

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

Jéssica Silveira França

**RESISTÊNCIA DO SOLO COM CULTIVO DE ERVA-MATE E
PLANTAS DE COBERTURA**

Santa Maria, RS

2021

Jéssica Silveira França

**RESISTÊNCIA DO SOLO COM CULTIVO DE ERVA-MATE E PLANTAS DE
COBERTURA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutora em Ciência do Solo**

Orientador: Prof. Dr. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001

França, Jéssica Silveira
Resistência do solo com cultivo de erva-mate e plantas de cobertura / Jéssica Silveira França.- 2021.
114 p.; 30 cm

Orientador: Dalvan José Reinert
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2021

1. Manejo do solo 2. Estabilidade estrutural 3. Propriedades físico-mecânicas 4. Cobertura vegetal 5. Cultura perene I. Reinert, Dalvan José 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, JÉSSICA SILVEIRA FRANÇA, 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.

Jéssica Silveira França

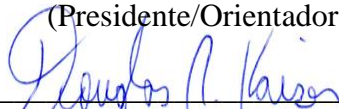
**RESISTÊNCIA DO SOLO COM CULTIVO DE ERVA-MATE E PLANTAS DE
COBERTURA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutora em Ciência do Solo**

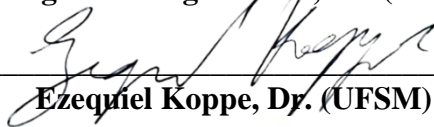
Aprovado em 27 de agosto de 2021:



Dalvan José Reinert, Dr.
(Presidente/Orientador)



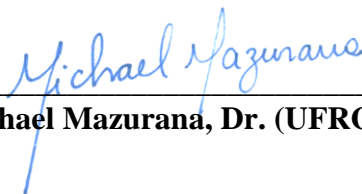
Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)



Ezequiel Koppe, Dr. (UFSM)



Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki, Dr. (UFPEL)



Michael Mazurana, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, RS
2021

Dedico a Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me ampara diariamente diante de cada dificuldade enfrentada, renova minhas forças e energias para seguir no caminho escolhido. Por me abençoar com saúde, bem mais importante que podemos ter, especialmente durante a fase que enfrentamos desde o início do ano de 2020, a pandemia causou muita tristeza, angústias e ansiedade. Esperamos superá-la o mais breve possível para nos tranquilizarmos.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pela oportunidade de ensino público e gratuito, e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pelo ensino proporcionado neste período e pela possibilidade de realização do trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, tornando possível a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Dalvan José Reinert pela oportunidade de sua orientação, pela disponibilização para auxílio e ensinamentos e pela confiança para realizar o doutorado.

Agradeço ao técnico responsável pelo laboratório de física solo da UFSM, Flávio Fontinelli pela ajuda para realização das análises, pela grande amizade construída neste período e pelos conselhos diários. E ao secretário do PPGCS, Heverton, sempre atencioso para auxílio em questões burocráticas.

Agradeço aos atuais e ex-colegas do Laboratório de Física do Solo pela oportunidade de convivência e troca de experiências. Alguns em especial por contribuírem com o estudo, mas também pelas palavras e momentos alegres, Alan Batistão, Giordana Abreu, Jânio Barbosa, Jussara Santoli e Letiéri da Rosa. As colegas, Caroline Andrade Pereira e Francieli de Vargas, pelo apoio, amizade e pela nossa alegre convivência, essenciais neste período, principalmente para permanecer firme neste propósito.

Ao aluno de iniciação científica William Pereira Costa, que me auxiliou no campo e no laboratório.

Agradeço à minha mãe que sempre esteve comigo, acreditando que a educação é primordial e valiosa, sendo um meio para tornar o indivíduo melhor para a sociedade.

Agradeço à minha família pelo apoio e preocupação durante este período.

Agradeço ao meu companheiro William Oliveira de Castro, por estar sempre ao meu lado, pela sua compreensão, seu apoio e incentivo em momentos difíceis e de desânimo.

A todos que não foram mencionados, mas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

RESUMO

RESISTÊNCIA DO SOLO COM CULTIVO DE ERVA-MATE E PLANTAS DE COBERTURA

AUTORA: Jéssica Silveira França
ORIENTADOR: Dalvan José Reinert

O manejo inadequado nos sistemas de produção pode ocasionar a degradação dos solos, pela erosão, perda de carbono orgânico e ainda pelo processo de compactação, que é uma das principais formas de comprometer sua estrutura. A suscetibilidade do solo à degradação está relacionada com sua resistência estrutural. Diante da constante degradação dos solos ocasionada principalmente pelo uso e manejo inadequados, torna-se necessário a adoção de práticas de manejo nos sistemas produtivos que preservem a multifuncionalidade do solo, visando sua conservação, a fim de evitar a degradação e a perda da capacidade de produção. O uso de plantas de cobertura é uma estratégia de manejo amplamente utilizada para manutenção da capacidade produtiva em áreas agrícolas, especialmente pelos seus benefícios na fertilidade e possível melhoria da qualidade física do solo. Contudo, em áreas de cultivo de plantas perenes, como a erva-mate, que compreende um sistema sem mobilização do solo e de operações de tráfego reduzidas, a indicação do uso de plantas de cobertura ainda é limitado. O objetivo do estudo foi avaliar se o uso de plantas de cobertura consorciada com erva-mate (*Ilex paraguariensis*), em área sem mobilização do solo modifica os parâmetros físico-mecânicos que conferem maior resistência ao solo. O experimento foi implantado em 2014, e consistiu no consórcio de plantas de cobertura com a erva-mate, em delineamento de blocos ao acaso, com quatro blocos e quatro tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia-preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE). No ano de 2019, amostras com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 1-4 cm e 10-14 cm para determinação de propriedades físico-mecânicas e permeabilidade do solo ao ar. O teor de carbono orgânico do solo foi determinado para análise de correlação com as propriedades de compressibilidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento. A distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água foi avaliada apenas para a camada de 1-4 cm. A resistência do solo à penetração foi determinada no campo até 30 cm de profundidade. O uso de plantas de cobertura não ocasionou alterações nos parâmetros físicos e mecânicos em relação à vegetação espontânea. É válido destacar que as plantas de cobertura estão estabelecidas há cinco anos, tempo que pode ser insuficiente para promover alterações significativas nestes parâmetros. Os valores dos índices DMP e DMG foram altos (> 2 mm) para todas as coberturas avaliadas, indicando estabilidade estrutural dos agregados neste sistema. Altos valores de resistência foram observados por meio dos parâmetros mecânicos. Essa maior resistência do solo não comprometeu sua funcionalidade, como observada pela avaliação da permeabilidade ao ar, a qual resultou em valores apropriados para todos os tratamentos, nas duas camadas avaliadas. Neste sistema, as plantas de cobertura e a vegetação espontânea proporcionaram melhorias no solo, principalmente relacionadas a sua estrutura. Com isso, condições estruturais mais adequadas são estabelecidas para favorecer a produção da cultura perene. Assim, a funcionalidade do solo é mantida em sistemas sem revolvimento associado ao uso de cobertura vegetal, permitindo conciliar a produção com a preservação ambiental.

