

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Rosicler Alonso Backes

**ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO HÍDRICAS E INTERPRETAÇÃO
POR IMAGENS TOMOGRÁFICAS DA POROSIDADE DE UM LATOSSOLO
CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA**

Santa Maria, RS

2024

Rosicler Alonso Backes

**ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO HÍDRICAS E
INTERPRETAÇÃO POR IMAGENS TOMOGRÁFICAS DA POROSIDADE DE
UM LATOSSOLO CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA**

Tese apresentada no Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em ciência do solo.**

Orientador Prof. Dr. Paulo Ivonir Gubiani

Santa Maria, RS

2024

Backes, Rosicler Alonso
ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO HÍDRICAS E
INTERPRETAÇÃO POR IMAGENS TOMOGRÁFICAS DA POROSIDADE DE
UM LATOSSOLO CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA /
Rosicler Alonso Backes.- 2024.
54 p.; 30 cm

Orientador: Paulo Ivonir Gubiani
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2024

1. Plantas de cobertura 2. Física do solo 3. Bioporos
4. Tomografia computadorizada 5. Estrutura do solo I.
Gubiani, Paulo Ivonir II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ROSICLER ALONSO BACKES, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Rosicler Alonso Backes

**ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO HÍDRICAS E INTERPRETAÇÃO POR
IMAGENS TOMOGRÁFICAS DA POROSIDADE DE UM LATOSSOLO CULTIVADO
COM PLANTAS DE COBERTURA**

Tese apresentada no Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em ciência do solo.**

Aprovada em 31 de Janeiro de 2024:

Banca examinadora

Prof. Dr. Paulo Ivonir Gubiani
(UFSM) (Orientador –Presidente)

Dalvan José Reinert, Dr. (UFSM)

Rodrigo P. Mulazzani, Dr. (UFSM)

Mastrangelo Enivar Lanza Nova Dr. (UERGS)

Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)

Santa Maria, RS.
2024

Dedico este trabalho a minha família, meu esposo Edson Luiz Backes e ao meu filho
Guilherme Luiz Alonso Backes minha razão de vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre guiar meus passos;

Aos meus familiares por todo o incentivo e carinho;

Ao meu orientador, Paulo Ivonir Gubiani, pela oportunidade e confiança na execução do meu trabalho. Obrigada Mestre pela transferência e competência na transmissão do seu conhecimento;

A Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, UERGS, pela compreensão e apoio para que eu pudesse realizar o Doutorado;

Ao técnico do laboratório Douglas Leandro Scheid pela colaboração na aquisição das imagens.

Aos professores do PPG Ciência do Solo da UFSM, pelo compartilhamento do conhecimento e por serem excelências em suas áreas de atuação;

A secretaria do curso pela gentileza e profissionalismo;

A todas as pessoas que passaram pelo meu caminho e que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional;

Aos colegas de doutorado no programa de ciência do solo que de uma forma ou outra colaboraram com meu trabalho;

Em especial as instituições públicas gratuitas e de qualidade UFSM e UERGS por produzir conhecimentos e fazer com que esses conhecimentos tragam benefício para a sociedade.

MUITO OBRIGADA!

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê. (Arthur Schopenhauer).

RESUMO

ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO HÍDRICAS E INTERPRETAÇÃO POR IMAGENS TOMOGRÁFICAS DA POROSIDADE DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA

Uma boa condição de qualidade física e estrutural do solo é determinada pela porosidade que influencia diretamente na aeração, na transferência de água e solutos, na resistência à penetração e na ramificação de raízes. Embora essas interações sejam estudadas através de técnicas tradicionais, o uso de técnicas mais modernas pode trazer mais entendimento dos efeitos das raízes na estrutura do solo. A tomografia computadorizada auxilia nessa caracterização através da visualização das propriedades como conectividade e volume dos poros. A inclusão das plantas de cobertura no manejo do solo pode promover os bioporos, condicionando o seu comportamento físico-hídrico e influenciando na produtividade e na sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Em dois estudos, avaliou-se que mudanças em atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho Distroférico típico em plantio direto seriam detectadas após o cultivo por três anos das espécies de plantas de cobertura de verão de *Crotalaria spectabilis*, feijão de porco e guandú em sucessão com trigo na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, com o objetivo de identificar espécies vegetais com maior capacidade de promover descompactação biológica. No primeiro, técnicas tradicionais foram usadas para avaliar a densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), macroporosidade (M_a), microporosidade (M_i), permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) e taxa de infiltração estável (TIE). No segundo estudo, a tomografia computadorizada foi utilizada para avaliar o volume de poros, anisotropia, conectividade (número de *Euler*) e tortuosidade dos poros. Para o processamento das imagens 3D, elas foram convertidas em uma sequência 2D, nas quais foram aplicados os tratamentos de imagens para aumento da nitidez e obtenção de contraste uniforme no conjunto de imagens. A segmentação foi realizada de modo a separar o material mineral do material orgânico e poros, realizada por meio da aplicação dos métodos globais disponíveis no software ImageJ/Fiji. As variáveis foram analisadas estatisticamente pelo programa “R”, Anova e teste de tukey 5%. As raízes das plantas de cobertura mostraram-se eficientes em promover bioporos estáveis, contribuindo na melhoria dos indicadores. Esses canais iniciados pelo processo de decomposição proporcionam ambiente favorável para a cultura subsequente. A técnica da tomografia computadorizada é uma ferramenta que potencializa a interpretação dos parâmetros físicos em relação aos métodos tradicionais de medição, permitindo melhor assertividade.

Palavras-chave: Estrutura; Bioporos; Plantas de cobertura; Física de solo; Imagens.

ABSTRACT

CHANGES IN PHYSICAL WATER PROPERTIES AND INTERPRETATION BY TOMOGRAPHIC IMAGES OF THE POROSITY OF AN OXISOL CULTIVATED WITH COVERAGE PLANTS

A good condition of soil physical and structural quality is determined by porosity, which directly influences aeration, water and solute transfer, resistance to penetration and root branching. Although these interactions are studied through traditional techniques, the use of more modern techniques can bring more understanding of the effects of roots on soil structure. Computed tomography assists in this characterization by visualizing properties such as connectivity and pore volume. The inclusion of cover crops in soil management can promote biopores, conditioning their physical-water behavior and influencing the productivity and sustainability of agricultural systems. In two studies, it was evaluated that changes in the physical-water attributes of a typical Dystroferric Red Oxisol in direct planting would be detected after cultivation for three years of the summer cover plant species of *crotalaria spectabilis*, jack beans and pigeon pea in succession with wheat in the Northwest region of the state of Rio Grande do Sul, with the aim of identifying plant species with greater capacity to promote biological decomposition. In the first, traditional techniques were used to evaluate soil density (Ds), total porosity (Pt), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), soil air permeability (Kar) and stable infiltration rate (TIE). In the second study, computed tomography was used to evaluate pore volume, anisotropy, connectivity (Euler number) and pore tortuosity. To process the 3D images, they were converted into a 2D sequence, to which image treatments were applied to increase sharpness and obtain uniform contrast in the set of images. The segmentation was carried out in order to separate the mineral material from the organic material and pores, carried out by applying the global methods available in the ImageJ/Fiji software. The variables were statistically analyzed using the "R" program, Anova and 5% Tukey test. The roots of cover crops proved to be efficient in promoting stable biopores, contributing to improving indicators. These channels initiated by the decomposition process provide a favorable environment for subsequent culture. The computed tomography technique is a tool that enhances the interpretation of physical parameters in relation to traditional measurement methods, allowing better assertiveness.

Keywords: Structure; Biopores; Cover plants; Soil physics; Images.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|--|
| 2D | Bidimensional |
| 3D | Tridimensional |
| LV | Latosolo vermelho |
| PD | Plantio direto |
| SPD | Sistema de plantio direto |
| FEBRAPDP | Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| Mos | Matéria orgânica do solo |
| TC | Tomografia computadorizada |
| CS | <i>Crotalaria spectabilis</i> |
| G | <i>Cajanus cajan</i> |
| FP | <i>Canavalia ensiformis</i> |
| Ds | Densidade do solo |
| Pt | Porosidade total |
| Ma | Macroporosidade |
| Mi | Microporosidade |
| Ksat | Gradiente hidráulico |
| TIE | Taxa de fluxo de água em condição de perfil saturado |
| Kar | Permeabilidade do solo ao ar |
| RP | Indicador de resistência do solo à penetração |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-------------------------------|
| 1 | APRESENTAÇÃO..... | 13 |
| 2 | ARTIGO I – ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE LATOSSOLO ARGILOSO CULTIVADO COM SUCESSÃO TRIGO E PLANTAS DE COBERTURA¹..... | 15 |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 2.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 18 |
| 2.2.1 | Implantação e condução do experimento..... | 18 |
| 2.2.2 | Avaliação de propriedades físico-hídricas | 20 |
| 2.2.3 | Análises estatísticas | 21 |
| 2.3 | RESULTADOS..... | 21 |
| 2.4 | DISCUSSÃO | 24 |
| 2.5 | CONCLUSÃO | 26 |
| | REFERÊNCIAS | 28 |
| 3 | ARTIGO II - TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA COMO FERRAMENTA PARA AVALIAR POROSIDADE DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA..... | 32 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 33 |
| 3.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 34 |
| 3.2.1 | Implantação e condução do experimento..... | 34 |
| 3.2.2 | Determinação dos atributos físico-hídricos em laboratório pelo método Convencional | Erro! Indicador não definido. |
| 3.2.3 | Coletas das amostras para a caracterização das imagens | 35 |
| 3.2.4 | Aquisição das imagens tomográficas..... | 36 |
| 3.3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 40 |
| 3.3.1 | Volume de poros..... | Erro! Indicador não definido. |
| 3.3.2 | Conectividade e Anisotropia | 42 |
| 3.4 | CONCLUSÃO | 45 |
| | REFERÊNCIAS | 45 |
| | ANEXOS | 49 |
| | ANEXO 1 – AMOSTRA DE FLUXO DE TRABALHO INICIAL..... | 49 |
| | ANEXO 2 – RECONSTRUÇÃO DOS POROS POR MÓDULO DE FILTRAGEM DA IMAGEM. | 50 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| | ANEXO 3 – FLUXO DE TRABALHO PARA OBTER RAÍZES E FASE INICIAL DE POROS | 50 |
| 4 | DISCUSSÃO INTEGRADA | 51 |
| 5 | CONCLUSÃO GERAL | 53 |
| | REFERÊNCIAS | 54 |

1 APRESENTAÇÃO

A porosidade do solo é um dos parâmetros físicos que podem ser utilizados para medir ou indicar a qualidade do solo. Solos compactados apresentam uma redução na porosidade, afetando assim o desenvolvimento radicular, a absorção de nutrientes e conseqüentemente a produtividade das culturas agrícolas. A compactação do solo é expressa pelo aumento da densidade do solo, que reduz ou pode até impedir o crescimento das raízes devido uma maior resistência à penetração.

Em regiões de solos classificados como Latossolos, os mesmos são vocacionados para a cultura de grãos e o manejo deve ser diferente se compararmos com outras classes texturais, pois a argila lhe confere características físicas e químicas específicas (CAMBARDELLA & ELLIOT, 1993; CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990).

Os solos argilosos distinguem-se dos demais por possuírem maiores chances de compactação e sofrem invariavelmente, modificações de suas propriedades originais pelo manejo incorreto (Bridges e Oldeman, 1999). Assim, as escolhas de práticas agrícolas equivocadas, como a falta de rotação de culturas podem resultar em perdas à sua estrutura (Pires et al, 2017) e diminuir a capacidade de penetração de raízes (Pimentel et al, 1995).

Se considerarmos que a recuperação da estrutura é um processo lento, teria que logo identificar os sinais de degradação e procurar mitigá-los. Máquinas e implementos agrícolas quando trafegam em condições desfavoráveis de umidade do solo pode promover o processo de compactação. A umidade ideal para manejar esse tipo de solo pode variar de 60% a 70% da capacidade de campo para solos de textura argilosa. Assim quando intensamente mecanizados, uma estrutura é destruída, levando à redução da porosidade do solo e conseqüente formação de uma camada compactada (20 a 30 cm), dificultando o enraizamento das plantas e a infiltração da água (Embrapa, 2021). O conhecimento da porosidade total é importante para se entender o movimento e a retenção de água, ar e solutos no solo, entre outros aspectos (Embrapa, 2017).

Conforme o solo vai sendo submetido às práticas de uso, as modificações nos seus atributos físicos também vão ocorrendo, levando ao aumento na densidade do solo, na redução do volume de poros associado aos seus diâmetros, e na estabilidade de agregados (OLIVEIRA et al., 2013). Essas modificações impedem a normalidade no desenvolvimento radicular das plantas, resultando em menores taxas de infiltração de água e maiores taxas de escoamento superficial, o que acelera ainda mais o processo de degradação (PORTELA et al., 2010). Se

considerarmos as regiões onde acontece escassez hídrica, essa deficiência na infiltração de água no solo pode ser mais prejudicial.

A promoção da melhoria estrutural do solo, passa pela utilização das plantas de cobertura como parte do manejo. A opção deve ser por aquelas espécies que tenham um maior potencial de penetrar suas raízes no solo, contribuindo com a formação de bioporos, e auxiliando na difusão de gases e na movimentação de água.

Usualmente as plantas leguminosas (fabaceae), de inverno são as mais estudadas e utilizadas na rotação de culturas, se compararmos com as de verão. Essa preferência ocorre devido às mesmas não competirem com os cultivos de verão, principalmente com a cultura da soja.

Porém, as espécies de estação quente, apresentam características de rusticidade, acúmulo de biomassa e nitrogênio em períodos curtos de tempo e podem ser utilizadas no período que antecede as culturas de inverno, como o trigo e também na cultura do milho. Considerando o potencial que apresentam, as mesmas são merecedoras de atenção, uma vez que há poucos estudos a longo prazo direcionados a esse grupo de plantas e que são necessários para melhor entender as alterações promovidas por elas.

Diante do exposto, o propósito do estudo foi avaliar as consequências do uso das plantas de cobertura de verão e identificar alterações em propriedades físico-hídricas que ocorrem no Latossolo Vermelho através das avaliações físicas tradicionais e do uso da tomografia computadorizada para visualização dos poros. Os resultados estão apresentados e discutidos em dois artigos científicos, apresentados a seguir.

