses resultados contrastam com os resultados obtidos para a camada superficial. A ausência de diferença significativa na camada mais profunda pode ser relacionada com o sistema de manejo e as variações na cobertura vegetal impactam mais o estrato superficial do solo.

O estudo realizado por Lima et al. (2014) investigou as características físico-hídricas de um Latossolo Amarelo em duas condições: uma área cultivada e outra sob vegetação nativa. Os resultados apontaram que a densidade do solo (DS) foi significativamente maior no solo cultivado, independentemente da profundidade analisada. Segundo Góes et al. (2005), a menor estabilidade estrutural dos solos cultivados resulta do revolvimento frequente e da menor adição e permanência de carbono orgânico ao sistema.

Olivet et al. (2014), em seu estudo avaliou três sistemas de preparo do solo para o cultivo de tabaco na província de Granma, Cuba, com o objetivo de melhorar as condições do solo. Os tratamentos analisados foram: (T1) preparo convencional, (T2) preparo reduzido com arado multiuso e (T3) preparo reduzido com escarificador. O experimento foi conduzido nos anos de 2006, 2007 e 2008 e seguiu um sistema de rotação milho-tabaco, sendo conduzido entre dezembro e fevereiro de cada ano. O tratamento convencional (T1) teve a maior densidade do solo ao longo de todo o ciclo de cultivo, indicando uma maior susceptibilidade à compactação com o tempo. Já os tratamentos de cultivo reduzido (T2 e T3) apresentaram menores densidades. Ao final do ciclo produtivo, os sistemas reduzidos melhoraram as condições físicas do solo, resultando em menor densidade do solo ( $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$  em T1,  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  em T2 e  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  em T3).

A Figura 21 apresenta os valores médios da porosidade do solo para os sistemas de cultivo Outro sistema e Tabaco, com a implementação de dois cenários de plantas de cobertura e boas práticas agrícolas, avaliados para as profundidades 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. No gráfico, as barras correspondem às médias dos valores, acompanhadas por linhas verticais que representam os respectivos desvios padrões.

Figura 21 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para  $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta.



Fonte: Autor.

Observando as Figuras 21a e 21b, conclui-se que tanto a análise isolada do fator “Coleta” bem como o do fator “Sistema de cultivo” não revelaram diferenças estatisticamente significativas ( $p > 0,05$ ). Esses resultados indicam que de forma geral a porosidade total nessa camada não foi alterada exclusivamente pelo tempo da amostragem nem pela adoção de determinado sistema de cultivo.

Todavia, os resultados presentes na Figura 20c, revelam a interação significativa entre os fatores “Coleta x Sistema de cultivo”. Ao comparar os sistemas de cultivos entre as coletas constata-se que apenas o sistema Tabaco Aveia apresentou diferença significativa, sendo a Coleta 1 inferior à Coleta 02. Fixando o fator coleta e avaliando-se os diferentes sistemas, observa-se que na Coleta 01 “Outro Sistema Aveia” (A) difere significativamente de “Tabaco Aveia” (B), mas não difere dos outros dois sistemas (Tabaco Mix e Outro Mix). Adicionalmente, “Tabaco Mix” (AB) e “Outro Mix” (AB) não exibiram distinções relevantes em relação a

“Tabaco Aveia” nessa coleta. Porém para a coleta 02 todos os sistemas foram similares entre si.

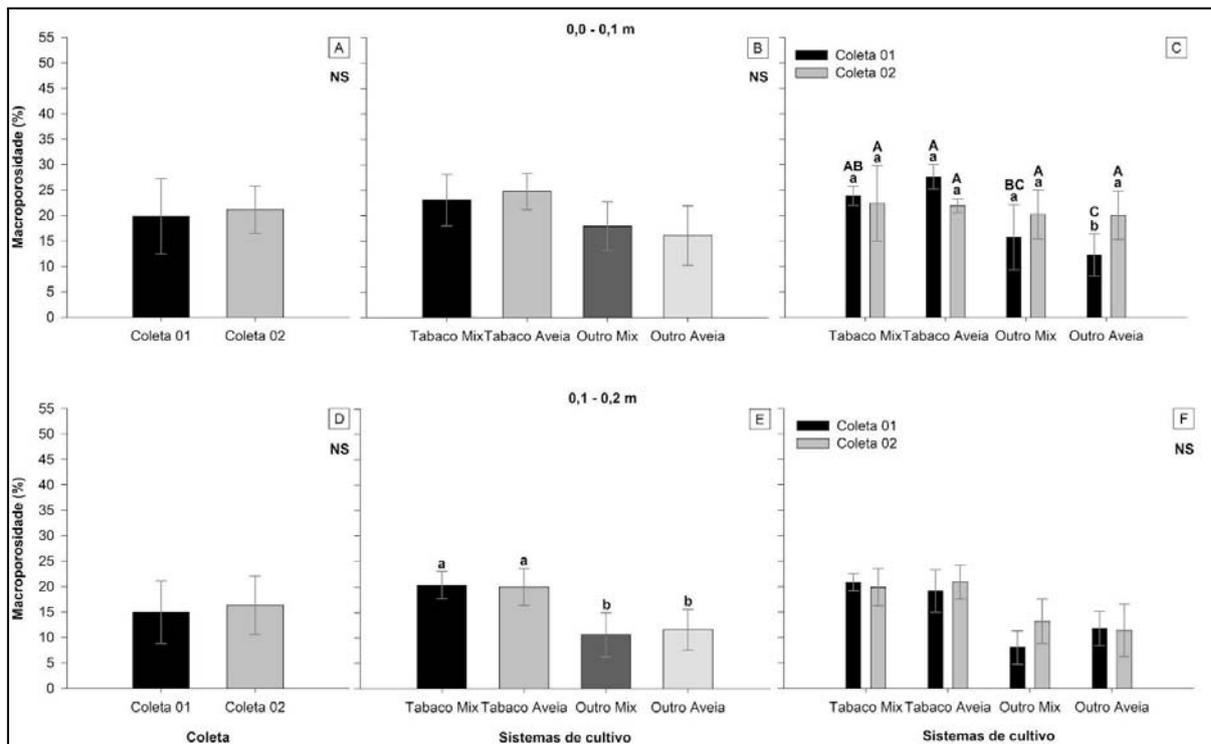
Na Figura 20e e 20f, identifica-se que a porosidade total do solo em função dos fatores “Coleta” e “Sistema de cultivo”, bem como a interação entre os fatores, verifica-se ausência de diferenças estatisticamente significativas (NS). Isto indica que ao contrário da camada superficial (0,0 - 0,1 m) o comportamento da porosidade não foi alterado de maneira significativa para a camada subsuperficial (0,1 - 0,2 m). Entretanto, há uma similaridade com o comportamento da densidade apresentado na Figura 19.