Palavras-chave: Cobertura vegetal. Conservação do solo. Cultura perene. Estabilidade estrutural. Propriedades físico-mecânicas.

ABSTRACT

RESISTANCE IN SOIL WITH YERBA MATE CULTIVATION AND COVER CROP

AUTHOR: Jéssica Silveira França
ODVISOR: Dalvan José Reinert

Improper management in production systems can lead to soil degradation, by erosion, loss of organic carbon and even by the compaction process, which is one of the main ways of compromising its structure. The soil susceptibility to degradation is related to its structural strength. Given the constant degradation of soils caused mainly by improper use and management, it is necessary to adopt management practices in the productive systems that preserve the multifunctionality of the soil, aiming its conservation, in order to avoid degradation and loss of production capacity. The use of cover crops is a widely used management strategy to maintain productive capacity in agricultural areas, especially for their benefits in fertility and possible improvement in the soil physical quality. However, in areas of perennial plant cultivation, such as yerba mate, which comprises a system without soil mobilization and reduced traffic operations, the indication for the use of cover crops is still limited. The objective of the study was to evaluate whether the use of cover crops intercropped with yerba mate (*Ilex paraguariensis*) in an area without soil mobilization modifies the physical-mechanical parameters that provide greater soil resistance. The experiment was implanted in 2014, and consisted in the intercropping of cover crops with yerba mate, in a randomized block design, with four blocks and four treatments: forage peanut (AM.F), black oat + vetch and cowpea (AP.E.F), perennial soybean (SP) and spontaneous vegetation (VE). In the year of 2019, samples with preserved structure were collected in the layers 1-4 cm and 10-14 cm to determine physical-mechanical properties and soil air permeability. Soil organic carbon content was determined for correlation analysis with compressibility properties and shear strength parameters. The distribution of the size of the stable aggregates in water was evaluated only for the 1-4 cm layer. The soil resistance to penetration was determined in the field up to 30 cm deep. The use of cover crops did not cause changes in physical and mechanical parameters in relation to spontaneous vegetation. It is worth noting that the cover crops have been established for five years, a time that may be insufficient to promote significant changes in these parameters. The values of the DMP and DMG indexes were high (> 2 mm) for all the evaluated cover crops, indicating structural stability of the aggregates in this system. High strength values were observed through the mechanical parameters. This greater soil resistance did not compromise its functionality, as observed by the air permeability assessment, which resulted in appropriate values for all treatments, in the two evaluated layers. In this system, cover crops and spontaneous vegetation provided improvements in the soil, mainly related to its structure. With this, more adequate structural conditions are established to favor the production of the perennial culture. Thus, the functionality of the soil is maintained in systems without mobilization associated with the use of vegetation cover, allowing to reconcile production with environmental preservation.

Keywords: Vegetation cover. Soil conservation. Perennial culture. Structural stability. Physical-mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Croqui da área experimental com os tratamentos.	42
Figura 2 – Disposição das árvores de erva-mate na área experimental.....	43
Figura 3 – Imagem da área experimental com os tratamentos.	45
Figura 4 – Plantas de cobertura do solo do período outono/inverno, aveia preta e ervilhaca (a) e planta de cobertura do período primavera/verão, feijão miúdo (b).	45
Figura 5 – Plantas de cobertura do solo, amendoim forrageiro (a) e soja perene (b).....	45
Figura 6 – Vegetação espontânea predominante na área experimental cultivada com erva-mate.	46
Figura 7 – Coleta de amostras com estrutura preservada com anéis metálicos de 9,8 cm de diâmetro e 2,8 cm de altura (a) e anéis de 5,7 cm de diâmetro e 3 cm de altura (b).	47
Figura 8 – Área com cobertura de amendoim forrageiro, utilizada para coleta das amostras de solo.....	48
Figura 9 – Área com cobertura de soja perene, utilizada para coleta das amostras de solo.	48
Figura 10 – Amostra de solo com estrutura preservada, coletados na área com soja perene...	48
Figura 11 – Massa seca acumulada das plantas (kg ha^{-1}) em dois períodos de avaliação (novembro de 2018 e abril de 2019), nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.	58
Figura 12 – Nitrogênio total do solo (g kg^{-1}) avaliado nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), para as camadas 1-4 e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.....	58
Figura 13 – Carbono orgânico total do solo (g kg^{-1}) avaliado nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), para as camadas 1-4 e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.	62
Figura 14 – Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados estáveis em água, avaliado nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), na camada de 1-4 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.....	65
Figura 15 – Diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados estáveis em água, avaliado nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), na camada de 1-4 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.	66
Figura 16 – Distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água, avaliada nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja	