2 ARTIGO I – ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE LATOSSOLO ARGILOSO CULTIVADO COM SUCESSÃO TRIGO E PLANTAS DE COBERTURA¹

RESUMO

A descompactação biológica vem sendo sugerida e estudada como alternativa à descompactação mecânica a fim de evitar desvantagens da escarificação ou subsolagem, como desestruturação do solo e oxidação de carbono. Porém, a descompactação biológica com espécies de plantas de cobertura parece ser site-específica, ou seja, dependente de inúmeras interações biológicas com fatores abióticos dos locais estudados. Neste estudo investigou-se que mudanças em atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho Distroférico típico em plantio direto seriam detectadas após o cultivo por três anos de espécies de plantas de cobertura de verão em sucessão com trigo na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul. O objetivo foi identificar espécies vegetais com maior capacidade de promover descompactação biológica. Os tratamentos que corresponderam as diferentes plantas de cobertura consistiram de: *Crotalaria Spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformes*, mais um tratamento com vegetação espontânea. No terceiro ano, amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m para avaliar a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade do solo ao ar e taxa de infiltração estável. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis indicou que houve efeito das plantas de cobertura na micro e na macroporosidade da camada 0,1-0,2 m e na microporosidade da camada de 0,3-0,4 m. Para as demais variáveis, a análise estatística não detectou efeito dos tratamentos a $p < 0.05$, mas observou-se alteração de todas elas no sentido que coincide com o sentido de mudança que acontece quando há melhoria na qualidade estrutural do solo. Acredita-se que com tamanho amostral maior que as doze parcelas usadas neste estudo e/ou prolongação da duração do experimento para mais que o três anos avaliados a melhoria da estrutura do solo pelas plantas de cobertura ficará mais evidente estatisticamente.

Palavras-chave: qualidade física do solo; descompactação biológica; infiltração de água.

¹ Artigo submetido e aceito para publicação na Revista Caderno de Ciências Agrárias (ICA/UFMG) em 01/12/2023.

2.1 INTRODUÇÃO

Com a expansão da área de Plantio Direto (PD) no Brasil (33, 06 milhões de hectares, segundo FEBRAPDP, (2018)) cresceu também a preocupação com compactação do solo (Reichert et al., 2007). Aumento da resistência mecânica do solo e decréscimo na capacidade de fluxo de ar e água são consequências observadas em experimentos com tráfego excessivo de máquinas agrícolas ou pisoteio animal, e prejuízos no crescimento de raízes e no dossel são os impactos biológicos da compactação mais frequentemente relatados (Gubiani et al., 2014; Reichert et al., 2007; Reinert et al., 2008; Moraes et al., 2020). Porém, o impacto negativo no crescimento das plantas causado por compactação pode não resultar em prejuízo na produtividade de grãos se a chuva ao longo do ciclo for distribuída de modo a atender a demanda hídrica das plantas e não causar deficiência de aeração na rizosfera (Gubiani et al., 2013a; Mulazzani et al., 2022). Porém, em cenário climático de aumento na frequência de períodos de falta e excesso de chuvas, as plantas sentirão a deficiência hídrica e de aeração de maneira mais intensa em solos compactados, nos quais haverá risco maior de prejuízos na produtividade.

Quando o estado de compactação supera limites que prejudicam o crescimento de raízes, a descompactação é necessária. A escarificação ou subsolagem promovem descompactação imediata, mas a massa de solo desestruturada fica mais suscetível à erosão (Deuschle, et al., 2019), aumentam a oxidação de carbono e sua emissão para atmosfera (Sá et al., 2013), além de nem sempre aumentarem a produtividade das culturas e, por vezes, reduzi-la (Gubiani et al., 2013a; Reichert et al., 2009). Por isso, a descompactação biológica tem sido sugerida e estudada como alternativa à descompactação mecânica (Flávio Neto et al., 2015; Raut e Dick, 2020).

A intensificação do uso de plantas estimula a macrofauna e seus processos de bioturbação (Zhang et al., 2022; Torppa et al., 2022), como escavação de galerias, transporte de partículas minerais para a superfície e de resíduos orgânicos em profundidade, o que retroalimenta crescimento de raízes e a atividade de fungos e bactérias que se alimentam dos exsudatos e raízes em decomposição. A permanência desse conjunto de processos ao longo dos anos propaga em profundidade uma frente de descompactação biológica e regeneração da estrutura do solo. Ao contrário da escarificação, a qual produz descompactação rápida, mas com benefícios de curta duração (Drescher et al., 2016; Nicoloso et al., 2008; Rosa et al., 2008). A melhoria da qualidade do solo promovida pelas plantas, através da sua descompactação, ao contrário do que acontece com os implementos agrícolas, ocorre de

maneira uniforme em toda camada explorada pelo sistema radicular, condicionando o solo para o adequado desenvolvimento das plantas (Camargo & Alleoni, 1997). Salienta-se ainda, que o uso de plantas que contribuem para a melhoria do solo possibilita a formação de bioporos com ampla variação de tamanho, que funcionam como rotas alternativas para o crescimento das raízes, infiltração de água e difusão de gases no solo (Müller et al., 2001).

Sistemas de produção que combinam uma cultura para produção de grãos no verão (geralmente soja, esporadicamente milho) com cereais de inverno (trigo ou pastagens de aveia/avevém) ou pousio, que são composições típicas de inúmeras áreas agrícolas do Brasil, podem ter capacidade de descompactação biológica insuficiente para superar a resistência mecânica do solo e promover descompactação efetiva. Nesses sistemas de produção, a introdução de plantas de cobertura mais rústicas e com sistema radicular mais vigoroso é necessária para aumentar o potencial de descompactação biológica.

Vários estudos a campo já relataram que plantas de cobertura promovem mudanças em propriedades físicas do solo indicando descompactação, mas outros estudos não perceberam tais mudanças (por exemplo: Reinert et al., 2008; Genro Junior et al., 2009; Costa et al., 2011). A divergência de resultados decorre do fato de que o potencial de descompactação biológica decorre não apenas das diferenças intrínsecas das espécies vegetais no que se refere à capacidade de penetrar camadas compactadas, mas das inúmeras interações biológicas com fatores abióticos internos e externos ao solo (resistência mecânica do solo, regime térmico e hídrico, pragas, doenças, nutrição, número de cultivos, etc.), os quais variam entre os experimentos e entre anos em um mesmo experimento. Por ser difícil de controlar experimentalmente essa complexidade, a transposição de resultados de uma região climática e de um solo específico para outros locais com clima e solo diferentes carrega inúmeras incertezas. Por isso, a repetição de experimentos em cada combinação edafoclimática e sistema produtivo específico acabam sendo necessária para que as informações produzidas possam ser recomendadas no mesmo sistema edafoclimático-produtivo com maior confiabilidade.

Neste estudo, investigou-se que mudanças em atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho Distroférico típico em plantio direto seriam detectadas após o cultivo por três anos de três espécies de plantas de cobertura de verão em sucessão com trigo na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, com o objetivo de identificar espécies vegetais com maior capacidade de promover descompactação biológica.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área experimental da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, em São Luiz Gonzaga, no Noroeste do estado do Rio Grande do Sul (-28,402093°, -54,931103°, altitude de 221 m). O clima local é do tipo Cfa - Sub-Tropical com precipitação anual média de 1.800 mm, segundo o InmetSul-2022. O solo na área experimental é um Latossolo Vermelho Distroférico (Santos et al., 2018), de acordo com o Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), com 6 % de areia, 37 % de silte e 57 % de argila até na camada de 0 a 20 cm. A área vinha sendo cultivada em plantio direto há mais de 5 anos, com a sequência soja na primavera/verão e pousio no outono/inverno. Em setembro de 2018, amostras de solo da camada de 0 a 20 cm foram coletadas em vários pontos na área experimental para formação de amostra composta, nas qual se determinou o pH (5,7), matéria orgânica (2 %), CTC pH₇ (14,1 cmol_c dm⁻³), Ca (6,9 cmol_c dm⁻³); Mg (3,30 cmol_c dm⁻³), K (0,056 cmol_c dm⁻³), P (3,0 mg dm⁻³), saturação por bases 73% e por Al 0%.

2.2.1 Implantação e condução do experimento

O experimento iniciou em novembro de 2018 e foi conduzido até agosto de 2021, com a implantação de plantas de cobertura (tratamentos) em novembro de 2018, 2019 e 2020, seguidas da cultura do trigo implantada em maio de 2019 e 2020. Os tratamentos foram constituídos por diferentes espécies de plantas de cobertura de verão (Figura 1) e um controle: GD - Guandú (*Cajanus cajan*; 100 kg de sementes ha⁻¹); FP - Feijão de porco (*Canavalia ensiformes*; 50 kg de sementes ha⁻¹); CS - Crotalária (*Crotalaria spectabilis*; 20 kg de sementes ha⁻¹); CO - Controle (ausência das plantas de cobertura; crescimento de espécies espontânea como *Brachiaria plantaginea*, *Lolium perene*, *Cenchrus echinatus*, *Bidens pilosa*, *Sida rhombifolia* e *Brassica rapa* L.).

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado com três repetições, em parcelas de 2 x 5 metros. As sementes de crotalária e guandú foram plantadas com semeadora, em linhas espaçadas de 40 cm. O feijão de porco foi semeado manualmente em covas abertas com enxadas em linhas espaçadas de 40 cm. As sementes utilizadas foram adquiridas de fornecedor credenciado no Sistema Nacional de Sementes e Mudanças do Ministério da Agricultura e Abastecimento. Nenhum tipo de fertilizante foi usado para as plantas de cobertura, e o controle de plantas daninhas foi realizado com capina manual. Na

fase de floração (em março de cada ano), as plantas de cobertura foram roçadas e deixadas na superfície para decomposição (Figura 1).

No mês de maio de 2019 e 2020, sem necessidade de dessecação prévia, a cultivar de trigo ORS 1403, ciclo precoce, foi implantada mecanicamente com densidade de 300 plantas/m² e espaçamento entrelinhas de 17 cm. A adubação mineral de base (280 kg da fórmula comercial NPK 07-37-06) e de cobertura (100 kg de ureia) para o trigo foi realizada com base na análise de solo e nas recomendações do Manual de recomendação de adubação e calagem do RS/SC (CQFS-RS/SC, 2016). Para o controle de doenças foi utilizado o fungicida Tebuconazole (0,75 litros do produto comercial por hectare) e as plantas daninhas foram controladas com capina manual.

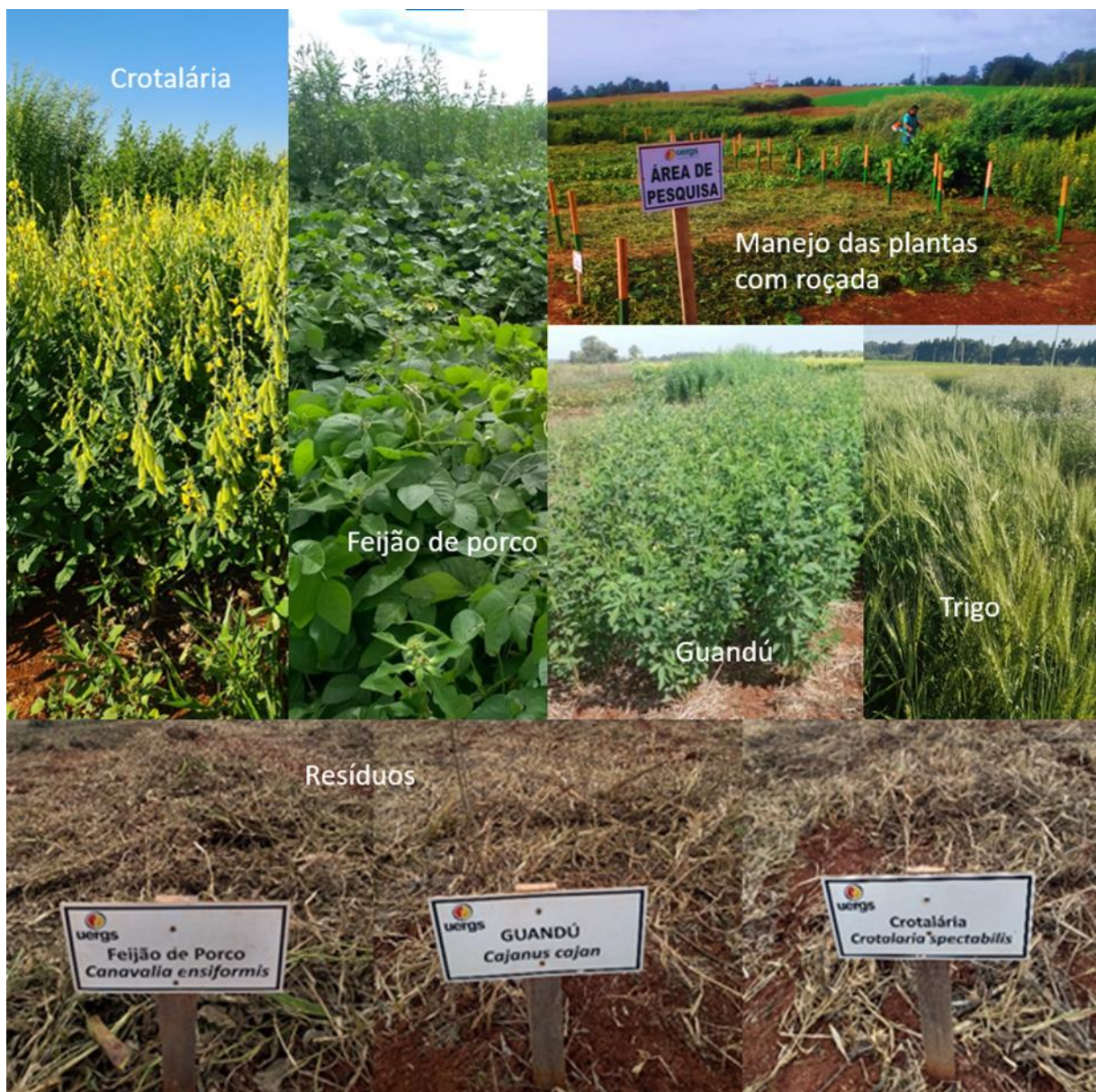


Figura 1 – Aspectos gerais dos cultivos na área experimental, manejo das plantas de cobertura e seus resíduos.