Assim, evidencia-se que há uma menor suscetibilidade às mudanças de manejo, possivelmente relacionando estes resultados com uma menor perturbação mecânica nesta camada. Esta homogeneidade nos resultados sugere que as práticas de manejo utilizadas no presente estudo ainda não produziram efeitos detectáveis nesta camada, ao menos dentro do período estudado e das coletas realizadas. Entretanto, destaca-se que a médio e longo prazo, práticas conservacionistas podem melhorar a estrutura do solo em todo o perfil.

Luciano et al. (2010) realizou um estudo, conduzido em 2007 no município de Ituporanga, SC, teve como objetivo avaliar os efeitos do período de adoção do sistema de plantio direto, em áreas cultivadas com tabaco e cebola, comparativamente à mata natural, sobre diferentes atributos físicos do solo. Em seus resultados é possível identificar que no sistema mata natural, a porosidade total é maior, atingindo  $0,68 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na camada de 0-4 cm, enquanto nos sistemas de plantio direto esses valores são reduzidos, sendo  $0,51 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  em PD1. À medida que o tempo de adoção do plantio direto aumenta, observa-se uma recuperação parcial da porosidade, evidenciada pelos valores ligeiramente superiores em PD5 ( $0,56 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) em relação a PD1.

A Figura 22 apresenta os valores médios da macroporosidade para os sistemas de cultivo Outro sistema e Tabaco, com a implementação de dois cenários de plantas de cobertura e boas práticas agrícolas, avaliados para as profundidades 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. No gráfico, as barras correspondem às médias dos valores, acompanhadas por linhas verticais que representam os respectivos desvios padrões.

Figura 22 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para  $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta.



Fonte: Autor.

Nas Figura 22a e 22b destaca-se que os fatores comparados isoladamente não exibiram diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ) 5%. Entretanto, na Figura 22c pode-se observar que a interação entre os fatores apresentou diferenças significativas. Comparando os sistemas dentro de cada coleta, constatou-se que apenas o sistema Tabaco Aveia apresentou diferença estatística, sendo classificado com a letra “b” na Coleta 01 e “a” na Coleta 02. Fixando o fator “Coleta” e avaliando os diferentes sistemas, verifica-se que o Outro sistema Aveia (“C”) teve a menor média e diferiu-se estatisticamente dos sistema Tabaco Mix (“AB”) e Tabaco Aveia (“A”), mas não diferiu-se significativamente do Outro sistema Mix (B). Já na Coleta 02, todos os sistemas foram agrupados na letra “A”, indicando ausência de diferenças significativas entre eles.

Na Figura 22, observa-se que os painéis (D) e (F) indicam, respectivamente, que o fator “Coleta” e a interação entre os fatores “Coleta x Sistemas de cultivo” não

apresentaram diferenças estatisticamente significativas (NS) para  $p < 0,05$ . Portanto, a variação temporal (entre Coleta 01 e Coleta 02) não alterou a macroporosidade dessa camada, tampouco houve efeitos combinados de coleta e sistema de cultivo.

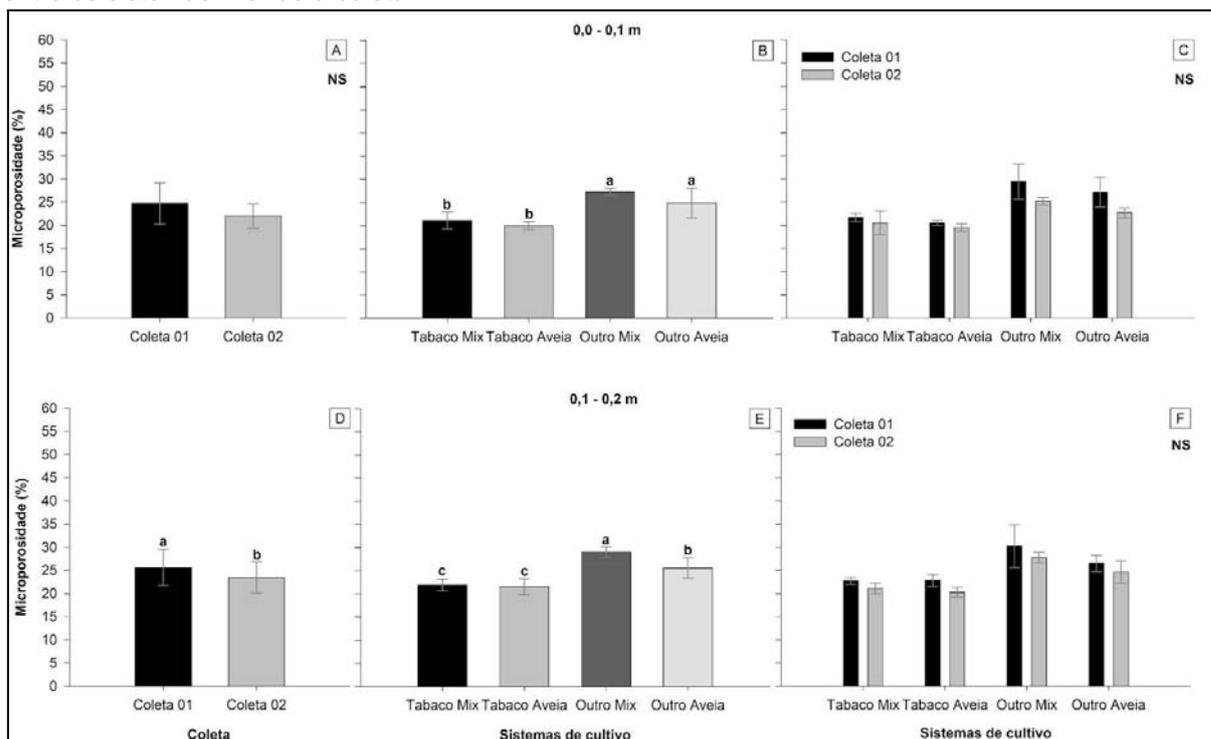
Em contrapartida, no painel E, verifica-se que o fator “Sistema de cultivo” analisado separadamente influenciou de forma significativa a macroporosidade, evidenciada pelas letras distintas (a e b). Os sistemas Tabaco Mix (a) e Tabaco Aveia (A) não demonstraram significativamente entre si, embora tenham demonstrado diferença significativa entre os sistemas Outro sistema Mix (b) e Outro sistema Aveia (b).