- perene (SP) e vegetação espontânea (VE) na camada de 1-4 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. 67
- Figura 17 – Permeabilidade do solo ao ar (μm^2) avaliada em amostras submetidas à tensão de água de 10 kPa para os tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), para as camadas de 1-4 cm (A) e 10-14 cm (B) em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. 69
- Figura 18 – Resistência do solo à penetração (MPa), avaliada nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), nas camadas de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. ns: não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 70
- Figura 19 – Umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) avaliada nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), nas camadas de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Barra horizontal indica a diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade; ns: não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 71
- Figura 20 – Resistência do solo à penetração (MPa) medida em uma transeção de 2 m com a planta de erva-mate, na metade da distância (no zero da figura), avaliada nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. 76
- Figura 21 – Umidade gravimétrica do solo (g g^{-1}) no momento da avaliação da RP, para os tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade; ns: não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 77
- Figura 22 – Coesão do solo (kPa) em função do teor de carbono orgânico total (%) determinado com amostras das camadas 1-4 e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$). 81
- Figura 23 – Densidade do solo (g cm^{-3}) em função do teor de carbono orgânico total (%) determinado com amostras das camadas 1-4 e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$). 81
- Figura 24 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento para os tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), soja perene (SP), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F) e vegetação espontânea (VE), para as camadas de 1-4 cm (a) e 10-14 cm (b), em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. 85
- Figura 25 – Densidade do solo em função da macroporosidade em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$). 88

- Figura 26 – Pressão de preconsolidação em função da macroporosidade do solo em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$)..... 89
- Figura 27 – Pressão de preconsolidação em função da densidade do solo (a) e do teor de carbono orgânico total (b) em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$)..... 90
- Figura 28 – Índice de compressão em função da densidade do solo (a) e do teor de carbono orgânico total (b) em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$)..... 91
- Figura 29 – Índice de recuperação em função da densidade do solo em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$)..... 93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1	ASPECTOS RELACIONADOS AO CULTIVO DA ERVA-MATE.....	17
3.2	PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO	19
3.1.1	Plantas de cobertura e o estoque de carbono do solo	26
3.3	INFLUÊNCIA DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL NA QUALIDADE DO SOLO	29
3.4	RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO.....	31
3.5	COMPRESSIBILIDADE E ELASTICIDADE DO SOLO.....	34
3.6	PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR	38
4	MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	40
4.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	42
4.3	DESCRIÇÃO DO PLANTIO OU SEMEADURA DAS PLANTAS DE COBERTURA	43
4.4	AVALIAÇÃO DA MASSA SECA DAS COBERTURAS DO SOLO	46
4.5	AVALIAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO.....	46
4.6	DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE AGREGADOS ESTÁVEIS EM ÁGUA	52
4.7	ANÁLISE TEXTURAL, DENSIDADE DE PARTÍCULAS, CARBONO TOTAL E NITROGÊNIO TOTAL DO SOLO	54
4.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	56
5.2	DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS AGREGADOS ESTÁVEIS EM ÁGUA	62
5.3	PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR	67
5.4	RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	70
5.5	RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO A CAMPO.....	73
5.6	RESISTÊNCIA DO SOLO AO CISALHAMENTO.....	77
5.7	PROPRIEDADES DE COMPRESSIBILIDADE E ELASTICIDADE DO SOLO	86
6	CONCLUSÕES	96
	REFERÊNCIAS	98
	APÊNDICES	113

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que um terço dos solos do mundo estão moderadamente ou altamente degradados, devido a processos como compactação, erosão, salinização e perda de carbono orgânico (DAVIES, 2017). Nos últimos 50 anos, houve uma intensificação na produção de alimentos no Brasil, causando uma grande expansão das áreas cultivadas, principalmente sobre as áreas nativas, com intensa exploração do solo acelerando o processo de degradação, por meio da erosão hídrica e eólica, compactação, diminuição da matéria orgânica e da fertilidade dos solos (WINGEYER et al., 2015). O principal motivo associado à degradação dos solos é o manejo inadequado que reflete em perda de sua qualidade (WINGEYER et al., 2015).

Sistemas de manejo inadequados, cultivo intensivo do solo, tráfego de máquinas e implementos e o pisoteio animal em condições inadequadas de umidade podem aumentar o estado de compactação do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005). Esse processo causa deformações no solo e conseqüentemente resulta em modificações na sua estrutura, alterando a continuidade e conectividade do espaço poroso, refletindo na diminuição dos fluxos de água e ar, que pode ocasionar danos severos ao crescimento das plantas e reduz a produtividade das culturas de interesse (HORN, 2003). Pode causar ainda diminuição da infiltração de água no solo e conseqüentemente do seu armazenamento, aumento da resistência do solo à penetração, implicando em restrição ao crescimento radicular (REICHERT et al., 2007).

Aliado a estes cenários, a redução do conteúdo de matéria orgânica pode agravar a degradação dos solos (HAMZA; ANDERSON, 2005). Uma das alternativas para manter um adequado conteúdo de matéria orgânica no solo consiste na utilização de plantas de cobertura. A manutenção de cobertura vegetal no solo permite melhorar sua estrutura, (ARGENTON et al., 2005) aumentar a capacidade de armazenamento de água no solo (DEDECEK, 1997), o aporte de material orgânico (SILVA et al., 2007), além de proteger o solo dos processos erosivos e desta forma, promover aumento da produtividade.

Além do uso de plantas de cobertura em áreas de produção com culturas anuais, é uma estratégia que pode ser utilizada em cultivos perenes, pois proporcionam diversos benefícios ao ambiente, como a manutenção ou até mesmo a elevação dos teores de matéria orgânica do solo, em virtude do aporte contínuo de resíduos. E ainda, melhoram a estrutura do solo em função da massa de raízes e das substâncias orgânicas por elas produzidas, auxiliando na formação e estabilização dos agregados, especialmente nos cultivos realizados em áreas sob terrenos declivosos e solos arenosos.

Além disso, é possível que o uso de plantas de cobertura em cultivos perenes associado a ausência de mobilização contribua para aumentar a resistência do solo à degradação estrutural, com influência na funcionalidade do sistema poroso e no desenvolvimento de plantas. Deste modo é necessário ampliar o conhecimento a respeito das propriedades físico-mecânicas e do comportamento do solo, com o intuito da adoção de plantas de cobertura em cultivos perenes.