2.2.2 Avaliação de propriedades físico-hídricas

Em maio de 2019, cinco meses após a implantação do experimento, a resistência do solo à penetração (RP) foi medida com um penetrômetro modelo PenetroLOG -1020, cujo cone de 129 mm² e ângulo de 30° foi inserido no solo a uma velocidade de 1 cm s⁻¹. A RP foi medida em todas as parcelas e registrada a cada 1 cm de profundidade. A medição foi realizada três dias após precipitação de 60 mm, condição de conteúdo de água no solo em torno da capacidade de campo. A determinação da RP na fase inicial do experimento teve por objetivo diagnosticar a condição de compactação inicial da área.

Em novembro de 2021, três anos após a implantação do experimento, amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas com anéis metálicos (0,04 m de altura e 0,057m de diâmetro) nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm em todas as parcelas, totalizando 72 amostras. Em uma bandeja contendo as amostras, o nível da água foi elevado gradativamente até próximo da borda superior dos anéis no intuito de promover a saturação do solo. Após 48 h, as amostras foram pesadas e submetidas uma sequência de sucções de 0,6 e 1 em coluna de areia (Reinert e Reichert, 2006) e 10 m em câmaras de pressão (Richards, 1965). Em cada sucção, as amostras foram (i) pesadas para determinação do conteúdo volumétrico de água; (ii) transferidas para um permeâmetro de ar de carga constante para determinação da permeabilidade ao ar (Ka), conforme descrito em Mentges et al. (2016). Na sequência, as amostras foram submetidas à tensão subsequente na coluna de areia ou câmara de pressão. Depois de passar pela tensão de 10 m e pela determinação da Ka, as amostras foram ressaturadas para a determinação da condutividade hidráulica de solo saturado (Ks) em um permeâmetro de carga constante (Donagemma et al., 2011). Após a determinação da Ks, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 horas. A densidade do solo (DS), porosidade total (PT), microporosidade (MI) e a macroporosidade (MA) foram calculadas seguindo metodologia descrita em Donagemma et al., 2011.

Também em novembro de 2021, testes de infiltração com duplo anel concêntrico (0,20 m de diâmetro do anel interno e 0,40 m de diâmetro do anel externo) foram realizados em todas as parcelas experimentais. Os anéis foram inseridos até uma profundidade de 10 cm. As medidas foram realizadas seguindo a metodologia descrita por Reynolds et al. (2002). Uma carga hidráulica constante de 5 cm foi mantida em ambos os anéis, aplicando o princípio Mariott em um reservatório de abastecimento de água. A água infiltrada foi registrada em intervalos de aproximadamente 10 minutos no início dos testes, seguidos de intervalos maiores à medida que a taxa de infiltração diminuía. A duração de cada teste foi entre 2,7 e 3

h, e eles foram concluídos quando pelo menos três leituras sucessivas indicaram que a taxa de infiltração havia se aproximado de taxa quase constante. A média das três taxas finais observadas foi considerada como taxa de infiltração estável (Tie).

2.2.3 Análises estatísticas

Para evitar transformações em variáveis com distribuição diferente da normal (Ks, Ka e MA) e devido o número reduzido de unidades experimentais (doze), o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, que requer menos pressupostos que a análise de variância, foi utilizado para avaliar se as plantas de cobertura afetaram as variáveis de solo determinadas em cada camada. O teste não paramétrico de Nemenyi foi utilizado como teste post-hoc para indicar as diferenças entre tratamentos. Esses testes foram executados com a macro SAS KW_MC (Elliott e Hynan, 2011). Análises de correlações entre as propriedades físico-hídricas também foram realizadas.

2.3 RESULTADOS

A RP medida logo após a instalação do experimento foi semelhante entre os tratamentos (Figura 2). A RP foi menor que 0,5 MPa na camada de 0-5 cm, aumentou bruscamente para valores maiores que 2 MPa na camada de 5 - 15 cm e manteve-se em torno de 2,5 MPa até 40 cm de profundidade. Na maioria das profundidades, o desvio padrão do conjunto total de dados da respectiva profundidade (todos os tratamentos) oscilou entre 0,4 e 0,6 Mpa.

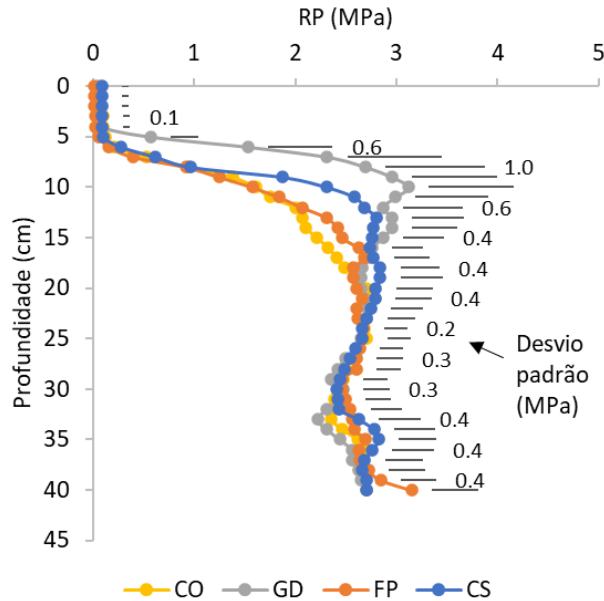


Figura 2 – Resistência do solo à penetração medida no quinto mês após início do experimento. GD - Guandú; FP - Feijão de porco; CS - Crotalaria spectabilis; CO – Controle.

O teste de Kruskal-Wallis atribuiu ao efeito das plantas de cobertura as diferenças na micro e na macroporosidade da camada 10-20 cm e na microporosidade da camada de 30-40 cm (tabela 1). Em nenhum outro caso (variável e camada de solo) foi detectado efeito estatístico das plantas de cobertura.

Tabela 1 – Indicadores da estrutura do solo e propriedades de transporte de água e ar determinadas três anos após a implantação do experimento.

| Tratamento | PT | MI | MA | DS | Ks | Ka10 | Ka100 |
|-------------------|------|---------------|---------------|------|------|------|-------|
| Camada 0 - 10 cm | | | | | | | |
| CS | 0.58 | 0.40 | 0.17 | 1.26 | 760 | 22 | 42 |
| FP | 0.57 | 0.40 | 0.18 | 1.20 | 1384 | 63 | 62 |
| GD | 0.58 | 0.39 | 0.19 | 1.22 | 1144 | 32 | 65 |
| CO | 0.56 | 0.41 | 0.14 | 1.35 | 464 | 19 | 43 |
| Camada 10 - 20 cm | | | | | | | |
| CS | 0.54 | 0.42 a | 0.12 b | 1.43 | 429 | 27 | 65 |
| FP | 0.56 | 0.38 b | 0.18 a | 1.30 | 941 | 45 | 60 |
| GD | 0.56 | 0.39 a | 0.16 b | 1.40 | 249 | 18 | 47 |
| CO | 0.53 | 0.43 a | 0.10 c | 1.44 | 51 | 12 | 57 |
| Camada 20 - 30 cm | | | | | | | |
| CS | 0.58 | 0.42 | 0.16 | 1.28 | 97 | 20 | 27 |
| FP | 0.58 | 0.43 | 0.15 | 1.30 | 881 | 36 | 54 |
| GD | 0.57 | 0.45 | 0.12 | 1.36 | 128 | 43 | 32 |

| | | | | | | | |
|-------------------|------|---------------|------|------|------|----|----|
| CO | 0.58 | 0.43 | 0.15 | 1.31 | 222 | 16 | 31 |
| Camada 30 – 40 cm | | | | | | | |
| CS | 0.58 | 0.44 a | 0.15 | 1.31 | 58 | 8 | 38 |
| FP | 0.58 | 0.41 b | 0.17 | 1.24 | 1074 | 32 | 50 |
| GD | 0.59 | 0.44 a | 0.15 | 1.26 | 97 | 17 | 28 |
| CO | 0.57 | 0.43 a | 0.14 | 1.29 | 122 | 12 | 26 |

GD - Guandú; FP - Feijão de porco; CS - Crotalaria spectabilis; CO – Controle; PT = porosidade total, MI = microporosidade, MA = macroporosidade, DS = densidade do solo, Ks = condutividade hidráulica de solo saturado, Ka10 = permeabilidade ao ar a 10 kPa de tensão matricial, Ka100 = permeabilidade ao ar a 100 kPa de tensão matricial. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste não paramétrico de Nemenyi a $p < 0.1$.

Embora a infiltração acumulada tenha sido alta em dois testes individuais em parcelas com FP e GD, as médias dos tratamentos não diferiram estatisticamente (Figura 3). As diferenças entre as médias de Tie também não foram atribuídas aos tratamentos, embora a Tie nas parcelas com plantas de cobertura tenha sido em torno do dobro em relação ao controle.

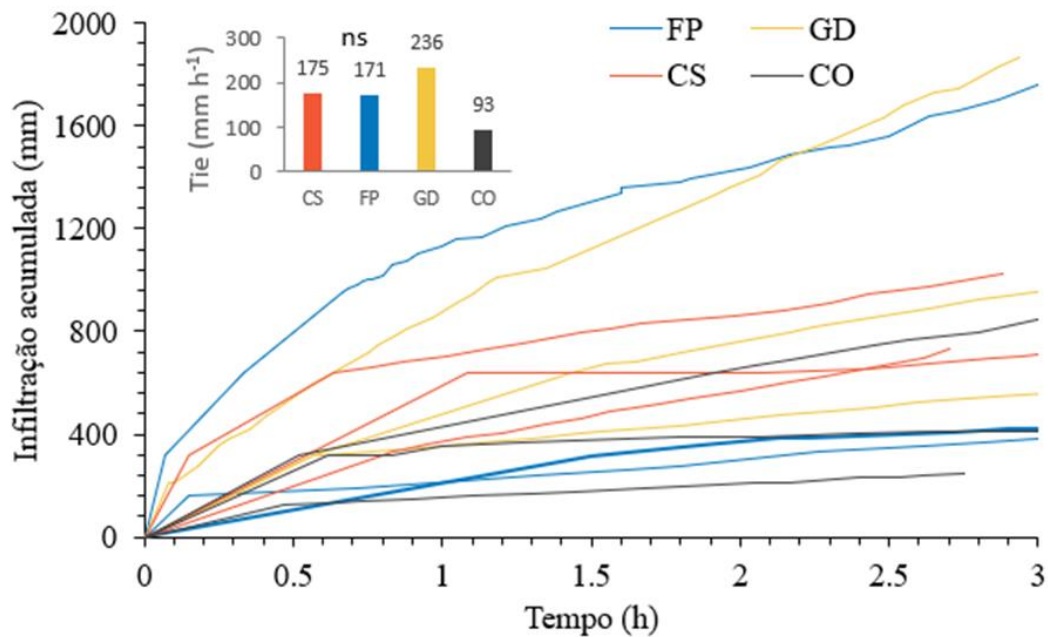


Figura 3 – Infiltração acumulada e taxa de infiltração estável (Tie – gráfico de colunas) determinada três anos após a implantação do experimento. GD - Guandú; FP - Feijão de porco; CS - Crotalaria spectabilis; CO – Controle. ns = não significativo.

Tabela 2 – Correlação de Spearman entre variáveis físico-hídricas nas diferentes camadas de solo.

| Camada (cm) | | K10 | K100 | Ks | DS | MA | MI | PT |
|-------------|------|-----------------------------------|------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 0-10 | Tie | 0.08 | 0.02 | 0.20 | -0.26 | 0.39 | -0.10 | 0.41 |
| | K10 | | 0.67 | 0.76 | -0.28 | 0.20 | -0.63 | -0.02 |
| | K100 | | | 0.78 | -0.66 | 0.32 | -0.45 | 0.10 |
| | Ks | | | | -0.71 | 0.36 | -0.56 | 0.15 |
| | DS | $r < -0,5$ | $-0,5 < r < 0,5$ | $0,5 < r$ | | -0.74 | 0.66 | -0.50 |
| | MA | Azull: significativo a $p < 0.05$ | | | | | -0.60 | 0.85 |
| | MI | | | | | | | -0.17 |
| 10-20 | Tie | 0.57 | 0.31 | 0.38 | -0.62 | 0.57 | -0.48 | 0.55 |
| | K10 | | 0.69 | 0.55 | -0.77 | 0.69 | -0.43 | 0.81 |
| | K100 | | | 0.39 | -0.51 | 0.29 | -0.03 | 0.41 |
| | Ks | | | | -0.83 | 0.76 | -0.74 | 0.71 |
| | DS | | | | | -0.87 | 0.73 | -0.85 |
| | MA | | | | | | -0.90 | 0.90 |
| | MI | | | | | | | -0.67 |
| 20-30 | Tie | 0.24 | 0.11 | 0.07 | -0.17 | -0.15 | -0.33 | -0.41 |
| | K10 | | 0.73 | 0.71 | -0.33 | 0.04 | -0.21 | -0.14 |
| | K100 | | | 0.84 | -0.33 | -0.01 | -0.52 | -0.33 |
| | Ks | | | | -0.55 | 0.27 | -0.28 | 0.07 |
| | DS | | | | | -0.70 | 0.47 | -0.38 |
| | MA | | | | | | -0.13 | 0.80 |
| | MI | | | | | | | 0.41 |
| 30-40 | Tie | -0.03 | -0.16 | 0.11 | -0.07 | 0.08 | -0.11 | 0.08 |
| | K10 | | 0.52 | 0.69 | -0.53 | 0.20 | -0.49 | 0.08 |
| | K100 | | | 0.67 | -0.16 | -0.12 | 0.00 | 0.05 |
| | Ks | | | | -0.48 | 0.17 | -0.37 | 0.22 |
| | DS | | | | | -0.86 | 0.71 | -0.75 |
| | MA | | | | | | -0.66 | 0.88 |
| | MI | | | | | | | -0.31 |

PT = porosidade total, MI = microporosidade, MA = macroporosidade, DS = densidade do solo, Ks = condutividade hidráulica de solo saturado, Ka10 = permeabilidade ao ar a 10 kPa de tensão matricial, Ka100 = permeabilidade ao ar a 100 kPa de tensão matricial.

2.4 DISCUSSÃO

A quase ausência de suporte estatístico para atribuir às plantas de cobertura diferenças grandes observadas nas variáveis determinadas é um dos principais aspectos a ser analisado. O reduzido número de repetições (três) mais a alta variabilidade intrínseca de variáveis como Ks, Ka e Tie desfavoreceu a detecção de diferenças estatísticas pelo teste não paramétrico de

Kruskal-Wallis a $p < 0.1$. A tentativa de detectar diferenças estatísticas com outros testes também seria limitada por estas duas condições.