Sequinatto et al. (2014) em seu estudo fez uma avaliação da eficiência de alternativas de manejo na recuperação de um solo fisicamente degradado após oito anos envolvendo um experimento conduzido desde 2002 em Eldorado do Sul, RS. O estudo foi realizado em um solo inicialmente degradado, com elevado grau de compactação. Os tratamentos englobam três coberturas do solo no inverno (pousio, aveia preta + ervilhaca e nabo forrageiro). O estudo buscou compreender a efetividade dessas alternativas de manejo na melhoria das propriedades físicas do solo ao longo do tempo. Os resultados evidenciaram um acréscimo nos teores de matéria orgânica do solo, diminuição dos valores de densidade e aumento da macroporosidade e da porosidade total do solo. Portanto, na média dos valores, a cobertura de solo no inverno influenciou a macroporosidade de acordo com o teste de Tukey a 5%.

Mello (2006) realizou um estudo em sete áreas cultivadas com tabaco na localidade de Cândido Brum, no município de Arvorezinha/RS. Dentre essas áreas, quatro eram manejadas historicamente sob plantio convencional, duas sob cultivo mínimo e uma sob plantio direto, cada uma com diferentes tempos de implementação. Além disso, foi analisada uma área de mata nativa como referência. Em seus resultados, o autor evidenciou que houve um efeito significativo dos valores encontrados para a Macroporosidade do solo quando comparados à área de mata nativa. A classificação do Teste de Tukey indicou que há diferença média estatística

A Figura 23 apresenta os valores médios da microporosidade para os sistemas de cultivo Outro sistema e Tabaco, com a implementação de dois cenários de plantas de cobertura e boas práticas agrícolas, avaliados para as profundidades 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. No gráfico, as barras correspondem às médias dos valores, acompanhadas por linhas verticais que representam os respectivos desvios padrões.

Figura 23 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para  $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coleta fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta.



Fonte: Autor.

Os resultados presentes nos painéis A e C identificam que, respectivamente, o fator “Coleta” e a interação entre os fatores “Coleta x Sistemas de cultivo” não apresentaram diferenças estatisticamente significativas (NS) para  $p < 0,05$ . Todavia, o painel B explicita que houve diferença estatisticamente significativa quando analisado o fator Sistema de cultivo isoladamente. Os sistemas de cultivo não obtiveram diferença significativa entre si, mas quando comparado com o “Outro sistema” (a) frente ao “Tabaco” (b) observa-se que as médias macroporosidade do “Outro sistema” são significativamente maiores que a do “Tabaco”.

Nos painéis da Figura 23 para a profundidade de 0,1m - 0,2m é possível observar que somente o F, que representa a interação entre os fatores, indica que não houve diferença significativa. Analisando somente o efeito das Coletas isoladamente, é possível identificar que houve uma diminuição significativa na formação de microporos no solo para a coleta 02 frente a coleta 01. Já ao analisar

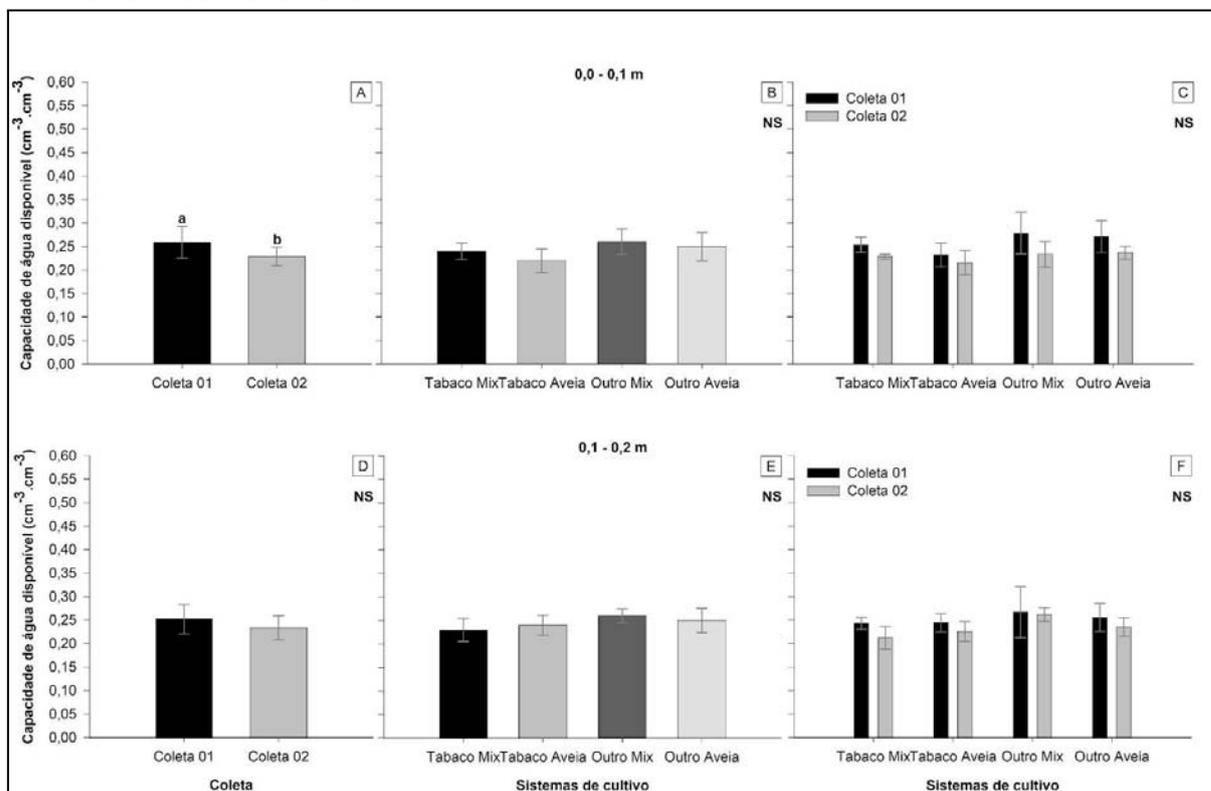
os sistemas isoladamente identifica-se que o sistema Outro sistema Mix (a) diferenciou-se significativamente dos demais, já o sistema Outro Aveia (b), diferenciou-se significativamente dos sistemas Tabaco Mix (b) e Tabaco Aveia (b) que por sua vez não apresentaram diferença significativa entre si.