A estrutura, embora não seja um indicativo direto da qualidade do solo, influencia propriedades físicas que viabilizam o seu adequado funcionamento de modo que proporcione aumento de sua qualidade. E influencia seu comportamento mecânico, pois quantitativamente, a resistência do solo é definida como a máxima tensão que ele pode suportar sem falhar (HILLEL, 1998), ou seja, sua estrutura permanecerá estável se a tensão aplicada ao solo for menor que sua resistência. Ou ainda, a resistência é a capacidade do solo de resistir à pressão aplicada sem perder sua qualidade estrutural (MAZURANA et al., 2017).

Algumas pesquisas buscaram a compreensão da relação do uso e manejo do solo com a modificação de parâmetros físicos e mecânicos em áreas sob plantio direto com culturas anuais, Braida et al. (2008), Mengtes et al. (2013) e Reichert et al. (2018). Contudo, em sistemas sem revolvimento e com adição contínua de resíduos pelas plantas de cobertura, pode ocorrer a maximização da melhoria da estrutura do solo. Com isso, pode possibilitar a diminuição da densidade, menor resistência à penetração de raízes e a criação de uma rede de poros mais contínuos e orientados como observado em sistemas de plantio direto de longo prazo por Abreu et al. (2004). Somado a isso, pode modificar algumas propriedades mecânicas, como a elasticidade, que normalmente é desconsiderada em modelos que avaliam a deformação do solo.

A matéria orgânica é um dos fatores responsáveis pela manutenção das condições físicas e mecânicas do solo, pois ela tem efeitos sobre a formação e estabilização dos agregados (BRAIDA et al., 2011; SILVA, L. et al., 2006; TISDALL; OADES, 1982), influenciando na resistência do solo. Todavia, a influência da matéria orgânica sobre as propriedades mecânicas do solo e como afeta a variação da resistência dos solos não está esclarecido. Assim, também é necessário compreender os efeitos da matéria orgânica sobre o comportamento mecânico do solo, pois auxiliam no entendimento da resistência a partir da aplicação de forças externas.

O aumento do desenvolvimento da estrutura permite que a resistência do solo se intensifique, uma vez que resulta em aumento dos parâmetros de resistência como coesão e ângulo de atrito interno, influenciando na resistência ao cisalhamento (BRAIDA et al., 2007). Além disso, a matéria orgânica pode proporcionar aumento da elasticidade do solo.

Outra colaboração do uso de plantas de cobertura ocorre por meio das raízes que possuem considerável contribuição na formação e estabilização dos agregados, mas também

propiciam reforço mecânico ao solo devido a sua própria resistência. Mickovski et al. (2009) investigaram o reforço mecânico no solo produzido pelas raízes e concluíram que o solo com raízes proporcionou aumento significativo na resistência ao cisalhamento em comparação ao solo em pousio.

Deste modo, o uso de plantas de cobertura pode influenciar na alteração dos parâmetros mecânicos, resultando em aumento da resistência com consequências sobre as variações do espaço poroso do solo. No entanto, é importante destacar que os benefícios do uso de plantas aumentam com o tempo de adoção da prática, uma vez que as transformações que ocorrem no solo são lentas.

Neste sentido, é necessário conhecer o comportamento do solo em sistemas com culturas perenes, como a erva-mate em consórcio com plantas de cobertura, no qual não há revolvimento. Por meio da avaliação dos parâmetros físico-mecânicos do solo em cultivos perenes com o uso de plantas de cobertura, é possível conhecer a respeito da resistência do solo, principalmente quando esse é submetido a forças que tendem a deformá-lo, de modo que seja uma alternativa para melhorar sua qualidade estrutural, oferecendo melhores condições para o desenvolvimento das plantas.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar se o uso de plantas de cobertura consorciadas com erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.), em área sem revolvimento do solo modifica os parâmetros físico-mecânicos que conferem maior resistência ao solo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Avaliar se o uso de plantas de cobertura após o período de cinco anos associado a ausência de mobilização do solo em área com erva-mate altera as propriedades físicas e a funcionalidade do sistema poroso do solo.
- ii. Avaliar o efeito de diferentes plantas de cobertura na estabilidade e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, visando gerar conhecimento para uso em áreas suscetíveis a degradação.
- iii. Investigar o processo de compressão e o percentual de recuperação do solo (elasticidade) em sistema com cultura perene (erva-mate) consorciada com plantas de cobertura associado a ausência de mobilização.
- iv. Avaliar a relação entre o conteúdo de carbono e o comportamento dos parâmetros físicos e mecânicos do solo neste sistema sem revolvimento e com adição de resíduos vegetais, condição que possivelmente preserva a estrutura e a funcionalidade do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ASPECTOS RELACIONADOS AO CULTIVO DA ERVA-MATE

Ao longo dos anos nota-se um aumento da degradação ambiental, principalmente relacionada ao uso e manejo inadequados do solo, ocasionado pela expansão e intensificação da produção agrícola e florestal. Em função disso, é necessário dispor de um novo pensamento a respeito do modo de produção atual, a fim de minimizar a degradação, mas com o intuito de aumentar a produtividade das culturas e realizar melhor uso da área cultivada. Alternativas de uso mais sustentáveis para os sistemas, com melhor utilização dos recursos naturais devem ser avaliadas. Conciliar a produção com o uso sustentável dos recursos naturais é imprescindível.

Diante desse contexto, verifica-se a relevância de estudos relacionados as possibilidades de manejo no sistema da erva-mate, pois apesar do cultivo dessa espécie abranger pequenas áreas, é uma cultura fundamental para a economia dos municípios do sul do Brasil, além do principal produto não madeireiro do agronegócio florestal (PENTEADO JÚNIOR; GOULART, 2019). Acrescenta-se que normalmente a adoção de boas práticas de manejo são desconsideradas, o que resulta em baixa produtividade dos ervais.