Várias tendências observadas neste estudo então alinhadas com tendências observadas em outros. Por exemplo, é consenso que uma estrutura do solo com melhor qualidade se traduz em aumento da PT, MA, Ks, Ka, Tie e diminuição da Ds (Reichert et al., 2003; Reichert et al., 2007). Embora não seja possível afirmar que as plantas de cobertura aumentaram a PT, MA, Ks, Ka, Tie e diminuíram a DS com o delineamento experimental deste estudo, é razoável suspeitar que não deve ter sido por acaso que todas as parcelas com plantas de cobertura tiveram valores mais altos de PT, MA, Ks, Ka (exceto para Ka100 em GD), e mais baixos de DS nas duas primeiras camadas superficiais (Tabela 1), posição que coincide com a região do perfil de solo onde geralmente há maior concentração de raízes (Battisti and Sentelhas, 2017; Moraes et al., 2020). Ou seja, a tendência no sentido de mudança dessas variáveis observada nas camadas superficiais do perfil de solo é semelhante ao que se observa na literatura (aumento da PT, MA, Ks, Ka e diminuição da DS) quando há descompactação do solo. Além disso, nas parcelas onde houve três anos de cultivo de plantas de cobertura observou-se valores mais altos de RP no início do experimento (Figura 1, supostamente maior grau de compactação do solo) e DS com menor magnitude no final do experimento (Tabela 1), sinalizando possível descompactação promovida pelas plantas de cobertura.

O aumento da Tie nas parcelas com plantas de cobertura (em torno do dobro em relação ao controle, Figura 3) também é coerente com o fato de ter havido aumento na PT, MA, Ks, Ka e diminuição da DS nessas parcelas (Tabela 1), associações essas frequentemente observadas nas pesquisas (Camara e Klein, 2005; Prando et al., 2010; Drescher et al., 2016). Essas associações também foram observadas nas duas primeiras camadas de solo deste estudo, e foram significativas na segunda camada (Tabela 2). Associação mais forte da Tie com as variáveis da segunda do que com as da primeira camada pode ser explicada pelo fato de que a camada de solo mais restritiva ao fluxo é a que mais afeta a infiltração (Boeno et al., 2021). Na camada de 10-20 cm, a DS mais elevada e a PT e a Ks mais baixas (Tabela 2), em relação à camada de 0-10 cm, indicam a existência de camada subsuperficial compactada mais restritiva à infiltração, comumente detectada em áreas de plantio direto (Reichert et al., 2009, Nunes et al., 2015). Ao contrário, maior quantidade de galerias normalmente criada pela macrofauna na porção superficial do solo (Spurgeon et al., 2013; Bottinelli et al., 2015) juntamente com as capinas efetuadas para o controle de plantas daninhas deixaram a camada de 0-10 cm mais permeável ao fluxo de água (Ks e PT mais elevadas, Tabela 2). Por isso, a

camada superficial não foi a que limitou a infiltração e nela houve baixa associação entre Tie e as demais variáveis (Tabela 2).

A variação das duas propriedades estruturais básicas do solo, DS entre 1,2 e 1,44 Mg m⁻³, e PT entre 0,53 e 0,59 m³ m⁻³, também está coerente com valores observados em solos argilosos semelhantes ao da área experimental deste estudo (Gubiani et al, 2013b, Drescher et al., 2016). Correlação positivamente da DS apenas com a MI e negativamente com todas as demais variáveis (Tabela 2) é outro aspecto que indica coerência dos dados. Além disso, há coerência também na correlação entre as variáveis de fluxo (Tie, Ka10, Ka100 e Ks), que estiveram positivamente correlacionadas entre si, exceto duas correlações da Tie com Ka10 e Ka100 na camada 30-40 cm (Tabela 2).

Tendo em vista que houve coerência no que se refere à relação entre as variáveis físico-hídricas do solo e na tendência de se expressar o efeito mais plausível das plantas de cobertura nas propriedades físico-hídricas do solo, o reduzido número de repetições (três) e de unidades experimentais (doze) deve ter sido o principal fator que limitou a discriminação das plantas de cobertura cultivadas no que se refere a diferenças de potencial para promover descompactação do solo. A contribuição deste estudo é o conjunto de tendências apontando que a descompactação do solo pode ser promovida biologicamente com alguns cultivos de plantas de cobertura. Outros estudos serão necessários para investigar o grau de descompactação que pode ser obtido com descompactação biológica e quais variáveis adicionais da estrutura do solo poderia fornecer diagnóstico mais preciso.

2.5 CONCLUSÃO

Embora o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis tenha indicado que houve efeito das plantas de cobertura ($p < 0.05$) apenas na micro e na macroporosidade da camada 0,1-0,2 m, e na microporosidade da camada de 0,3-0,4 m, observou-se alteração de todas as demais variáveis no sentido que coincide com o sentido de mudança que acontece quando há melhoria na qualidade estrutural do solo. Pelos resultados obtidos pelo estudo poderia recomendar o cultivo do guandú com melhor possibilidade de estruturação do solo, por criarem bioporos estáveis no solo e assim evitar a compactação. Acredita-se que com tamanho amostral (repetições) maior que as doze parcelas usadas neste estudo e/ou prolongação da duração do experimento para mais que os três anos avaliados a melhoria da estrutura do solo pelas plantas de cobertura ficará mais evidente estatisticamente. Assim, outros estudos são necessários para

aprimorar a investigação com foco em identificar plantas de cobertura de verão com maior capacidade de promover descompactação biológica do solo.

REFERÊNCIAS

- Battisti C, Sentelhas PC. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. *Agron. J.*, 109:2017, 1612-1622. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0023>
- Boeno D, Gubiani PI, Jong Van Lier Q, Mulazzani RP. Estimating lateral flow in double ring infiltrometer measurements. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 45 • 2021 • <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210027>
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., Peng, X., 2015. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil Tillage Res.* 146, 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>
- CAMARA RK; KLEIN VA. **Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água.** *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v.29, n,5p.789-796, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000500014>
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 132p
- Costa MSSM, Pivetta LA, Costa LAM, Pivetta LG, Castoldi G, Steiner F. Atributos físicos do solo e produtividade do milho sob sistemas de manejo e adubações. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.* 15:2011, 810–815. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800007>
- CQFS-RS/SC, 2016. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.
- Donagemma GK, Campos DVB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM. Manual de métodos de análise do solo. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2011.
- Deuschle D, Minella JPG, Horbe TANH, Schneider FJAS, Londero AL. Erosion and hydrological response in no-tillage subjected to crop rotation intensification in southern Brazil. 2019. *Geoderma*, 340:157-163. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.010>
- Drescher MS, Reinert DJ, Denardin JE, Gubiani PI, Faganello A, Drescher GL. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. *Pesq. agropec. bras.* 2016. 51:159-168. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200008>.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 3 ed. rev. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. 230p.
- EMBRAPA. Acesso em <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao->

[tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/solo/tipos-de-solo/latossolos](#), Agosto, 2023.

- Elliott AC, Hynan LS. A SAS® macro implementation of a multiple comparison post hoc test for a Kruskal-Wallis analysis. *Comput Meth Prog Bio.* 2011;102:75-80. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.11.002>
- FEBRAPAD. Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto. 2018. Disponível em <https://www.plantiodireto.org.br/>
- Flávio Neto J, Severiano EC, Costa KAP, Guimarães Junnyor WS, Gonçalves WG, Andrade R. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. *Acta Sci., Agron.* 2015. 37:376-383. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19392>
- Genro Junior SA, Reinert DJ, Reichert JM. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 28:2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300009>
- Gubiani PI, Reinert, DJ, Reichert JM. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. *Rev. Bras. Ciênc. Solo,* 37: 2013a. 1-10. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100001>
- Gubiani PI, Goulart RZ, Reinert, DJ, Reichert JM. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo,* 37:2013b. 1502-1511. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600007>
- Gubiani PI, Reichert JM, Reinert DJ. Interação entre disponibilidade de água e compactação do solo no crescimento e na produção de feijoeiro. *Rev. Bras. Ciênc. Solo,* 38:2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300008>
- Mentges MI, Reichert JM, Rodrigues MF, Awe GO, Mentges LR. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma:* 263, 2016. 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.042>
- Moraes MT, Debiasi H, Franchini JC, Mastroberti AA, Levien R, Leitner D, Schnepf A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil, *Soil and Tillage Research,* 200: 2020, 104611. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>.
- Mulazzani RP, Gubiani PI, Zanon AJ, Drescher MS, Schenato RB, Girardello VC. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT. *Agricultural Systems.* 203: 103523, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103523>.
- MÜLLER, M. M. L.; CECCON, G. & ROSOLEM, C. A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo,* v.25, n.3, p.531-538, 2001.

- Nicoloso, R. da S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n. 4 p. 1723-1734, 2008.
- Nunes, MR, Denardin JE, Pauletto EA, Faganello A, Pinto LFS. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil Tillage Res.*, 148: 2015), 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.007>
- Prando MB, Olibone D, Olibone APE, Rosolem CA. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 34 (3) • Jun 2010 • <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300010>
- Raut YY, Dick WA. Bio-drilling, Compaction Alleviation, and Fate of Storm-Water Management. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 14 (2020) 525-531. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2020.10.001>
- Reichert JM, Suzuki LEAS, Reinert, DJ, Horn R, Hakansson I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.* 102: 2009, 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação.** In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. *Tópicos em Ciência do Solo*, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *R. Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.
- Reinert DJ, Albuquerque JA, Reichert, JM, Aita C, Andrada MMC. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo.* 32:2008. 1805-1816. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>
- Reinert, D.J.; Reichert, J.M. 2006. Use of sand column to measure soil water retention: prototypes and test. *Ciencia Rural* 36: 1931-1935 (in Portuguese, with abstract in English). <https://doi.org/10.1590/s0103-84782006000600044>
- Richards, L. 1965. Physical conditions of water in soil. p. 128-152. In: Black, C.; Evans, D.D.; White, J.L.; Clark, F.E., eds. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.* Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Rosa, D. P. et al Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 3, p. 395-400, 2008.

- Sá JCM, Séguy L, Tivet F, Lal R, Bouzinac S, Borszowski PR, Briedis C, Santos JB, Hartman DC, Bertoloni CG, Rosa J, Friedrich T. Carbon Depletion by Plowing and its Restoration by No-Till Cropping Systems in Oxisols of Subtropical and Tropical Agro-Ecoregions in Brazil. *Land Degrad. Develop.* 2015. 26: 531–543. <https://doi.org/10.1002/ldr.2218>.
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Araújo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJF. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2018.
- Soil Survey Staff. *Keys to soil taxonomy*. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service; 2014.
- Spurgeon, D.J., Keith, A.M., Schmidt, O., Lammertsma, D.R., Faber, J.H., 2013. Land-use and land-management change: Relationships with earthworm and fungi communities and soil structural properties. *BMC Ecol.* 13. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-13-46>
- Torppa, K.A., Taylor, A.R., 2022. Alternative combinations of tillage practices and crop rotations can foster earthworm density and bioturbation. *Applied Soil Ecology* 175, 104460. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104460>
- Zhang, Y., Peng, S., Chen, X., Chen, H.Y.H., 2022. Plant diversity increases the abundance and diversity of soil fauna: A meta-analysis. *Geoderma* 411, 115694. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115694>.

3 ARTIGO II - TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA COMO FERRAMENTA PARA AVALIAR POROSIDADE DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA

RESUMO

A descompactação biológica vem sendo sugerida e estudada como alternativa à descompactação mecânica a fim de evitar desvantagens da escarificação ou subsolagem, como desestruturação da estrutura do solo e oxidação de carbono. Porém, a descompactação biológica com espécies de plantas de cobertura é dependente de inúmeras interações biológicas com fatores abióticos dos locais estudados. O presente estudo investiga a distribuição dos poros, volume e conectividade pela aplicação da tomografia computadorizada em um Latossolo Vermelho Distroférico típico em plantio direto que foram visualizados após o cultivo por três anos de espécies de plantas de cobertura de verão em sucessão com trigo na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul. O objetivo foi identificar espécies vegetais com maior capacidade de promover a formação de bioporos. Os tratamentos consistiram pelo cultivo de plantas de cobertura *Crotalaria Spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformes*, mais um tratamento com vegetação espontânea. O equipamento de tomografia utilizado foi o modelo NIKON XT H 225 S, com resolução espacial para o escaneamento - configuração do detector do sistema microtomográfico - o qual segmentou a imagem da amostra em 4722 fatias (*slices*) com a resolução de 60µm totalizando a coluna da amostra de 0,3m. A técnica de escaneamento tomográfico permitiu descrever a variabilidade interna dos componentes estruturais do solo, como o volume de poros, a conectividade da rede de poros e a tortuosidade dos poros. As análises foram de natureza qualitativa e quantitativa, comparadas pelo teste ANOVA e teste de tukey 5%. As características observadas no estudo pode ter sido fortemente influenciada pela morfologia dos canais verticais, originados de raízes em decomposição das plantas de cobertura, com reflexo positivo na porosidade do solo comparado com as avaliações laboratoriais obtidas pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis o qual indicou que houve efeito das plantas de cobertura na macroporosidade da camada 0,1-0,2 m e na microporosidade da camada de 0,3-0,4 m. O método apresentado é eficaz, não invasivo, que permite a determinação e a caracterização da porosidade do solo. A inspeção visual mostrou que a configuração usada é boa para visualizar a conectividade e o volume dos poros. Acredita-se que a prolongação da duração do experimento ficará mais evidente a melhoria na porosidade promovida pelas plantas de cobertura.

Palavras-chave: segmentação de imagens, conectividade, poros, física do solo.