Reichert et al. (2022) realizou um estudo realizado com o objetivo de monitorar o impacto da promoção de práticas de conservação do solo e gestão ambiental adotadas por agricultores localizados em quatro pequenas bacias hidrográficas rurais do estado do Rio Grande do Sul, Brasil,. O autor em seus achados evidencia que o manejo do solo praticado por produtores de tabaco leva à degradação rápida e intensa de algumas propriedades naturais do solo quando comparados a usos mais conservacionistas (floresta, regeneração e pastagens). Portanto, o manejo do solo, destacando a utilização de culturas de cobertura a serem utilizadas no inverno, deve ser reconsiderado para mitigar os efeitos da degradação e recuperar a qualidade física e biológica do solo.

Silva et. al., (2008) realizou um estudo onde os autores avaliaram os efeitos da produção no sistema plantio direto e da pastagem cultivada sobre os atributos físico-hídricos. O estudo foi realizado em uma propriedade agrícola, em áreas com os seguintes usos: plantio direto (PD) por oito anos, pastagem de *Brachiaria humidicola* (PC) por sete anos consecutivos e Cerrado nativo pastejado (CP). O autor evidencia no quadro de número 2 que houve diferença estatística de acordo com os testes de Scott-Knott em nível de  $p < 0,05$  para a microporosidade do solo em relação ao sistema de cultivo adotado.

A Figura 24 apresenta os valores médios da capacidade de água disponível para os sistemas de cultivo Outro sistema e Tabaco, com a implementação de dois cenários de plantas de cobertura e boas práticas agrícolas, avaliados para as profundidades 0,0 - 0,1 e 0,1 - 0,2 m. No gráfico, as barras correspondem às médias dos valores, acompanhadas por linhas verticais que representam os respectivos desvios padrões.

Figura 24 - (a) e (d) Médias da densidade do solo considerando exclusivamente a média de todos os tratamentos para cada coleta, respectivamente, nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m; (b) e (e) Média da densidade do solo considerando apenas os sistemas de cultivo independente da coleta para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; (c) e (f) Densidade do solo média para interação entre os fatores coleta e sistema de cultivo para as profundidades de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente; NS: NS não significante para  $p < 0,05$ ; As letras apresentam os resultados obtidos para o teste de Tukey a 5% de significância, onde as letras minúsculas das figuras (c) e (f) representam o resultado para interação entre as coletas fixando os sistemas e as maiúsculas entre os sistemas fixando a coleta.



Fonte: Autor.

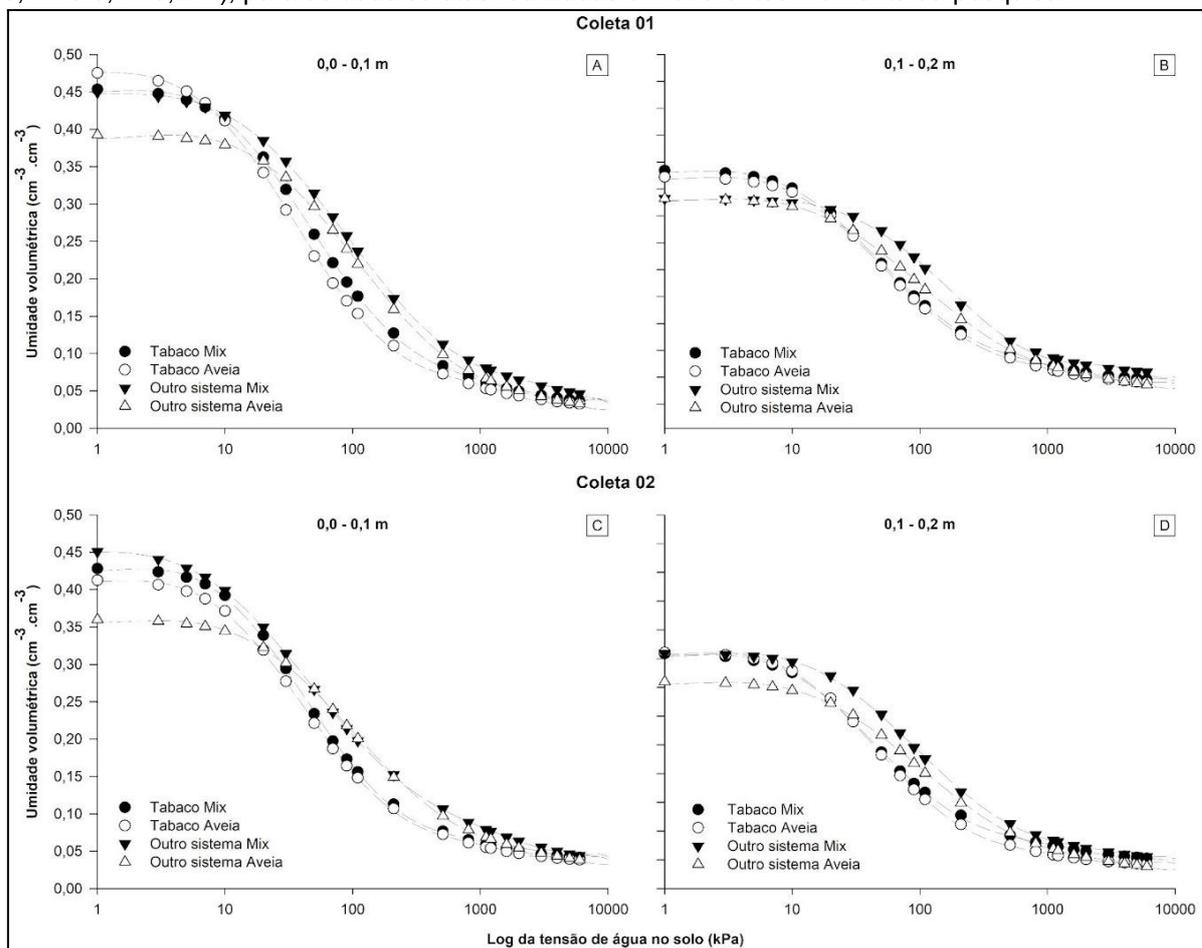
Nos achados da Figura 24 para a camada superficial, observa-se no painel "A" que apenas o fator "Coleta" apresentou diferença estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ). Para tal cenário, é passível de afirmar que a variação entre as coletas exerceu maior influência na análise de disponibilidade de água do solo do que o fator "Sistemas de cultivo" e a interação entre os fatores "Coleta x Sistemas de cultivo". A média dos valores da Coleta 01 "a" foram significativamente maiores que os da Coleta 02 "b". Analisando as médias somente, identifica-se que os sistemas de cultivos com os Mix de plantas tendem a ter maiores valores quando comparados ao manejo com Aveia preta. Dentre os sistemas, comparando a média isolada ou das duas coletas, o sistema "Outro sistema Mix" demonstrou valores mais elevados para a CAD.