Contudo, o Brasil se destaca no setor de produção de erva-mate. Pesquisas relacionadas a produção dessa cultura são realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os quais vem demonstrando valores bastantes positivos. De acordo com a origem da produção da erva-mate são realizadas duas pesquisas de dados, uma referente a produção agrícola municipal (PAM), ou seja, a erva-mate cultivada e a outra referente a produção dos ervais nativos ou sombreados, cuja erva-mate é produzida entre a floresta nativa, denominada produção da extração vegetal e da silvicultura (PEVS). No ano de 2020, conforme levantamento da PAM foram produzidas 527.546 toneladas de erva-mate (IBGE, 2020a) e na PEVS foram produzidas 425.970 toneladas de erva-mate (IBGE, 2020b).

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é uma espécie arbórea, nativa da América do Sul, pertencente à família Aquifoliaceae, de significativo valor econômico, cultural e ambiental especialmente para a região sul do Brasil. É comum nestas regiões a diversidade de situações dos ervais, nativos ou plantados, reflexo dos distintos manejos utilizados pelos produtores, o que configura diferentes paisagens e implica em distintas capacidades de contribuição para a conservação ambiental (MARQUES et al., 2019).

A maior parte da produção de erva-mate tem origem na agricultura familiar, assim, o incentivo a esta atividade contribui para a renda dos pequenos produtores, estimulando o trabalho no campo e a permanência das famílias nestas regiões. A produção de erva-mate é uma fonte de renda segura, que gera recursos consideráveis para as famílias da região sul, sem necessitar de um alto investimento. Mais do que um ganho econômico, possui significado cultural, pois consiste em uma atividade ligada à agricultura familiar, às tradições e a história das famílias.

Neste contexto, é interessante destacar que as formas mais usuais de consumo da erva-mate são o chimarrão, o tererê e os chás. Também é utilizada na composição de produtos de higiene, limpeza, cosméticos e bebidas. Além disso, outros produtos e formas de uso estão em desenvolvimento (GOULART, 2020). Nos últimos anos houve um aumento na demanda por estes produtos, refletindo na expansão do consumo da erva-mate, principalmente no mercado internacional, em função dos diversos benefícios para saúde humana associados ao seu uso (GAN et al., 2018).

Em relação ao manejo, o uso de coberturas vegetais é indicado para o sistema de erva-mate (PENTEADO JÚNIOR; GOULART, 2019). Apesar disso, a maioria dos produtores não utilizam e preferem deixar o erval sem cobertura vegetal (GOULART, 2020), situação que favorece o surgimento de plantas daninhas e o processo de erosão do solo. O cultivo de plantas de cobertura tem como propósito melhorar a produtividade da erva-mate, mas elas também podem ser utilizadas neste sistema para outras finalidades. Além dos múltiplos benefícios associados ao uso de plantas de cobertura, seu uso consiste em uma possibilidade de diversificação na produção neste sistema, que permite a obtenção de renda adicional. Logo, o incremento de renda dos produtores gera estímulo ao desenvolvimento nestas regiões e melhoria da qualidade de vida.

Com este propósito, há uma variedade de culturas que podem ser consorciadas com a erva-mate, sem prejudicar sua sobrevivência e desenvolvimento e apresentam como vantagem as diversas formas de utilização (MEDRADO et al., 2000). A aveia por exemplo, é uma das principais culturas utilizadas no sul do Brasil, na exploração agrícola, e seu cultivo é realizado com as finalidades de cobertura verde ou morta, formação de pastagens de inverno para pastejo direto e/ou elaboração de feno e de silagem e ainda na produção de grãos (FEDERIZZI et al., 2014). Além da aveia, há uma variedade de plantas de cobertura que cumprem estas funções e podem ser usadas no consórcio com a erva-mate.

Outra planta promissora para o consórcio é o amendoim forrageiro, pois possui múltiplas formas de utilização. Na forma de alimentação para o gado é uma excelente opção,

pois é uma leguminosa com elevado valor nutritivo devido ao alto teor de proteína em sua composição, assim, produz forragem de boa qualidade, resultando no alto consumo pelos animais em pastejo e no seu ganho de peso (VALENTIM; MOREIRA, 2001).

Neste contexto, uma alternativa sustentável que vem agregar a esta ideia de associação da erva-mate com outras culturas são os sistemas agroflorestais. Os quais consistem em sistemas produtivos de consórcio entre árvores e plantas cultivadas e/ou pecuária em determinado arranjo, com objetivo de realizar a utilização mais eficiente dos recursos naturais. Além disso, geram renda e segurança alimentar, fornecem serviços ecossistêmicos, como preservação da biodiversidade, controle da erosão, aumento do estoque de carbono, ciclagem de nutrientes, fixação biológica de nitrogênio e outros (COELHO, 2017).

Com base no exposto, a adoção desses manejos para o cultivo da erva-mate, constituem-se em uma estratégia que tem por finalidade melhorar a produção, mas também contribuir para a melhoria da qualidade ambiental. Desta forma, considera-se o uso de plantas de cobertura do solo como uma prática conservacionista, capaz de aumentar a produtividade dos plantios florestais e uma opção de diversificação do sistema, como uma forma de incrementar a renda dos produtores.

3.2 PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO

Diante da constante degradação dos solos ocasionada principalmente pelo uso e manejo inadequados, torna-se necessário a adoção de medidas pelos sistemas produtivos que preservem a multifuncionalidade do solo, visando sua conservação, de modo a evitar a degradação e perda da capacidade de produção.

Neste contexto, o uso de plantas de cobertura se destacam, pois contribuem para melhoria da qualidade do solo, devido aos benefícios nas propriedades químicas, físicas e biológicas. As plantas de cobertura são cultivadas principalmente com a finalidade de fornecer condições mais adequadas para a cultura econômica, como a cobertura do solo, a melhoria da fertilidade, ciclagem de nutrientes e ainda supressão das plantas daninhas (OGILVIE et al., 2021). Entretanto, seu cultivo também é realizado com outras finalidades, como uma alternativa mais sustentável para diversificar a produção e aumentar a renda proveniente destes sistemas.