3.1 INTRODUÇÃO

Poros são espaços no solo responsáveis pelos processos de aeração, condução e retenção de água, processos fundamentais para o crescimento e desenvolvimento de plantas estando fortemente relacionado à fertilidade e a qualidade física do solo (Tormena et al., 1998, Freitas et al., 2012; Stefanoski et al., 2013). Essas informações estão diretamente relacionadas com o manejo que refletem na produtividade e na sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Nesse sentido, as raízes têm papel fundamental na funcionalidade do solo, pois elas contribuem com a adição de matéria orgânica, (Zibilske et al. 2005), promovendo a porosidade e agregação do solo (Bronick; Lal, 2005). Assim, as propriedades físicas são fortemente influenciadas pelo uso de plantas de cobertura, as quais afetam a porosidade do solo, a capacidade de armazenamento e a infiltração de água no solo. Recentemente, a tomografia computadorizada se tornou uma importante ferramenta que permite detalhar as mudanças que ocorrem na estrutura do solo, com a visualização de imagens em alta resolução do sistema poroso do solo (Moreira et al; 2009; Borges et al., 2012). Assim é permitido visualizar a distribuição de poros (Crestana e Vaz, 1998; Moreira et al., 2009), a relação dos poros com o manejo do solo e com a atividade biológica (Lucas, Schlüter, Vogel, & Vetterlein, 2019).

A técnica permite uma análise da estrutura interna do solo com base na interação dos raios X com o meio poroso, determinando número de poros do solo (macroporos), volume dos poros e conectividade dos poros. Petrovic, (1982) e Hainsworth, (1983) utilizaram essa ferramenta para medir densidade de volume de solos, Crestana et al. (1985) para estudos de umidade do solo e Oliveira et al. (1998) utilizaram a TC para avaliar a estrutura do solo. Todos os estudos concluíram que é uma importante ferramenta aplicável a pesquisas relacionadas à estrutura do solo, possibilitando avaliar modificações temporais da estrutura do solo em uma mesma amostra, como a tortuosidade e a conectividade dos poros o que não é possível com técnicas tradicionais de análise física do solo.

O sucesso da aplicação da TC para estudos na porosidade do solo depende diretamente da etapa de processamento das imagens. Em particular, a segmentação da imagem digital permite separar as regiões de interesse, fase sólida do solo e os vazios, determinados pelos voxels de cada fase. O detalhamento do sistema poroso quanto ao tipo, número e continuidade dos poros é vital para o entendimento dos processos de fluxo de ar e água que ocorrem no perfil e que podem ser bem explicados a partir da TC, já que essa técnica da

visualização possibilita exame das amostras sem alterar as características. Neste estudo, utilizou-se a ferramenta da tomografia computadorizada para investigarmos a formação de bioporos em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico em plantio direto visualizadas após o cultivo por três anos de três espécies de plantas de cobertura de verão em sucessão com trigo na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área experimental da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, em São Luiz Gonzaga, no Noroeste do estado do Rio Grande do Sul (-28,402093°, -54,931103°, altitude de 221 m). O clima local é do tipo Cfa - (subtropical úmido com verão quente) - com precipitação anual média de 1.800 mm. O solo na área experimental é um Latossolo Vermelho Distroférrico típico (Santos et al., 2018), com 6 % de areia, 37 % de silte e 57 % de argila na camada de 0- 0,20 m. A área onde o experimento foi instalado foi cultivada em plantio convencional até 2008 quando passou a ser cultivada em plantio direto. Durante todo o período anterior à implantação do experimento, a área foi cultivada com a sequência soja na primavera/verão e pousio no outono/inverno. Em setembro de 2018, amostras de solo da camada de 0 - 0,20 m foram coletadas em vários pontos na área experimental para formação de amostra composta, nas qual se determinou o pH (5,7), matéria orgânica (2 %), CTC pH7 (14,1 cmolc dm⁻³), Ca (6,9 cmolc dm⁻³); Mg (3,3 cmolc dm⁻³), K (0,056 cmolcdm⁻³), P (3,0 mg dm⁻³), saturação por bases 73 % e por Al 0 %. Para as análises estatísticas de dados foram utilizados: o programa R (software livre), Anova e teste de tukey. As comparações foram em relação ao volume de poros, conectividade e tortuosidade dos diferentes tratamentos.

3.2.1 Implantação e condução do experimento

O experimento iniciou em novembro de 2018 e foi conduzido até agosto de 2021, com a implantação de plantas de cobertura (tratamentos) em novembro de 2018, 2019 e 2020, seguidas da cultura do trigo implantada em maio de 2019 e 2020. Os tratamentos foram constituídos por diferentes espécies de plantas de cobertura de verão e um controle: GD - Guandú (*Cajanus cajan*; 100 kg de sementes ha⁻¹); FP - Feijão de porco (*Canavalia*

ensiformes; 50 kg de sementes ha⁻¹); CS - Crotalária (*Crotalaria spectabilis*; 20 kg de sementes ha⁻¹); CO - Controle (ausência das plantas de cobertura; crescimento de espécies espontânea como *Brachiaria plantaginea*, *Lolium perene*, *Cenchrus echinatus*, *Bidens pilosa*, *Sida rhombifolia* e *Brassica rapa* L.).

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado com três repetições, em parcelas de 2 x 5 metros. As sementes de Crotalária e Guandú foram plantadas com semeadora, em linhas espaçadas de 40 cm. O feijão de porco foi semeado manualmente em covas abertas com enxadas em linhas espaçadas de 40 cm. As sementes utilizadas foram adquiridas de fornecedor credenciado no Sistema Nacional de Sementes e Mudas do Ministério da Agricultura e Abastecimento. Nenhum tipo de fertilizante foi usado para as plantas de cobertura, e o controle de plantas daninhas foi realizado com capina manual. Na fase de floração (em março de cada ano), as plantas de cobertura foram roçadas e deixadas na superfície para decomposição.

No mês de maio de 2019 e 2020, sem necessidade de dessecação prévia, a cultivar de trigo ORS 1403, ciclo precoce, foi implantada com densidade de 300 plantas/m² e espaçamento entrelinhas de 17 cm. A adubação mineral de base (280 kg da fórmula comercial NPK 07-37-06) e de cobertura (100 kg de ureia) para o trigo foi realizada com base na análise de solo e nas recomendações do Manual de recomendação de adubação e calagem do RS/SC (CQFS-RS/SC, 2016). Para o controle de doenças foi utilizado o fungicida Tebuconazole (0,75 litros do produto comercial por hectare) e as plantas daninhas foram controladas com capina manual.

3.2.2 Coletas das amostras para as análises com tomografia computadorizada

A amostragem foi realizada após os três anos de cultivo com as plantas de cobertura. Tubos cilíndricos de PVC, com 30 cm de altura e 100 mm de diâmetro foram inseridos no solo com pressão exercida por dispositivo hidráulico apoiado na base de um trator agrícola. Esse tamanho da amostra é suficiente para as análises com resolução das imagens de 60 µm.

As amostras foram retiradas na linha de plantio das plantas CS, FP e G e também na testemunha, com três repetições (parcelas), totalizando 12 amostras. Essa técnica exigiu uma coleta e preparação cuidadosa para a inserção do tubo no solo. O tubo foi inserido com cautela para que não entrasse inclinado ou compactasse o solo, o que poderia alterar a estrutura do solo e comprometer as análises tomográficas (Figura 1). O tubo de PVC foi lentamente inserido no solo. Posteriormente, a amostra retirada manual e dela foi retirado o excesso de solo das

extremidades com uma faca. As amostras foram então embaladas em filme plástico, identificadas e levadas ao laboratório de física do solo da Universidade Federal de Santa Maria.



Figura 1 – Retirada das amostras na área experimental para análises tomográficas.
Fonte: A autora, 2022.

3.2.3 Aquisição das imagens tomográficas

As imagens foram obtidas por meio do Tomógrafo micrométrico Nikon, modelo XT H 225 ST, com a fonte de raios-x cônico e um painel detector de geometria bidimensional, de 2000 x 2000 pixels, os quais são capazes de caracterizar o espaço poroso. A resolução do voxel obtida foi de 0,060 mm ou 60 micrômetros, correspondendo ao volume de 0,000216 mm³. A metodologia para obtenção das imagens dos tratamentos seguiu a sequência: aquisição, reconstrução, visualização, processamento e análise das imagens. As análises foram realizadas por meio do software plugin BoneJ (Doube et al., 2010), versão 1.4.3 para visualizar a distribuição do tamanho de poros. Para determinar o grau de anisotropia e o número de Euler, as imagens foram submetidas à ferramenta Purify do plugin BoneJ, com a seguinte configuração de parâmetros: Labelling algorithm = Multithreaded, Chunk size = 4 slices (Figura 2). A espessura de cada fatia é a da resolução 60 μm = 0,06mm.

A avaliação da resolução espacial para o escaneamento levou em conta a configuração do detector do sistema microtomográfico, o qual segmentou a imagem da amostra em 4722 fatias (*slices*), totalizando a coluna da amostra de 0,3m. Como a resolução é isotrópica, isto é, tem as mesmas dimensões nos três eixos (X, Y e Z), onde o eixo Z é o responsável pelo incremento dos *slices*, ao multiplicar por 0,06mm se obtém os valores na profundidade.

As imagens foram adquiridas pelo software Avizo 2020.2 e processadas como volume inteiro na memória. Após é aplicado o aprimoramento de contraste adaptativo seguida da etapa de segmentação.

O procedimento de segmentação foi feito com a ferramenta *watershed*, a qual interpreta os valores dos pixels (menor ponto/unidade de medida quadrada que compõem a imagem digital) e o *voxel* que representa a medida do pixel em volume (unidade de medida cúbica), por meio da aplicação dos métodos globais disponíveis no software ImageJ/Fiji (Schindelin et al., 2012), de modo a separar o material mineral do material orgânico com os poros, pois a atenuação do ar e do material orgânico é muito próximo com possibilidade de ocorrer sobreposição (Le Bayon et al., 2020).

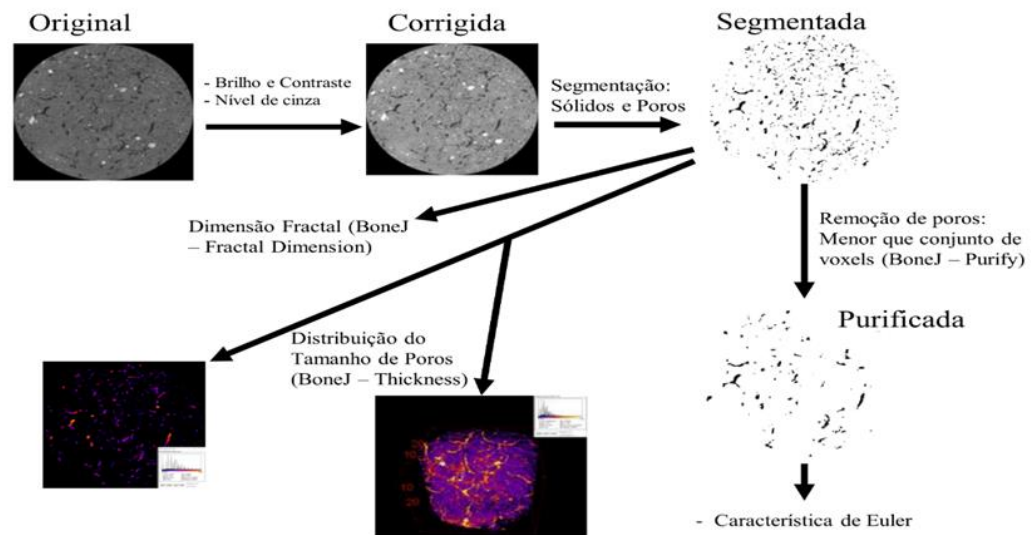


Figura 2: Esquema de segmentação da amostra e de visualização para aquisição de imagens.
Fonte: Douglas Scheid, 2022.

Após a segmentação foi permitido visualizar somente os poros (Anexo 1). Na sequência foi feita a inspeção visual para verificar a qualidade da amostra. Se acaso a segmentação fosse ineficiente, poderia ser realizado um ajuste manual do valor limite entre poros e o solo, baseados na intensidade da coloração do histograma (escalas de cor cinza), característico de cada imagem obtida após a renderização. Os parâmetros foram determinados com visualização do histograma do gradiente de impedância da amostra.

Na aquisição das imagens em duas dimensões, foi realizada a reconstrução do volume das amostras com o programa de computador CT Pro 3D - Nikon Metrology e aplicados filtros gaussianos para redução do ruído e do efeito de endurecimento de feixe.

Os filtros estão instalados diretamente no programa de reconstrução. Para o processamento das imagens 3D, as mesmas foram convertidas em uma sequência 2D, nas quais foram aplicados os tratamentos de imagens para aumento da nitidez e obtenção de contraste uniforme no conjunto de imagens.

A extração foi realizada por módulo aritmético, obtendo-se duas imagens binárias: poros mais raízes - PR e raízes - R. Em R utilizou-se o módulo de filtragem por linha [R.ByLine.eroded], (Anexo 2), seguido de abertura por reconstrução [R.ByLine.opening]. No PR, foi utilizado o módulo aritmético para subtrair o anteriormente “R.ByLine.opening” do volume PR original, e assim obter os poros (Anexo 3).

Para obtenção dos poros foi aplicado o módulo de tratamento seletivo com a configuração de porta, baseada no tamanho dos voxels e nas unidades. O *voxel* é o menor elemento de uma imagem tridimensional, sendo que cada *voxel* é um cubóide retangular com seis faces, doze lados e oito vértices (Paiva et al, 1999). Na sequência foram aplicados os módulos: *Labeling*, *Label Analysis*, *Axis Connectivity* e *Thickness Map* para obtenção das imagens tomográficas da amostra.

O número total de poros não conectados entre si, e o volume de cada poro isolado foram obtidos utilizando-se um algoritmo classificativo pertencente ao módulo *Label Analysis*. Os poros isolados obtidos das amostras seguem pela subtração de poros conectados de todos os poros (todos os poros - poros conectados = poros isolados), usando o módulo aritmético da *Avizo*. Os poros principais são formados por macroporos criados por raízes, fauna do solo, entre outros agentes e os poros residuais estão associados a poros menores, formados pelo empacotamento das partículas primárias do solo areia, silte e argila (LAL; SHUKLA, 2004).

O volume por poro (voxel) dos macroporos foi fornecido pelas planilhas de resultados geradas no processamento das imagens, que foi utilizada para calcular a macroporosidade, multiplicando o percentual (%) por volume de amostra (mm³). Após, o volume em voxels contabilizado por macroporo para cada amostra foi multiplicado pela resolução em mm³.