Silva et al. (2008) avaliaram os efeitos do plantio direto e da pastagem cultivada sobre os atributos físico-hídricos do solo. O estudo foi conduzido em uma propriedade agrícola, comparando três sistemas de uso: plantio direto por oito anos (PD), pastagem de *Brachiaria humidicola* por sete anos (PC) e Cerrado nativo pastejado (CP). Os autores identificaram que houve uma interação significativa do sistema de cultivo com os valores de água disponíveis para o solo.

Stefanoski et al. (2013) em sua revisão bibliográfica com o intuito de levantar dados sobre a qualidade físico-hídrica e sua relação com os impactos gerados pelo manejo do solo, destaca que a implementação de sistemas de manejo que visem a proteção do solo, contínuo aporte de resíduos orgânicos é essencial para melhoria da estrutura do solo.

A Figura 25 apresenta as curvas características de retenção de água no solo estimadas pelo modelo Van Genuchten, para quatro combinações de manejo (Tabaco Mix, Tabaco Aveia, Outro sistema Mix e Outro sistema Aveia), em duas profundidades (0,0 – 0,1 m e 0,1 – 0,2 m), para as duas coletas do experimento. Esse gráfico expressa a quantidade de água disponível no solo sob a aplicação de diferentes tensões, onde no eixo horizontal, observa-se o logaritmo da tensão de água no solo (kPa), que varia de condições próximas à saturação (tensões mais baixas) até condições de menor disponibilidade hídrica (tensões elevadas). No eixo vertical, está representada a umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), indicando o teor de água retido no solo em cada nível de tensão.

Figura 25 - Curvas características de retenção de água em diferentes sistemas de cultivo (Tabaco Mix, Tabaco Aveia, Outro sistema Mix, Outro sistema Aveia), diferentes profundidades do solo (0,0 - 0,1 m e 0,1 - 0,2 m), para as duas coletas realizadas em diferentes momento da pesquisa.



Fonte: Autor.

Observa-se que de modo geral os sistemas Tabaco Mix e Tabaco aveia tendem a apresentar valores mais elevados de umidade volumétrica em zonas mais próximas à saturação. Posteriormente há uma inversão próxima do potencial de 33 kPa e o Outro sistema inicia a apresentar maiores umidades volumétricas considerando o mesmo potencial. Na camada de 0 - 0,10 m pode-se observar também que o tratamento Outro sistema Mix apresentou valores bem superiores a mesma para as tensões iniciais e esse comportamento se manteve até o final. Entretanto, para o sistema Tabaco, a composição de plantas de cobertura com Aveia apresentou valores maiores para a umidade próximas a tensões de saturação e aproximando-se do ponto de capacidade de campo voltou a apresentar o mesmo comportamento que o outro sistema com o Mix apresentando valores mais elevados. Ao analisar o comportamento entre as tensões de 33 e 1500 kPa observa-se que tem uma tendências do sistema Mix em apresentar maiores valores para umidade

volumétrica, o que indica que para esse tipo de arranjo de plantas de cobertura o solo tem uma capacidade mais constante de fornecer água para as plantas. Levando em consideração a comparação entre as camadas, novamente a camada mais profunda tem um comportamento mais heterogêneo comparando considerando os sistemas, ou seja, não há tanta diferença entre ambos.

Esses resultados estão diretamente relacionados ao longo histórico de manejo do solo, entretanto a adoção de plantas de cobertura, em especial o Mix, sugerem que a maior variedade de espécies favorece a formação de poros de diferentes tamanhos, contribuindo assim para a maior retenção de água no solo. Em culturas historicamente cultivadas sob o sistema de cultivo tradicional a inclusão de plantas de cobertura mais variadas pode oferecer recuperação estrutural, estabelecendo um aumento da disponibilidade hídrica.

Para a coleta 02 identifica-se que o outro sistema e o tabaco Mix tendem novamente a ser os maiores valores de umidade para as menores tensões. Identifica-se também que os tratamentos com Mix de sementes tendem a ter maiores valores quando comparados a composição utilizando unicamente Aveia preta. Observa-se novamente que há uma diferença nos valores de umidades quando comparados às profundidades, evidenciando que deve-se ser considerado as questões ao longo do perfil do solo na recomendação de práticas agrícolas.

Comparando as Coletas 01 e 02 nota-se que para as tensões iniciais os sistemas de Tabaco Mix, Tabaco Aveia e Outro sistema Aveia sofreram uma diminuição nas zonas com menores tensões. Isto pode indicar que no momento da coleta o solo pode ter sido desenvolvido algum processo de compactação que afetou os resultados desse sistema, enquanto para o Outro sistema mix não houve diferença inicial entre as coletas.

Os resultados obtidos pelo presente trabalho estão alinhados com os resultados de Figueiredo et al. (2009), que relataram menor retenção de água em solos sob cerrado nativo em comparação com sistemas de cultivo.

Machado et al. (2008) afirma que a curva de retenção de água no solo, sob um mesmo solo considerando diferentes sistemas de uso e manejo também podem promover modificações na sua estrutura e no comportamento físico-hídrico do solo.

Marchão et al. (2007), ao analisarem diferentes sistemas agrícolas, como plantio direto e convencional, observaram que, embora a curva de retenção de água nem sempre apresenta conclusões definitivas sobre o impacto do manejo, ela pode

indicar alterações na qualidade física do solo, especialmente no que se refere à sua degradação.

#### **4.4. Considerações finais**

Este trabalho realizou um estudo de caso para avaliar a influência da adoção de boas práticas agrícolas com vistas à promoção da conservação do solo e da água numa propriedade produtora de tabaco no extremo sul do Brasil. Os resultados demonstram que os fatores “Coleta”, “Sistemas de cultivo” bem como a interação “Coleta x Sistemas de cultivo” impactaram significativamente os atributos físico-hídricos do solo, embora a magnitude desses efeitos tenha variado conforme o atributo e camada do solo. Neste sentido, o modelo de van Genuchten se mostrou eficiente para estimar com elevada precisão o conteúdo volumétrico de água no solo, independentemente do cultivo, camada ou tempo de coleta.

A análise das curvas características de retenção de água no solo demonstraram que os sistemas manejados com cobertura vegetal diversificada (Mix de plantas) apresentam maior capacidade de água disponível para as plantas. Dessa forma, a migração do sistema de preparo convencional para o sistema de cultivo mínimo e plantio direto, que ampliam o nível de conservação do solo, fato que se torna uma estratégia eficaz para mitigar os impactos adversos da produção agrícola.