O cultivo de plantas de cobertura tornou-se de maior interesse devido ao seu potencial de fornecer serviços ecológicos em sistemas agrícolas ou florestais (ABDALLA et al., 2019). Esta estratégia promove ainda a melhoria das propriedades físicas, como a redução da compactação, melhoria na distribuição do tamanho de poros, maior estabilidade de agregados,

formação de bioporos e assim, criam condições favoráveis ao desenvolvimento de culturas anuais ou perenes.

Plantas de cobertura são definidas como culturas de pequeno porte que fornecem proteção e melhoramento do solo entre os períodos de produção agrícola ou entre árvores em pomares e videiras, quando são incorporadas ao solo, podem ser referidas como adubo verde (SSSA, 2008). Seu cultivo pode compreender uma única espécie ou a mistura de espécies, gramíneas, leguminosas ou a mistura delas e há a possibilidade de escolha de plantas anuais ou perenes. É desejável a seleção de plantas de cobertura com alto potencial de produção de fitomassa e de acúmulo de carbono (C) e nitrogênio (N) (DONEDA et al., 2012).

A taxa de decomposição de resíduos vegetais está associada à relação carbono/nitrogênio (C/N) do tecido das plantas. Deste modo, as gramíneas produzem resíduos culturais com alta relação C/N, em comparação à leguminosas, as quais produzem resíduos com baixa relação C/N, conseqüentemente, a taxa de decomposição dos seus resíduos é maior comparada com as gramíneas. Isso porque a atividade dos microrganismos decompositores é influenciada pela disponibilidade de N no solo, e seu aumento favorece a taxa de decomposição dos resíduos. Assim, é comum que o uso de gramíneas facilitem a imobilização de N no solo pelos microrganismos, com menor disponibilidade de N às plantas, o que não é desejável.

Como citado anteriormente, as gramíneas produzem resíduos culturais com relação C/N alta, assim a decomposição dos resíduos sobre o solo é mais lenta, e conseqüentemente a liberação de nutrientes também é mais lenta. Por outro lado, o tempo de permanência dos resíduos sobre o solo é maior, contribuindo para sua proteção. Já o uso de plantas de cobertura leguminosas tem como principal característica o fornecimento de N ao solo, pelo processo de fixação biológica de nitrogênio, pois elas associam-se simbioticamente com bactérias que transformam o N₂ atmosférico em NH₃ (GIACOMINI et al., 2004). Em função disso, as leguminosas, possuem elevado teor de N nos tecidos e produzem resíduos com baixa relação C/N, de rápida decomposição e liberação dos nutrientes.

O consórcio entre espécies de plantas gramíneas e leguminosas é considerado uma boa estratégia, isso porque a relação C/N dos resíduos culturais dos consórcios entre espécies é intermediária àquela encontrada no tecido vegetal de espécies cultivadas isoladamente (DONEDA et al., 2012). O uso desta estratégia promove a decomposição dos resíduos e liberação dos nutrientes de forma gradual, além de proporcionar simultaneamente proteção do solo e fornecimento de N à cultura principal. Ressalta-se ainda, o resultado obtido por Giacomini et al. (2003), ao comparar o consórcio de aveia preta e ervilhaca comum, em relação

à leguminosa isolada, observaram produção de matéria seca superior no consórcio em 54, 20 e 76%, nos anos de 1998, 1999 e 2000, respectivamente.

Na área agrícola devido a expansão do plantio direto, especialmente no Sul no Brasil, ocorreu o aumento no interesse de consórcios de plantas de cobertura no período outono/inverno principalmente com o intuito de fornecimento de N à cultura comercial (GIACOMINI et al., 2004). O uso de plantas de cobertura pode aumentar a estabilidade de agregados, a porosidade e infiltração e retenção de água no solo, contribuir para atividade da população microbiana e promover a ciclagem de nutrientes (ABDALLA et al., 2019). Além disto, fornecem serviços ecossistêmicos como a redução da erosão, da compactação, aumento do estoques de carbono orgânico do solo, da biodiversidade, melhoram a qualidade da água e ocasionam a supressão de ervas daninhas (ABDALLA et al., 2019; OGILVIE et al., 2021).

Contudo, em áreas de cultivo de plantas perenes, como a erva-mate (*Ilex paraguariensis*), que compreende um sistema sem mobilização do solo e de operações de tráfego reduzidas, comportamento similar à outras culturas perenes, a indicação do uso de plantas de cobertura ainda é limitado. Todavia, nestes sistemas, o uso de cobertura vegetal viva associado a preservação das condições estruturais do solo podem possibilitar a maximização de benefícios, refletindo na sua resistência e na produtividade deste sistema.

Cultura perene ou cultura de ciclo longo são plantas que não necessitam ser replantadas após o término de um ciclo reprodutivo. Como exemplo podemos citar a erva-mate, as frutíferas, como café, limão, laranja que são plantas perenes de porte arbóreo ou arbustivo. Em geral, na produção de plantas perenes os tratos culturais, como a utilização de maquinários são reduzidos. As máquinas e implementos são utilizados para roçadas mecanizadas principalmente para o controle de plantas daninhas que competem por água e nutrientes e podem limitar o desenvolvimento da cultura perene e comprometer a sua produtividade.

Além disso, o alto custo com mão de obra para a colheita proporcionou o avanço de pesquisas voltadas para colheita mecanizada. Assim, apesar da colheita para maioria destas culturas ser realizada manualmente, sem a necessidade de máquinas, o avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento da colheita mecanizada para várias culturas perenes. Esta evolução no sistema de colheita pode ser observada em alguns pomares, vinhedos, cafezais e até mesmo nos ervais.

O uso de plantas de cobertura em consórcio com plantas comerciais, sejam anuais ou perenes, requer planejamento, especialmente para não haver competição por água, luz e nutrientes. Além do que, devem ser observadas as características das plantas de cobertura para implantação em cada sistema. Alguns atributos são sugeridos para as plantas de cobertura e

destacam-se: a facilidade na produção de sementes e no manejo, a elevada produção de massa seca e taxa de crescimento, ter um sistema radicular robusto e profundo, elevada capacidade ciclagem de nutrientes e ainda, não ser competidora (SILVA, P. et al., 2006).