Para a classificação dos poros, foram determinadas características geométricas dos poros conhecidas como diâmetros de Feret. O diâmetro de Feret é uma medida unidimensional que estima a largura de um objeto em uma determinada direção, a partir da aplicação do módulo *Label Analysis*, sendo elas: $D_{\text{máx}}$, a maior dimensão do poro; $D_{\text{mín}}$, a menor dimensão do poro e $D_{\text{méd}}$, a maior distância entre duas linhas paralelas que tocam o poro sem interceptá-lo e que pertencem ao plano ortogonal a $D_{\text{máx}}$ (Figura 3) (FEI, 2015; SCHMITT et al., 2016). No software *Avizo*, $D_{\text{máx}}$, $D_{\text{mín}}$ e $D_{\text{méd}}$ são denominados *Length 3D*, *Width 3D* e *Breadth 3D*.

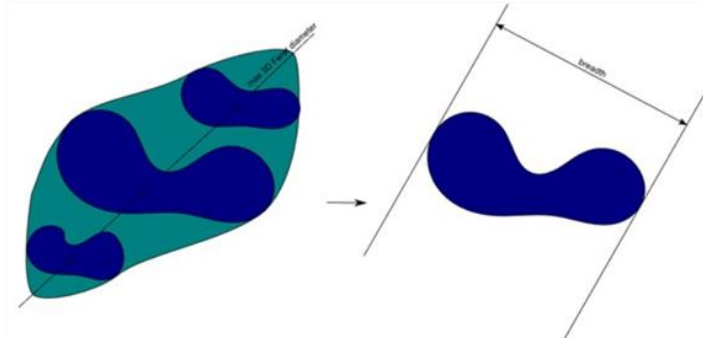


Figura 3: Representação dos diâmetros $D_{\text{máx}}$ e $D_{\text{méd}}$ de Feret (medidas 3D).

Fonte: Douglas Scheid, 2022.

Após a obtenção da imagem purificada foi calculado o número de *Euler 3D* que indica a conectividade dos poros. Essa característica é uma medida geométrica integral que pode oferecer uma estimativa da conectividade da estrutura do espaço poroso de alta confiabilidade. Essa confiabilidade é importante porque o número de *Euler 3D* não sofre alterações sob uma deformação ou mudança de escala de um objeto. Para isso, o módulo *Euler 3D* foi aplicado diretamente na imagem segmentada contendo somente o poro principal e depois, na imagem segmentada contendo somente a rede de poros residuais.

A conectividade é expressa pela característica do número de *Euler 3D*. Quanto mais negativos os valores, mais conectada se encontra a rede de poros ou mais conectada é a estrutura (Chappard *et al.*, 1999). Para cada tamanho de amostra, apenas poros maiores que 4 voxels de diâmetro foram considerados, para minimizar erros de classificação e ruído (Armstrong *et al.*, 2019).

Para caracterizar em termos da tortuosidade, aplicou-se o módulo *Centroid Path Tortuosity* nas respectivas imagens segmentadas. A Tortuosidade foi calculada nas três dimensões da imagem X, Y e Z, onde se obteve um valor para cada eixo dimensional da imagem. Também se verificou o grau de anisotropia, relacionado a variabilidade espacial dos atributos do solo.

A conectividade e a tortuosidade consistem em propriedades geométricas adimensionais dos poros. A Conectividade foi determinada pelo eixo na direção Z das raízes, a qual foi possível visualizar nos tratamentos com as plantas de cobertura e após processada o volume dos poros. Também podem ser mensuradas a dimensão fractal (Jarvis *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2017) do sistema de poros.

Fundamentos teóricos a respeito de medidas do número de Euler e da tortuosidade podem ser encontrados em Alam e Takhar (2016), Brabant *et al.* (2011), Chen *et al.* (2015),

Kaczmarek et al. (2017), Wildenschild e Sheppard (2013), Vogel; Weller e Schlüter (2010) e Lehmann et al. (2006), apud Ferreira, 2018, p. 63).

3.2.4 Análises estatísticas

O efeito dos tratamentos sobre as determinações obtidas com o tomógrafo foi avaliado com a ANOVA, e as médias foram comparadas com o teste de Tukey, ambos a 5% de probabilidade de erro.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

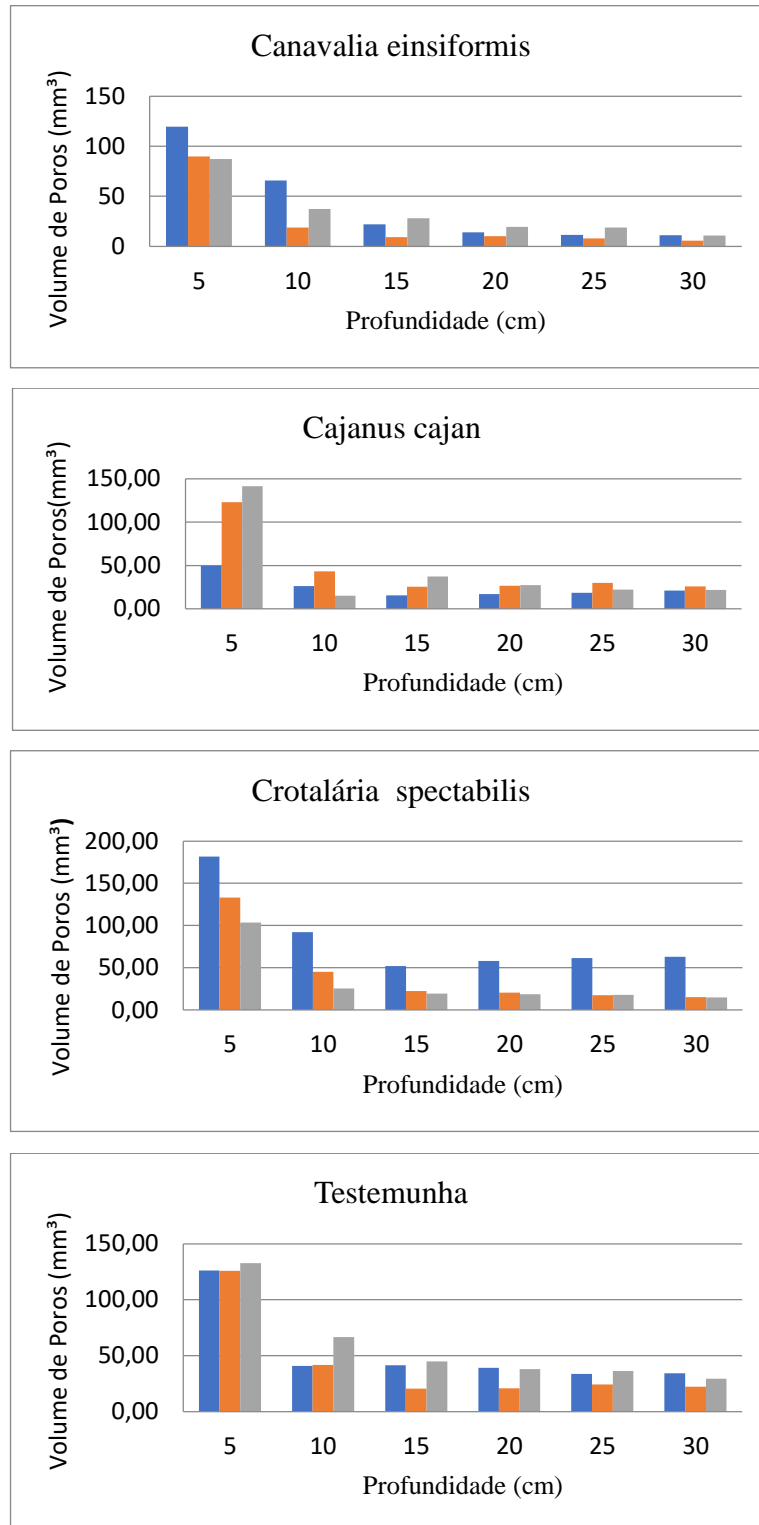
3.3.1 Porosidade

O maior número e volume de poros foram detectados no cultivo com guandú, na profundidade de 0-30 cm. Na sequência feijão de porco, guandú, crotalaria *spectabilis* e testemunha o volume de poros foi 91,85 mm³, 139,35 mm³, 92,40 mm³ e 126,75 mm³. O volume de poros no solo cultivado com guandu foi aproximadamente 10% a mais em relação aos outros tratamentos. Esse aumento no volume de poros (bioporos) formados pelo sistema radicular do guandú favorece o fluxo de ar e água, podendo facilitar a penetração das raízes para as culturas subsequentes. Além disso, Lima et al (2005) ressalta que maior volume de poros pode aliviar a resistência a penetração de raízes durante períodos secos.

O volume de poros na testemunha foi maior em relação aos cultivos de feijão de porco e crotalaria, porém eram poros formados por raízes finas (figura 7) que se foram decompostas facilmente e geraram poros finos distribuídos nos primeiros cinco centímetros, o que também foi relatado por Cercioglu et al., 2018.

Considerando as características e as visualizações nas imagens da TC, entende-se que, ainda que a diferença dos cultivos tenha sido pequena, o padrão de formação (bioporos) e o volume de poros foram afetados na profundidade de 0,3 m, sugerindo a contribuição do sistema radicular (Figura 1).

Figura 1: Volume de poros da amostra em função da profundidade, nos tratamentos de *Canavalia ensiformis*, *Crotalaria spectabilis*, *Cajanus cajan* e Testemunha.



3.3.2 Conectividade e Anisotropia

Os valores encontrados para conectividade, na profundidade de 30 cm nos cultivos com guandú e feijão de porco, indicaram uma melhor continuidade de poros. Isso provavelmente ocorreu devido ao ganho na conexão de poros com diâmetro de 60 μ .

Portanto, a formação de poros na direção vertical, visualizados nas amostras podem ter sido provenientes das raízes das plantas de cobertura. Já na testemunha, não foi detectado continuidade de poros. O maior valor de conectividade foi observado no cultivo com a espécie do guandú, o que pode estar associado com o maior volume de poros encontrados, indicando que essa espécie pode proporcionar uma eficiente movimentação de água e ar no perfil do solo, melhorando sua funcionalidade. Koestel et al. (2020) observaram que a conectividade aumenta com o aumento do volume de poros, principalmente devido a poros entre 0,08 mm e 0,25 mm que conectam macroporos isolados. Nas figuras 4, 5, 6 e 7 é possível visualizar as imagens de poros conectados e isolados das espécies vegetais.

Quanto ao grau de anisotropia, que corresponde à variabilidade espacial em relação ao tamanho dos poros, considera-se que ela é uma importante característica que indica a complexidade da estrutura, como a orientação e distribuição de poros. O grau de anisotropia é uma característica proporcionada por valores que variam entre zero e um, onde o valor igual à zero representa uma estrutura perfeitamente isotrópica (apresentam comportamento igual em todas as direções do meio) e sendo o oposto na anisotropia, com valores próxima ou igual a um. Santos et al. (2012) utilizaram semivariogramas para verificar a variabilidade espacial da macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade e umidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico com cultivo de soja, encontrando uma alta variabilidade na macroporosidade.

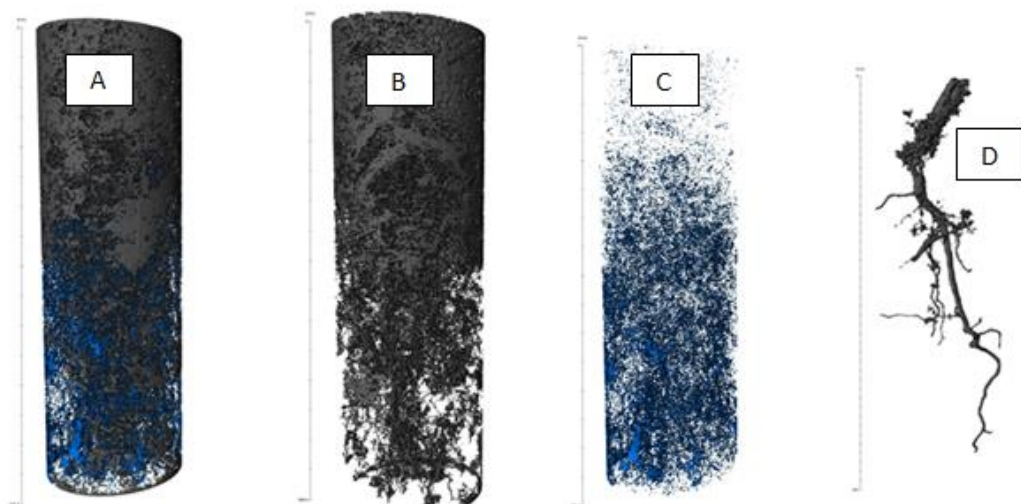
Os cultivos com as plantas de cobertura apresentaram tendência à anisotropia com valores próximos a um, ou seja, anisotropia total, indicando essa tendência ao alinhamento vertical dos poros. Quanto à tortuosidade, calculada nas três dimensões da imagem X, Y e Z, onde se obtém um valor para cada eixo dimensional da imagem, é caracterizada por quanto maior o valor mais tortuoso é o sistema/rede de poros. Nesse sentido os cultivos apresentaram valores com referência a um, caracterizando um sistema menos tortuoso. Essa característica indica uma melhoria na condução de fluxo de ar e água (tabela 1).

Tabela 1: Valores médios de poros fractal, número de Euler e grau de anisotropia da porosidade do solo sob diferentes cultivos.

| Cultivo | Valores Poros Fractal 3D | Valores de Euler 3D | Grau de Anisotropia | Tortuosidade |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|
| Testemunha | 2,56589 a | -117024 b | 0,80 a | 2,29 a |
| Feijão de porco | 2,48871 a | -281651 ab | 0,81 a | 3,45 a |
| Guandú | 2,51439 a | -329241 a | 0,78 a | 2,73 a |
| Crotalária spectailis | 2,55114 a | -128218 b | 0,80 a | 2,82 a |

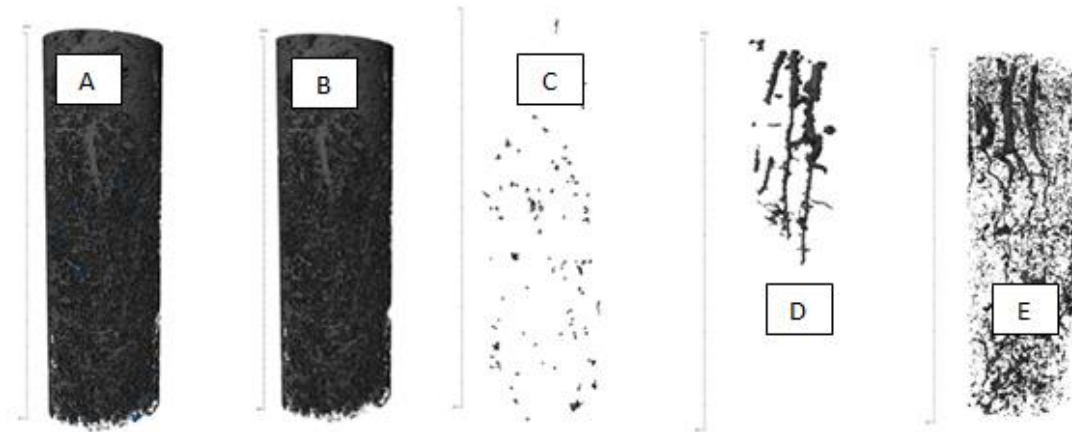
Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 4: Visualização da porosidade do solo cultivado com feijão de porco. (A) poros conectados e isolados, (B) poros conectados, (C) poros isolados e (D) raiz.