Em suma, ressalta-se que a adoção de práticas conservacionistas do solo podem proporcionar às plantas um melhor cenário para seu pleno desenvolvimento. Ademais, reforça-se que a adoção de boas práticas agrícolas não trará um retorno instantâneo. Entretanto, a longo prazo será de suma importância para o desenvolvimento sustentável do solo. Portanto, recomenda-se que sejam elaborados estudos com maiores ciclos de cultivo, proporcionando uma compreensão mais aprofundada do comportamento desses atributos frente a aplicação das boas práticas agrícolas.

## **5. Considerações finais da dissertação**

O presente estudo avaliou, os impactos dos sistemas de manejo agrícola na qualidade físico-hídrica do solo em propriedades produtoras de tabaco no Sul do Brasil, combinando uma análise comparativa entre áreas sob manejo intensivo e vegetação nativa com um estudo de caso focado na adoção de boas práticas agrícolas.

Com a elaboração do diagnóstico dos atributos físico-hídricos do solo foi possível evidenciar que o manejo tradicional acarreta em alterações significativas na estrutura do solo. O comprometimento da qualidade estrutural do solo implica e pode vir a comprometer suas funções essenciais como infiltração, capacidade de retenção e aeração, sobretudo na camada superficial onde os impactos foram mais pronunciados.

Em contrapartida, o estudo realizado em uma propriedade demonstrou que com a implementação de práticas conservacionistas, visando a manutenção e melhora da qualidade estrutural do solo, pode-se promover melhorias na qualidade físico-hídrica do solo.

A convergência dos achados em ambos capítulos ressalta e evidencia a necessidade de se repensar as estratégias de manejo para a produção agrícola. Embora tenhamos ciência de que a manifestação dos benefícios dessas práticas sejam graduais, seus potenciais efeitos positivos sobre a qualidade do solo e ambiental são inquestionáveis a longo prazo. Assim sendo, a incorporação de práticas conservacionistas torna-se uma estratégia viável e necessária para promover a sustentabilidade dos sistemas produtivos e garantir a resiliência do solo frente a cenários de desafios climáticos intensos.

Destaca-se que, estudos futuros, considerando ciclos produtivos mais prolongados, poderão auxiliar e aprofundar a compreensão dos efeitos, orientando e otimizando as práticas de manejo em benefício de toda a cadeia produtiva.

## Referências bibliográficas

AL-SHAMMARY, A. A. G. et al. Soil bulk density estimation methods: A review. **Pedosphere**, v. 28, n. 4, p. 581-596, 2018.

AFUBRA - Associação dos Fumicultores do Brasil. **Informações sobre a produção de tabaco na safra 2022/2023**. Disponível em: [www.afubra.com.br](http://www.afubra.com.br). Acesso em: 9 out. 2024.

AMEKAWA, Y.. Reflections on the growing influence of good agricultural practices in the global south. **Journal of Agricultural and Environmental Ethics**, v. 22, p. 531-557, 2009.

ANTONELI, V.; BEDNARZ, J. A.; THOMAZ, E. L.. Tobacco harvest phase is critical to runoff and soil loss in conventional tillage system. **Soil Use and Management**, v. 39, n. 1, p. 249-259, 2023.

AUDEH, S. J. S. et al. Qualidade do solo: uma visão etnopedológica em propriedades agrícolas familiares produtoras de fumo orgânico. **Revista Brasileira de Agroecologia**, 6(3): 34-48. 2011.

BAIRAGI, S.; MISHRA, A. K.; GIRI, A. Good agricultural practices, farm performance, and input usage by smallholders: Empirical evidence from Nepal. **Agribusiness**, v. 35, n. 3, p. 471-491, 2019.

BAKKER, M. M. et al. Soil erosion as a driver of land-use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 105, p. 467-481, 2005.

BANERJEE, S. et al. Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. **The ISME journal**, v. 13, n. 7, p. 1722-1736, 2019.

BARBETTA, P. Estatística aplicada às Ciências Sociais. Ed. da UFSC, 4ª ed. Florianópolis, 2002.

BARIZON, R. R. M. **Calagem na superfície para a cultura da soja, em semeadura direta sobre (*Brachiaria brizantha*)**. 2001. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura)- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

BARLA, F. G.; KUMAR, S. Tobacco biomass as a source of advanced biofuels. **Biofuels**, v. 10, n. 3, p. 335-346, 2019.

BARROS, J. R.; SILVA, R. F.; PEREIRA, A. A. Impactos do manejo inadequado do solo na cultura do tabaco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 4, p. 87-99, 2018.

BARTON, A.P. et al. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on sub-tropical Ultisols in Yunnan Province, China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, p. 343–357, 2004.

BEDANO, J. C. et al. Effect of Good Agricultural Practices under no-till on litter and soil invertebrates in areas with different soil types. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 100-109, 2016.

BOETTCHER, R. et al. Carbon Footprint of agricultural production and processing of tobacco (*Nicotiana tabacum*) in southern Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 18, p. 100625, 2020.

BROCH, D.L; PITOL, C. & BORGES, E.P. **Integração agricultura-pecuária**: plantio direto da soja sobre pastagem na integração agropecuária. Maracaju: Fundação MS, 1997. 24 p. (Fundação MS . Informativo Técnico, 01/97)

BRONICK, C. J.; LAL, R.. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

BUAINAIN, A. M.; BATALHA, M. O.; ALCIDES, G. C. A competitividade da cadeia produtiva do tabaco no Brasil. Brasília: IPEA, 2009.

CALEGARI, A. Planejamento de rotação de culturas. In: II ReuniÃO Centro-Sul de AdubaÇÃO Verde e RotaÇÃO de Culturas, 2., 1989, Londrina. **Ata e resumos**. Londrina: Embrapa CNPSo, 1990, p. 70.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 137-147, 2006.

CHEN, Y. et al. Autotoxins in continuous tobacco cropping soils and their management. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1106033, 2023.

CHEN, Y. et al. Evolutions and managements of soil microbial community structure drove by continuous cropping. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 839494, 2022.

CORSINI, P. C. Problemas causados pela compactação dos solos. **STAB**, Piracicaba, v.11, n.5, p.8-13, 1993.

COCHRAN, W.G. Sampling techniques. 3rd ed. New York: John Wiley, 1977. 428p  
CLARA, L. et al. Data from extensive monitoring of agricultural practices, soil health, and wheat grain production in 44 farms in Northwestern France from 2021 to 2023. **Data in Brief**, 2024.

CQFS-RS/SC – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2016.

DE ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora, v. 145, 2005.

DE CARVALHO, M. A. R. et al. Escoamento superficial na interação: cobertura vegetal e práticas de controle de erosão. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 1116-1125, 2012.

DE MELO, R. E.I; DA SILVA, A. E. B.. **Influência da Adição de Biochar sobre as Propriedades Físico-Hídricas do Solo: Uma Revisão**. vol. 6, cap. 8. p. 95-107. 2022.