Da família Poaceae ou Gramineae, a aveia preta (*Avena strigosa*) é uma das principais plantas de cobertura de inverno cultivadas no Sul do Brasil, principalmente antecedendo os cultivos de milho e soja. Seu uso intenso destaca-se principalmente devido à facilidade de aquisição de sementes e da implantação, proporciona rápida cobertura do solo, decomposição lenta dos resíduos e alto rendimento de matéria seca, possibilitando boa cobertura do solo (SILVA, P. et al., 2006).

Possui hábito de crescimento ereto, com sistema radicular fasciculado, possui efeito alelopático sobre plantas espontâneas, sua biomassa depositada sobre o solo forma cobertura mais estável, devido a maior relação C/N, com isto os resíduos permanecem por mais tempo no solo. Sua produção de matéria seca é de aproximadamente 2 a 8 t ha⁻¹ (ANGELETTI et al., 2018). Embora a aveia receba destaque, pode afetar o fornecimento de N e assim a produtividade das culturas, devido à elevada relação C/N, favorecendo o processo de imobilização de N, pela maior oferta de carbono no solo, com consequente redução do N para a cultura principal. Por isso, uma estratégia utilizada é o plantio consorciado de gramíneas e leguminosas, sendo o consórcio com a ervilhaca uma prática comumente adotada, principalmente em pomares e vinhedos (BRUNETTO et al., 2016).

A ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.), pertencente à família Fabaceae ou Leguminosae, é uma espécie anual, normalmente introduzida solteira ou consorciada com gramíneas, geralmente com a aveia preta ou branca. O interesse crescente de sua inclusão nos sistemas de produção é atribuído a disponibilização de N ao solo, devido sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio, reduzindo o uso de fertilizantes nitrogenados.

Suas raízes são profundas e ramificadas auxiliando na melhoria da estrutura do solo (FONTANELI et al., 2012). Com hábito de crescimento decumbente, ou seja, deitado sobre o solo com elevação na extremidade, e trepador, espécie de rápida decomposição, eficiente na supressão de plantas espontâneas, proporciona boa cobertura do solo, de fácil semeadura, sua produção de matéria seca é de aproximadamente 2 a 10 t ha⁻¹ (ANGELETTI et al., 2018).

O consórcio de aveia preta e ervilhaca proporcionou a produção de matéria seca da parte aérea de 3,8 t ha⁻¹ e 119,7 kg ha⁻¹ de N acumulado em estudo de Doneda et al. (2012). Em vinhedos na região da Campanha Gaúcha do RS, durante o período de inverno, a produção de massa seca do consórcio da aveia preta e ervilhaca foi de 3,14 t ha⁻¹ com 51 kg ha⁻¹ de N acumulado (BRUNETTO, et al., 2016).

Outra espécie usada como adubo verde, devido a eficiência na produção de biomassa é o feijão-miúdo (*Vigna unguiculata*), da família Fabaceae ou Leguminosae, também denominada feijão-caupi e feijão de corda, sendo uma espécie anual. Apresenta como vantagem de uso, seu rápido crescimento e desenvolvimento inicial. Assim, proporciona a formação de uma densa massa de folhas que favorecem a cobertura do solo, refletindo em maior sombreamento, o que ocasiona a diminuição da luminosidade e dificulta o surgimento de plantas daninhas. Seu modo de crescimento é ereto, possui sistema radicular profundo e ramificado, apresenta rusticidade, sendo altamente adaptado a solos com baixa fertilidade, possui também capacidade de adaptação à estresses térmicos, mas razoável à hídricos. No entanto, a deficiência de água pode comprometer sua produção de grãos, pois o estresse hídrico pode prejudicar os processos fisiológicos da planta (TAGLIAFERRE et al., 2013).

O feijão-miúdo é uma das leguminosas utilizadas para consumo humano no Norte e Nordeste do Brasil, devido ao alto teor de proteína nos grãos. Decorrente da grande quantidade de biomassa produzida é utilizada também para o pastejo do gado, pois apresenta boa palatabilidade e digestibilidade, se destacando como forrageira de verão para bovinos de leite na região Sul do Brasil. Sua produção de massa seca é de aproximadamente 5 a 7 t ha⁻¹ (FONTANELI et al., 2012) e pode fornecer ao solo 100 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio (BEVILAQUA et al., 2007). Além de ser cultivado como forrageira e para produção de grãos, é uma espécie indicada como planta de cobertura do solo em consórcios anuais (arroz, milho), semi-perenes (mandioca, cana de açúcar) ou intercalada a perenes (café e frutíferas).

Uma planta com grande potencial para uso como cobertura do solo em plantios de culturas perenes é o amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*), pertencente à família Fabaceae ou Leguminosae. É uma planta herbácea, perene, com hábito de crescimento rasteiro e estolonífero, que produz raízes nos nós em contato com o solo. O amendoim forrageiro forma uma rede bem estabelecida de raízes e estolões, em função disso, tem sido amplamente utilizado na conservação do solo para estabilização de taludes e margens de rodovias. Em praças e jardins, o uso do amendoim forrageiro como planta ornamental deve-se a alta persistência, emissão de flores atrativas e porte rasteiro, reduzindo a necessidade de manutenção. É ainda usado como planta de cobertura permanente em pomares.

É utilizado também como forragem, em pastos consorciados com gramíneas sob sistemas pecuários, pois apresenta o ponto de crescimento protegido, o que possibilita a permanência de sua área foliar mesmo sob o pastejo intenso. Poucas leguminosas possuem esta característica, que permite elevada resistência ao pastejo, devido a isto, o cultivo desta espécie apresenta-se como uma excelente estratégia de uso em sistemas consorciados.

O amendoim forrageiro possui um sistema radicular denso e bem desenvolvido, possibilita rápida cobertura inicial do solo e alta porcentagem de cobertura em relação a outras espécies leguminosas. Além disso, não possui crescimento agressivo sobre a cultura principal, é capaz de reduzir a população de plantas espontâneas e a necessidade do seu controle (PERIN et al., 2003). No que se refere ao sistema radicular, em estudo de Silva et al. (2019) a respeito da análise de crescimento e morfologia de raízes de leguminosas, verificaram que o amendoim forrageiro apresenta maior diâmetro médio de raízes do que a soja perene.