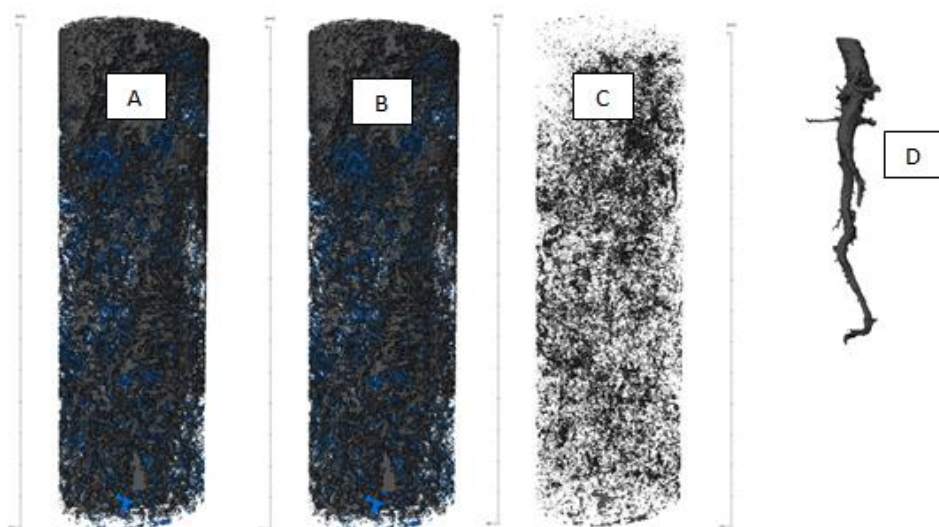
Fonte: A autora, 2024.

Figura 5: Visualização da porosidade do solo cultivado com *Crotalaria spectabilis*. (A) poros conectados e isolados, (B) poros conectados, (C) poros isolados, (D) e (E) raízes.



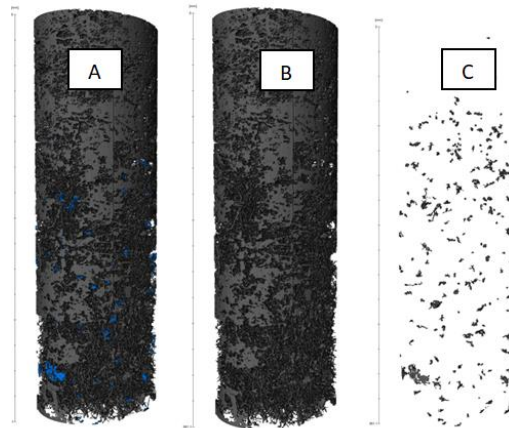
Fonte: A autora, 2024.

Figura 6: Visualização da porosidade do solo cultivado com Guandú (A). poros conectados e isolados, (B) poros conectados, (C) poros isolados e (D) raízes.



Fonte: A autora, 2024.

Figura 7: Visualização da porosidade do solo no tratamento testemunha. (A) poros conectados e isolados, (B) poros conectados, (C) poros isolados.



Fonte: A autora, 2024.

3.4 CONCLUSÃO

A tomografia computadorizada permitiu caracterizar a porosidade, a conectividade e continuidade dos poros. Contudo, observou-se pouco efeito das plantas de cobertura nessas variáveis. Porém, o estudo mostra que houve tendências de descompactação biológica do solo. Com a técnica da tomografia computadorizada é possível estimar propriedades inerentes do sistema poroso do solo, como a conectividade e tortuosidade dos poros.

REFERÊNCIAS

BORGES, J. R. e PIRES, L.F. **Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography**. Soil & Tillage Research, v.123, p.43-49, 2012.

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

CHAPPARD D, LEGRAND E, PASCARETTI C, BASLÉ MF, AUDRAN M. **Comparison of eight histomorphometric methods for measuring trabecular bone architecture by image analysis on histological sections**. Microscopy Research and Technique. 1999; 45(4-5):303-12.

[http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)10970029\(19990515/01\)45:4/5%3C303::AIDJEMT14%3E3.0.CO;2-8](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)10970029(19990515/01)45:4/5%3C303::AIDJEMT14%3E3.0.CO;2-8).

CQFS-RS/SC, 2016. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

CRESTANA, S. e VAZ, C. M. P. Non-invasive instrumentation opportunities for characterizing soil porous systems. *Soil & Tillage Research*, v.47, p.19-26, 1998.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. **Estático e dinâmico três-estudos dimensionais da água no solo usando varredura de tomografia computadorizada.** *Ciência do Solo*, v.140, p.326-332. 1985.

Donagemma GK, Campos DVB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM. Manual de métodos de análise do solo. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2011.

DOUBE M, KLOSOWSKI MM, ARGANDA-CARRERAS I, CORDELIERES FP, DOUGHERTY RP, JACKSON JS, SCHMID B, HUTCHINSON JR, SHEFELBINE SJ. 2010. **BoneJ: free and extensible bone imageanalysis in ImageJ.** *Bone*. 47(6):1076{1079.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária., 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro.

FREITAS, D. A. F. de; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 417-428, 2012.

GHROMANN, F. & QUEIROZ NETO, J.P. **Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração de raízes de arroz.** *Bragantina*, 25:421-431, 1966.

HAINSWORTH, JM; AYLMORE, LAG. **O uso de tomografia assistida por computador para determinar a distribuição espacial do conteúdo de água no solo.** *Australian Journal of Soil Research*, v.21, p.435-443. 1983.

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

KOESTEL, J., LARSBO, M., & JARVIS, N. (2020). **Scale and REV analyses for porosity and pore connectivity measures in undisturbed soil.** *Geoderma*, 366, 114206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114206>.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia:** relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 262 p.
Lal,R., Schukla.M.K., 2004.Principles of Soil Physics. The Ohio State University Columbus, Ohio, p.682.

LIMA, H.V. de et al. **Comportamento físico de um argissolo acinzentado coeso no Estado do Ceará.** *R.Bras.Ci.Solo*, 29:33-40, 2005.

LU, S. G., MALIK, Z., CHEN, D. P., WU, C. F., 2014. **Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides.** *Catena* 123, 79-87.

Lucas M, Schlüter S, Vogel HJ, Vetterlein D. **Formação da estrutura do solo ao longo de uma cronossequência agrícola.** *Geoderma*. 2019;350:61–72. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.04.041. – DOI.

- Luo, L., Lin, H., & Schmidt, J. (2010). **Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport.** Soil Science Society of America Journal, 74, 1929–1937.
- MARSILI, A., SERVADIO, P., PAGLIAI, M., VIGNOZZI, N., 1998. **Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors.** Soil and Tillage Research 49, 185-199.
- MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. Geoderma, v. 263, n. 1, p. 47-59, 2016.
- MOREIRA, A. C.; FERNANDES, J. S.; MARQUES, L. C.; APPOLONI, C. R.; FERNANDES, C. P. e NAGAT, R. Effect of manual threshold setting on image analysis results of a sandstone sample structural characterization by X-ray microtomography. Anais do International Nuclear Atlantic Conference, Rio de Janeiro, 2009.
- OLIVEIRA, J.O.A.P. **Efeito de sistemas de preparo em algumas propriedades do solo e na cultura da mandioca** (Manihot esculenta, Crantz). Maringá, 1998. 112p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá.
- PAGLIAI, M., PELLEGRINI, S., VIGNOZZI, N., ROUSSEVA, S., GRASSELLI, O., 2000. **The quantification of the effect of subsoil compaction on soil porosity and related physical properties under conventional to reduced management practices.** Advances in GeoEcology 32, 305-313.
- PAGLIAI, M., VIGNOZZI, N., PELLEGRINI, S., 2004. **Soil structure and the effect of management practices.** Soil and Tillage Research 79, 131- 143.
- PAIVA, A. C. ; SEIXAS, R. B. ; GATTASS, M. Introdução à visualização volumétrica. PUC-RioInf.MCC03/99. Rio de Janeiro, 106 p, 1999
- PEDROTTI, A.; FERREIRA, M.M.; CURTI, N.; SILVA, M. L.N.; LIMA, JM; CARVALHO, R. **Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo.** Revista Brasileira de Ciência do solo, 27:1-9, 2003.
- Perret, J. , Prasher, SO, Kantzas, A. e Langford, C. 1999. Quantificação tridimensional de redes de macroporos em núcleos de solo não perturbados. Ciência do Solo. Soc. Sou. J. 63: 1530 – 1543. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361530x>.
- PETROVIC, AM; SIEBERT, JE; RIEKE, PE. **Análise de densidade aparente do solo em três dimensões por varredura tomográfica computadorizada.** Soil Science Society of America Journal, v.46, p.445- 450. 1982.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H.-J. (2018). **Soil structure as an indicator of soil functions: A review.** Geoderma, 314, 122–137.

REGELINK, I. C.; STOOF, C. R.; ROUSSEVA, S.; WENG, L.; LAIR, G. J.; KRAM, P.; COMANS, R. N. 2015. **Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties.** *Geoderma*, v.247, p.24-37.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. & LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110:131-146, 2002.

Sandin, M., Koestel, J., Jarvis, N., & Larsbo, M. (2017). **Post-tillage evolution of structural pore space and saturated and nearsaturated hydraulic conductivity in a clay loam soil.** *Soil and Tillage Research*, 165, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.004>.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 187 p. 2018.

SCHINDELIN, J., ARGANDA-CARRERAS, I., FRISE, E., KAYNIG, V., LONGAIR, M., PIETZSCH, T., ... CARDONA, A. (2012). Fiji: **An open-source platform for biological-image analysis.** *Nature Methods*, 9, 676–682.

Soil Survey Staff. *Keys to soil taxonomy*. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service; 2014.

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

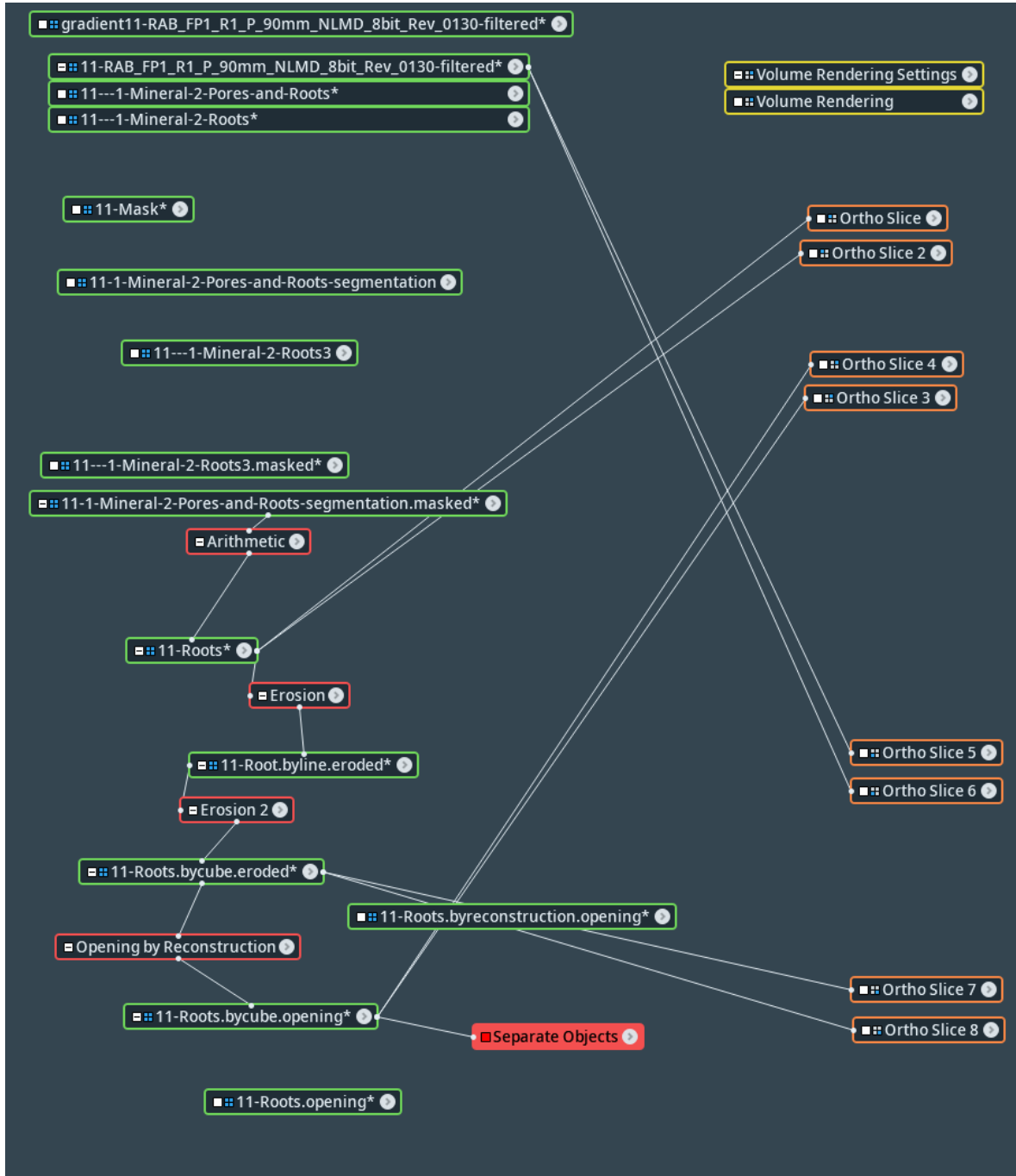
Tormena, C. A.; Silva, A. P.; Libardi, P. L. **Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.573-581, 1998.