DE VRIES, F. T. et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 35, p. 14296-14301, 2013.

DENG, J. et al. Autotoxins exuded from roots and the effects of PAEs on antioxidant capacity in roots of tobacco seedlings. **Acta Ecol. Sin**, v. 37, p. 495-504, 2017.

DOS SANTOS, D. F. et al. Colheita manual versus semimecanizada do fumo: uma análise ergonômica com aplicação do método OWAS. **Exacta**, v. 22, n. 4, p. 1129-1156, 2024.

DOS SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Serviço de Produção de Informação. 2018.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos. Maximização da eficiência de produção das culturas. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. 1999. 294 p.

FAO - Food and Agriculture Organization. Tobacco production statistics. 2016. Disponível em: [www.fao.org](http://www.fao.org).

FAO. Development of a framework for good agricultural practices. 2003.

FASSA, A. G. et al. Neck pain among tobacco farm workers in Southern Brazil. **Salud Colectiva**, v. 16, p. e2307, 2020.

FIGUEIREDO, C.C. et al. Propriedades físico-hídricas em Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n.2, p.146–151, 2009.

FONTENELE, W.; SALVIANO, A. A. C.; MOUSINHO, F. E. P. Atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob sistemas de manejo no cerrado piauiense. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n.2, p. 194-202, 2009. . 25 Jan. 2013.

GAUDENCIO, C. A. Concepção da rotação de cultura com soja no Paraná. In: Reunião Centro-Sul de Adubação Verde e Rotação de Culturas, 5, 1995, Chapecó, SC. **Resumos**, Florianópolis: Epagri, 1998.

GÓES, G.B. et al. Efeito do cultivo da cana-de-açúcar na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica do solo. **Irriga**, v. 10, n.2, p. 116-122, 2005. 25 Jan. 2013

HANAFIN, J.; CLANCY, L.. History of tobacco production and use. In: The tobacco epidemic. **Karger Publishers**, 2015. p. 1-18.

HAO, X. et al. Soil density and porosity. **Soil sampling and methods of analysis**, v. 2, p. 743-759, 2008.

HAUSTEIN, K.; GRONEBERG, D.. Tobacco or health?: physiological and social damages caused by tobacco smoking. **Springer Science & Business Media**, 2009.

HER, Y. et al. Effect of conservation practices implemented by USDA programs at field and watershed scales. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 71, n. 3, p. 249-266, 2016.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C. Manejo e conservação de solos. In: EMBRAPA. Milho: informações técnicas. Dourados: Embrapa, CPAO, 1997. p. 39-67.

HERNANI, L.C. et al. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **R. Bras. Ci. Solo**, 21:667-676, 1997.

HIRSCH, A.; LANDAU, E. C.. Evolução da produção de fumo (*Nicotiana tabacum*, Solanaceae). 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Produção Agropecuária: Produção de Fumo. In: IBGE. Produção Agropecuária: Produção de Fumo. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/fumo/rs>. Acesso em: 7 nov. 2023.

JAT, M. L. et al. Carbon sequestration potential, challenges, and strategies towards climate action in smallholder agricultural systems of South Asia. **Crop and Environment**, v. 1, n. 1, p. 86-101, 2022.

JONES, A. J. The influence of soil texture on the critical bulk density of soils. **Soil Science**, v. 136, n. 6, p. 382-386, 1983.

JONG VAN LIER, Q.. **Física do solo – baseada em processos**. Editado por Quirijn de Jong van Lier. Piracicaba: Edição do autor, 2020. 413 p. ISBN 978-65-00-11263-4.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 395-401, 1995.

KRUEGER, E. S.; OCHSNER, T. E. Traditional matric potential thresholds underestimate soil moisture at field capacity across Oklahoma. **Soil Science Society of America Journal**, v. 88, n. 5, p. 1678-1690, 2024.

LAL, R. Soil structure and sustainability. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 1, n. 4, p. 67-92, 1991.

LEHMANN, J. et al. The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 10, p. 544-553, 2020.

LEPSCH, I. F. 19 lições de pedologia. Oficina de textos, 2021.

LIMA, R. G.; WIZNIEWSKY, J. G.; MARTINS, S. R. Os Desafios da Sustentabilidade para o Desenvolvimento Rural da Região do vale do Rio Pardo, RS. In: **Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília**, v. 22, n. 3, p. 613-650. 2005.

LIMA, J. R. et al. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo cultivado e sob mata nativa no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, vol. 9, núm. 4, 2014, pp. 599-605 Universidade Federal Rural de Pernambuco Pernambuco, Brasil

LUCIANO, R. V. et al. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 9, n. 1, p. 9-19, 2010.

MARCHÃO, R.L. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesq. Agropec. Bras.**, 42:873-882, 2007.  
MARTINS-DA-SILVA, A. S. et al. Tobacco growing and tobacco use. **International Review of Psychiatry**, v. 34, n. 1, p. 51-58, 2022.

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

MAIATO, A. G. T. **O papel da agricultura de conservação na luta contra a erosão do solo em particular em Angola**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agronômica) – Universidade de Évora, Escola de Ciências e Tecnologia, Departamento de Fitotecnia, Évora, 2016.

MATIAS, S. S. R. et al Atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes usos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n.3, p. 331-338, 2009. . 25 Jan. 2013.

MELLO, N. A. de. **Efeitos do sistema de manejo nos atributos do solo, movimentação de sedimentos e exportação de carbono orgânico numa microbacia rural sob cultura do fumo**. 2005. 273 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MIRBABAEI, S. M. et al. Observation and simulation of water movement and runoff in a coarse texture water repellent soil. **Catena**, v. 207, p. 105637, 2021.

MIURA, A. K., et al.. **Plano amostral para diagnóstico de sustentabilidade ambiental: um estudo de caso em propriedades produtoras de tabaco do Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2022. 28 p. (Documentos / Embrapa Clima Temperado, 532).

MOMM, H. G. et al. Long term conservation practice effects on agricultural soil loss from concentrated and distributed sources. **Journal of Environmental Management**, v. 371, p. 123278, 2024.

MOORE, J. M.; SUMNER, P. E. Irrigating Tobacco. **Bulletin 892**. University of Georgia Cooperative Extension, 2010.

MOREIRA, J. A. A. et al. Efeito de diferentes plantas de cobertura do solo sobre alguns atributos do solo em sistema de produção orgânico. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.4, p.3748-3751, 2009.

MUSK, A. W.; DE KLERK, N. H.. History of tobacco and health. **Respirology**, v. 8, n. 3, p. 286-290, 2003.