Zhang, Z., Liu, K., Zhou, H., Lin, H., Li, D., & Peng, X. (2019). **Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography.** *Journal of Hydrology*, 571, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.041>.

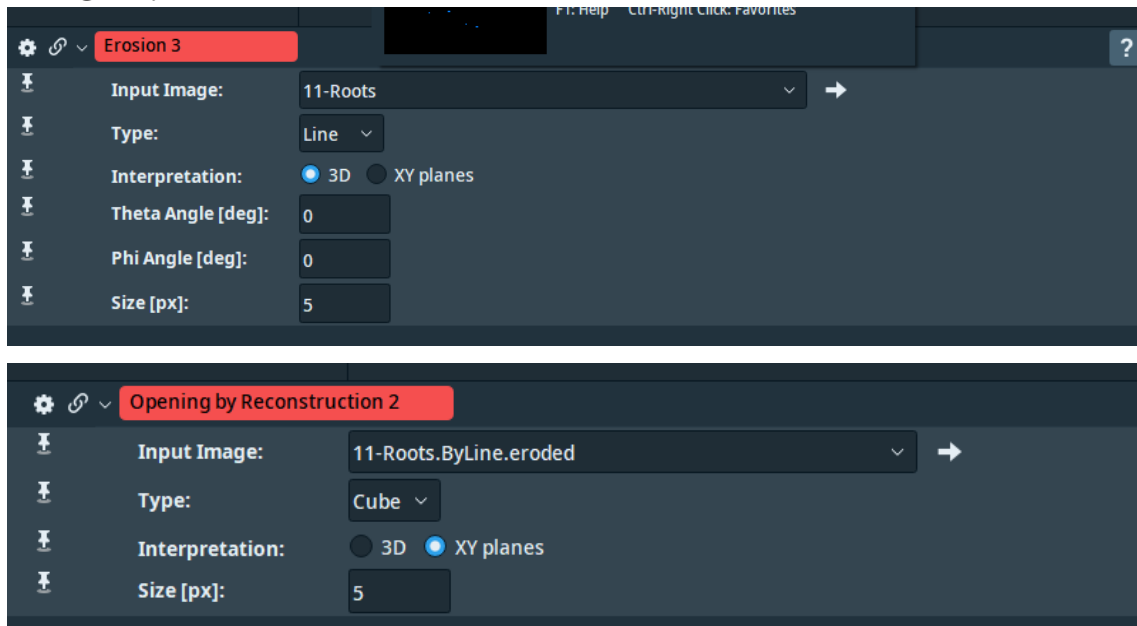
ZIBILSKE, L.M., AND L.A. MATERON. **Biochemical properties of decomposing cotton and corn stem and root residues.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:378–386, 2005.

ANEXOS

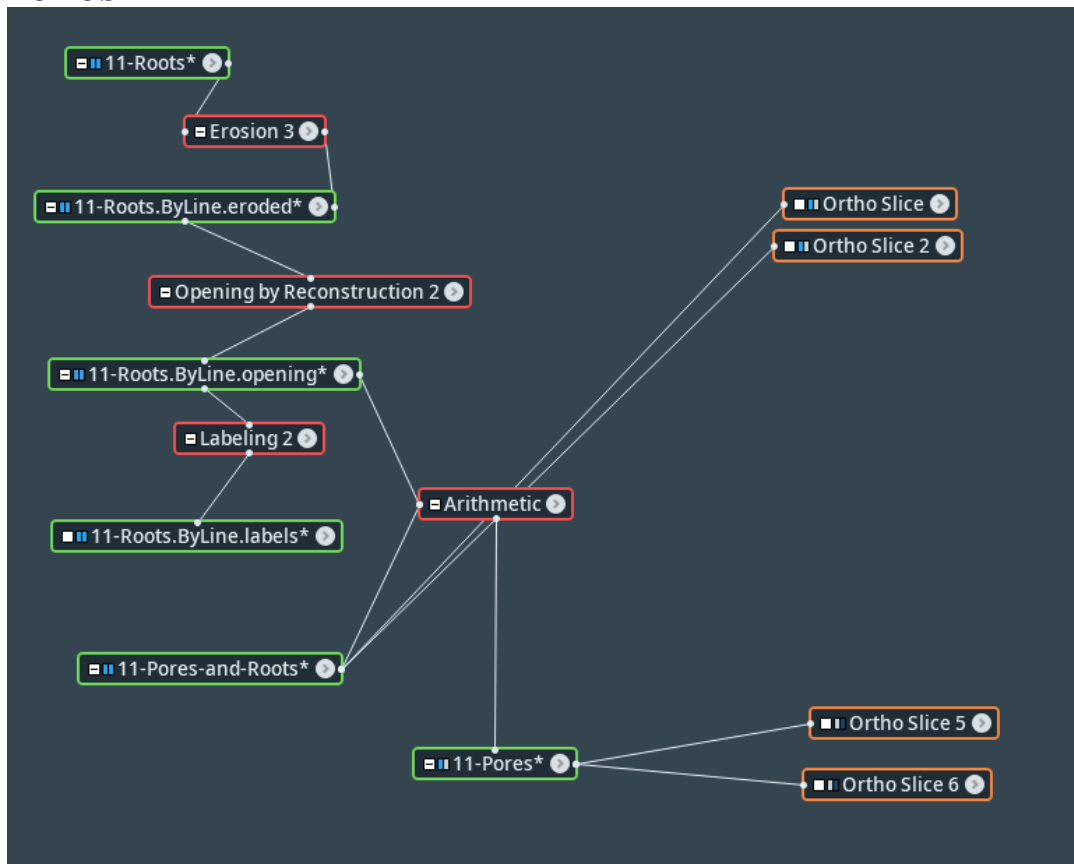
ANEXO 1 – AMOSTRA DE FLUXO DE TRABALHO INICIAL



ANEXO 2 – RECONSTRUÇÃO DOS POROS POR MÓDULO DE FILTRAGEM DA IMAGEM.



ANEXO 3 – FLUXO DE TRABALHO PARA OBTER RAÍZES E FASE INICIAL DE POROS



4 DISCUSSÃO INTEGRADA

As variáveis obtidas com tomografia e as obtidas nas amostras dos anéis nas camadas de 0-0,1 e 0-0,2 m foram correlacionadas (Tabela 2). De maneira geral, as correlações foram fracas e apenas três correlações foram significativas. Houve correlação da MI com a dimensão fractal (0,60) na camada 0-10 cm, com o volume de poros isolados (-0,65) e com poros isolados (-0,65) na camada 10-20 cm.

Embora as variáveis determinadas com tomografia computadorizada se correlacionaram fracamente com as variáveis macroscópicas da estrutura do solo e com as relacionadas ao fluxo de ar e água, os dois conjuntos de variáveis indicaram que o uso das plantas de cobertura promove recuperação das propriedades e dos processos físico-hídricos do solo. Entre os quatro tratamentos investigados, no cultivo com guandú se observou mais melhorias na conectividade da porosidade e na distribuição do tamanho dos poros, parâmetros importantes para as funções do solo (Rabot et al., 2018).

As espécies feijão de porco, crotalaria e guandú, de modo geral, melhoraram a infiltração acumulada, macroporosidade e condutividade hidráulica. As imagens de tomografia evidenciaram quantidade grande de poros nesses tratamentos, o que favorece a condutividade hidráulica, trocas gasosas e retenção de água (Bronick & Lal, 2005; Rabot, Wiesmeier, Schlüter, & Vogel, 2018).

A tomografia computadorizada permite visualizar como a estrutura dos poros é afetada pelo manejo ou atividade biológica (Helliwell et al., 2013 ; Lucas, Schlüter, Vogel, & Vetterlein, 2019) e é uma ferramenta útil para aprofundar o conhecimento sobre formação, configuração e funcionalidade do sistema poroso do solo.

Tabela 2 – Correlação de Pearson entre os dados de TC (variáveis na primeira coluna) com as propriedades físico-hídricas do Artigo I (variáveis na primeira linha).

| | Ka10 | Ka100 | Ks | DS | MA | MI | PT |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|
| Camada 0-10 cm | | | | | | | |
| Poros total | -0,28 <i>0,37</i> | -0,33 <i>0,30</i> | -0,34 <i>0,28</i> | 0,25 <i>0,44</i> | -0,01 <i>0,99</i> | 0,53 <i>0,08</i> | 0,28 <i>0,39</i> |
| Volume poros total | -0,34 <i>0,28</i> | -0,36 <i>0,25</i> | -0,39 <i>0,21</i> | 0,26 <i>0,42</i> | -0,01 <i>0,98</i> | 0,54 <i>0,07</i> | 0,28 <i>0,38</i> |
| Volume poros isolados | -0,08 <i>0,80</i> | 0,10 <i>0,76</i> | -0,03 <i>0,93</i> | -0,25 <i>0,44</i> | 0,22 <i>0,50</i> | -0,02 <i>0,94</i> | 0,25 <i>0,43</i> |
| Poros isolados | -0,07 <i>0,83</i> | 0,10 <i>0,75</i> | -0,02 <i>0,95</i> | -0,25 <i>0,44</i> | 0,21 <i>0,51</i> | -0,03 <i>0,93</i> | 0,24 <i>0,45</i> |
| Número de Euler | 0,03 <i>0,92</i> | -0,50 <i>0,10</i> | -0,21 <i>0,51</i> | -0,07 <i>0,82</i> | -0,14 <i>0,67</i> | 0,06 <i>0,85</i> | -0,13 <i>0,68</i> |
| Dimensão Fractal | -0,42 <i>0,17</i> | -0,34 <i>0,28</i> | -0,48 <i>0,12</i> | 0,30 <i>0,34</i> | -0,06 <i>0,84</i> | 0,60* <i>0,04</i> | 0,24 <i>0,45</i> |
| Tortuosidade | 0,17 <i>0,61</i> | 0,24 <i>0,44</i> | 0,26 <i>0,42</i> | -0,10 <i>0,77</i> | 0,09 <i>0,79</i> | -0,25 <i>0,44</i> | -0,03 <i>0,94</i> |
| Camada 10-20 cm | | | | | | | |
| Poros total | -0,16 <i>0,61</i> | 0,28 <i>0,39</i> | 0,23 <i>0,47</i> | 0,05 <i>0,88</i> | -0,03 <i>0,93</i> | 0,22 <i>0,50</i> | 0,16 <i>0,62</i> |
| Volume poros total | -0,20 <i>0,53</i> | 0,26 <i>0,42</i> | 0,18 <i>0,58</i> | 0,07 <i>0,82</i> | -0,05 <i>0,87</i> | 0,23 <i>0,47</i> | 0,13 <i>0,68</i> |
| Volume poros isolados | 0,08 <i>0,80</i> | -0,18 <i>0,57</i> | 0,12 <i>0,71</i> | -0,53 <i>0,08</i> | 0,52 <i>0,09</i> | -0,65* <i>0,02</i> | 0,29 <i>0,36</i> |
| Poros isolados | 0,08 <i>0,79</i> | -0,19 <i>0,56</i> | 0,13 <i>0,70</i> | -0,53 <i>0,08</i> | 0,52 <i>0,08</i> | -0,65* <i>0,02</i> | 0,29 <i>0,36</i> |
| Número de Euler | 0,34 <i>0,28</i> | 0,24 <i>0,45</i> | 0,21 <i>0,52</i> | -0,21 <i>0,51</i> | 0,22 <i>0,49</i> | -0,05 <i>0,88</i> | 0,33 <i>0,29</i> |
| Dimensão Fractal | -0,31 <i>0,33</i> | 0,17 <i>0,59</i> | 0,01 <i>0,97</i> | 0,17 <i>0,59</i> | -0,16 <i>0,61</i> | 0,32 <i>0,32</i> | 0,01 <i>0,97</i> |
| Tortuosidade | 0,08 <i>0,80</i> | -0,13 <i>0,69</i> | 0,07 <i>0,83</i> | -0,26 <i>0,42</i> | 0,11 <i>0,74</i> | -0,39 <i>0,21</i> | -0,19 <i>0,56</i> |

PT = porosidade total, MI = microporosidade, MA = macroporosidade, DS = densidade do solo, Ks = condutividade hidráulica de solo saturado, Ka10 = permeabilidade ao ar a 10 kPa de tensão matricial, Ka100 = permeabilidade ao ar a 100 kPa de tensão matricial.

* significativo e ns não significativo a 5% de probabilidade de erro. Números em itálico e cor cinza são o valor de p.

5 CONCLUSÃO GERAL

Os resultados dos dois estudos indicam que o uso de plantas de cobertura inserido no manejo do solo pode modificar o sistema poroso do solo. As análises físicas tradicionais e a tomografia computadorizada são ferramentas que auxiliam para o adequado manejo e uso do solo.

O estudo mostra tendências que as espécies vegetais podem promover biologicamente a descompactação do solo. A continuidade do estudo será necessária com a investigação de quais variáveis adicionais da estrutura do solo poderia fornecer diagnóstico mais preciso.

REFERÊNCIAS

- RABOT, E., WIESMEIER, M., SCHLÜTER, S., & VOGEL, H.-J. (2018). **Soil structure as an indicator of soil functions: A review.** *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.
- BRONICK, C. J., & LAL, R. (2005). **Soil structure and management: A review.** *Geoderma*, 124, 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.
- SCHLÜTER, S., GROßMANN, C., DIEHL, J., WU, G.-M., TISCHER, S., DEUBEL, A., & RÜCKNAGEL, J. (2018). **Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties.** *Geoderma*, 332, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.001>.
- LUO, L., LIN, H., & SCHMIDT, J. (2010). **Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport.** *Soil Science Society of America Journal*, 74, 1929–1937. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0062>.
- ZHANG, Z., LIU, K., ZHOU, H., LIN, H., LI, D., & PENG, X. (2019). **Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography.** *Journal of Hydrology*, 571, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.041>.
- HELLIWELL, J. R., STURROCK, C. J., GRAYLING, K. M., TRACY, S. R., FLAVEL, R. J., YOUNG, I. M., ... MOONEY, S. J. (2013). **Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: A review.** *European Journal of Soil Science*, 64, 279–297. <https://doi.org/10.1111/ejss.12028>.
- LUCAS, M., SCHLÜTER, S., VOGEL, H.-J., & VETTERLEIN, D. (2019). **Soil structure formation along an agricultural chronosequence.** *Geoderma*, 350, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.04>