MYENI, L. et al. Development and evaluation of pedotransfer functions to estimate soil moisture content at field capacity and permanent wilting point for South African soils. **Water**, v. 13, n. 19, p. 2639, 2021.

NARA, E. O. B. et al. Analysis of the sustainability reports from multinationals tobacco companies in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 1093-1102, 2019.

NEYMAN, J. On the two different aspects of the representative method: the method of stratified sampling and the method of purposive selection. **Journal of the Royal Statistical Society**, v.97, p.558-625, 1934.

NÓBREGA, J. A. Alterações das propriedades do solo sob cultivo de tabaco: impactos e recuperação. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 18, n. 2, p. 102-115, 2020.

NUNES, R. B. **Avaliação da qualidade do solo, sob cultivo de tabaco (Nicotiana tabacum L.), em propriedades agrícolas familiares no município de Pelotas - RS**. 2017. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

OLIVET, Y. E.; SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; HERNANZ, J. L.. Reduced tillage for tobacco (Nicotiana tabacum L.) production in East Cuba. Soil physical properties and crop yield. **Spanish journal of agricultural research**, v. 12, n. 3, p. 611-622, 2014.

OTSUBO, A. A. et al. Sistemas de preparo do solo, plantas de cobertura e produtividade da cultura da mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 327-332, 2008.

PELLEGRINI, A. et al. Sistemas de cultivo da cultura do fumo com ênfase às práticas de manejo e conservação do solo. 2006.

PEREIRA, I.S. et al.. Seleção de propriedades agrícolas para avaliações de sustentabilidade. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v.9, n.2, 2023.

DOS SANTOS PEREIRA, I. et al. Índice de Sustentabilidade Auera como modelo de avaliação de sustentabilidade em propriedades agrícolas familiares. **Revista Delos**, v. 17, n. 58, p. e1596-e1596, 2024.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V.. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.

QU, Y. et al. The impact of root systems on soil macropore abundance and soil infiltration capacity. **Plant and Soil**, p. 1-18, 2025.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C.. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2004.

REICHERT, J. M. et al. Densidade do solo, propriedades físicas e rendimento de culturas em um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v. 39, n. 7, p. 2005-2011, 2009.

REICHERT, J. M. et al. Impact of tobacco management practices on soil, water and nutrients losses in steepplands with shallow soil. **Catena**, v. 183, p. 104215, 2019.

REICHERT, J. M. et al. Soil properties characterization for land-use planning and soil management in watersheds under family farming. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 1, p. 119-128, mar. 2022.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo. I: Efeitos no sistema radicular, na absorção de fósforo e cálcio e no acúmulo de massa seca. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 18, n. 1, p. 63-68, 1994.

RHEINHEIMER, D.S.; GONÇALVES, C.S.; PELLEGRINI, J.B.R. Impacto das atividades agropecuárias na qualidade da água. **Ciência & Ambiente**, n. 27, p. 85-96. 2003.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, I. C., FOLONI, J.S.S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MO, v.27, n.2, p.355-362, 2003.

SALLES, L. E. O. et al. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 2091-2095, 1999.

SANCHEZ-VILA, X.; GUADAGNINI, A.; CARRERA, J.. Representative hydraulic conductivities in saturated groundwater flow. **Reviews of Geophysics**, v. 44, n. 3, 2006.

SANTOS, H.P.; REIS, E.M. **Rotação de culturas em plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2003, 212 p.

SEQUINATTO, L. et al. Qualidade de um Argissolo submetido a práticas de manejo recuperadoras de sua estrutura física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 344-350, 2014.

SEIXAS, J.; ROLOFF, G.; RALISCH, R. Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35 n.4, p. 794-798, 2005.

SEKI, K.; TORIDE, N.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. **J. Hydrol. Hydromech.**, v. 71, n. 1, p. 22-34, 2023.

SHIRAZI, M. A.; BOERSMA, L.. A unifying quantitative analysis of soil texture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 1, p. 142-147, 1984.

SILVA, G. J. et al. Variação de atributos físico-hídricos em latossolo vermelho-amarelo do Cerrado mato-grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2135-2143, 2008.

SILVEIRA, R. L. L.. A cultura do tabaco na Região Sul do Brasil: dinâmica de produção, organização espacial e características socioeconômicas. **Geografia Ensino & Pesquisa**, p. 23-40, 2015.

SINDITABACO. A verdade sobre a produção de tabaco no Brasil. In: A verdade sobre a produção de tabaco no Brasil. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.sinditabaco.com.br/item/a-verdade-sobre-a-producao-de-tabaco-no-brasil/#:~:text=S%C3%A3o%20270.144%20hectares%2C%20sendo%20246.590,cultivo%20de%20tabaco%E2%80%9D%2C%20contou>. Acesso em: 13 nov. 2023.

SINDITABACO. Informações sobre a produção e exportação de tabaco no Brasil. Sindicato Interestadual da Indústria do Tabaco, 2023. Disponível em: [www.sinditabaco.com.br](http://www.sinditabaco.com.br).

SOARES, T. de M. et al. Soil nitrogen dynamics under tobacco with different fertilizer management in southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 21, p. e00282, 2020.

STATISTA. Global tobacco production since 1980. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/261189/global-tobacco-production-since-1980/>. Acesso em: 10, nov. de 2023.

SOUZA, J. L. M. DE; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153–163, 2008.

SOUSA, Á.. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman: o que medem e em que situações devem ser utilizados?. **Correio dos Açores**, p. 19-19, 2019.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, p. 1301-1309, 2013.

TEIXEIRA, P. C. et al. (Ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TEIXEIRA, W. G. et al. Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos. Boletim técnico**, v. 272, 2021.

THOMAS, A.; BREDEMEIER, C.. Desenvolvimento da planta de fumo. Desenvolvimento das plantas de batata, mandioca, fumo e cana-de-açúcar [recurso eletrônico]. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 38-53, 2016.

THOMAZ, E.; ANTONELI, V.. Long-term soil quality decline due to the conventional tobacco tillage in Southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 6, p. 719-731, 2022.

TORRES, L. C. et al. Impacts of soil type and crop species on permanent wilting of plants. **Geoderma**, v. 384, p. 114798, 2021.

TURSIC, I. et al. Influence of Bulk Density on Soil Resistance and Yield of Tobacco. **International Journal Of Plant Research**, Zagreb, v. 2, n. 6, p.21-24, 2016.

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

YANG, X. et al. Influences of Drought and Microbial Water-Retention Fertilizer on Leaf Area Index and Photosynthetic Characteristics of Flue-Cured Tobacco. **Irrigation and Drainage**, v. 68, n. 4, p. 729-739, 2019.