Em relação a produção de matéria seca, pode variar de 6 a 12 t ha⁻¹ (FONTANELI et al., 2012). Machado et al. (2006) relatam que o amendoim-forrageiro (*Arachis pintoi*) recebe maior destaque como cobertura do solo em função da elevada produção de matéria seca e com boa qualidade, observaram em seu estudo a produção de matéria seca de 7 t ha⁻¹. Neste sentido, Rocha (2018) em sistema com plantas de cobertura e erva-mate, observou no mês de fevereiro maior massa seca no tratamento com amendoim forrageiro (12 t ha⁻¹), diferenciando-se das demais plantas de cobertura. O cultivo de leguminosas é uma das formas mais eficientes para acrescentar nitrogênio ao solo, a quantidade fixada varia de acordo com a espécie vegetal utilizada como adubo verde, e pode alcançar 100 kg ha⁻¹ ano⁻¹, a estimativa de fixação de N do amendoim forrageiro é de 160 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (EMBRAPA, 2005).

Outro aspecto relacionado ao cultivo de leguminosas herbáceas é que elas favorecem a população de fungos micorrízicos arbusculares no solo. A atividade biológica exerce função fundamental no processo de agregação e estabilidade estrutural do solo. Entre os grupos de microrganismos que desempenham funções importantes na construção da estrutura do solo estão os fungos micorrízicos arbusculares, que são capazes de formar simbiose com a maioria das espécies e influenciam a formação e estabilização dos agregados, por meio das hifas extrarradiculares e produção de glomalina (BARBOSA et al., 2019).

Em estudo a respeito do consórcio do amendoim forrageiro com gramíneas em pastagens, Miranda et al. (2008) afirmam que a capacidade de associação do amendoim forrageiro com fungos micorrízicos arbusculares contribui para seu crescimento inicial, auxiliando na fase de estabelecimento, o que aumenta sua capacidade competitiva em relação a braquiária. Estes organismos contribuem para aumentar a eficiência no transporte e absorção de nutrientes, principalmente daqueles de baixa mobilidade no solo. Abordagem semelhante foi realizada por Miranda et al. (2010), na qual observaram que o amendoim forrageiro serve como hospedeiro de diferentes espécies de fungos micorrízicos arbusculares e o seu cultivo pode aumentar a presença desses organismos nos sistemas produtivos, melhorando a qualidade biológica do solo.

A consorciação entre gramíneas e leguminosas em pastagens é uma estratégia que vem sendo utilizada na pecuária mundial e concilia o aumento de produção e da sustentabilidade ambiental. No Brasil, o amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) é utilizado principalmente em consórcio com gramíneas dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum* (MIQUELONI; ASSIS, 2020). Sua utilização em sistemas de pastejo consorciado ou em monocultivo, como banco de proteína, pode ser atribuída a maior adaptação ao pastejo e devido ao seu hábito de crescimento estolonífero que proporciona pontos de crescimento pouco acessíveis ao pastejo animal, elevando sua persistência.

Apesar disso, a baixa taxa de adoção do amendoim forrageiro está relacionada com a dificuldade de produção e distribuição de sementes e mudas, que torna o custo de implantação alto e a consorciação como cobertura do solo limitada em grandes áreas. Somado a isso, o fato de não ser resistente a períodos longos de estiagem restringem seu uso.

Outra cobertura do solo indicada em função da alta taxa de cobertura do solo é a soja perene (*Neonotonia wightii*), como o nome já diz é uma planta perene, de crescimento rasteiro e hábito trepador. Assim como o amendoim forrageiro, recomenda-se o uso da soja perene como cobertura vegetal viva nas entrelinhas dos pomares visando a proteção do solo e o controle de plantas daninhas, com intuito de reduzir o uso de herbicidas (DALCOLMO et al., 1999). Embora sejam indicadas plantas de outras famílias para cobertura do solo, o uso de leguminosas é a prática mais difundida devido a possibilidade de fixação de nitrogênio e presença de um sistema radicular ramificado e profundo. No entanto, algumas leguminosas, como a soja perene necessitam de inspeções periódicas e limpeza a fim de evitar que elas cresçam sobre a cultura principal, abafando-as.

Além de cobertura viva permanente consorciada com plantas perenes, esta espécie tem se mostrado promissora para formação de pastagem, pois confere elevada resistência ao pastejo e possui moderada tolerância à geada e a seca, que pode ser atribuída a profundidade de suas raízes, auxiliando em sua recuperação. Sua produção de matéria seca é de aproximadamente 5 a 6 t ha⁻¹ (USP, 2016).

Neste cenário, percebe-se que o uso de plantas de cobertura é uma estratégia importante que influencia a qualidade física do solo, por meio do aporte de fitomassa da parte aérea e raízes. Colabora para a fertilidade do solo, devido ao acúmulo de nutrientes no material vegetal e liberação desses após sua decomposição. Estimulam a atividade biológica devido a interação entre plantas e microrganismos.

Por outro lado, o uso e manejo inadequados dos sistemas produtivos podem resultar na degradação dos solos, como pela erosão, perda de carbono orgânico e ainda pelo processo de

compactação, que é uma das principais formas de comprometer sua estrutura. Diante disso, é necessário investigar a capacidade das plantas de cobertura de influenciar na resistência dos solos, de modo a diminuir a suscetibilidade a degradação.

3.1.1 Plantas de cobertura e o estoque de carbono do solo

Além de todas as funções que o solo cumpre no ambiente, também consiste em um compartimento terrestre importante, como reservatório de carbono, que é composto pelo carbono orgânico e mineral (MACHADO, 2005). Os ecossistemas terrestres, solo e vegetação, são considerados grandes reservatórios de carbono, no entanto, o compartimento solo é aproximadamente 4 vezes superior ao da vegetação.

O conceito de fixação de C está relacionado ao armazenamento de C nos solos, florestas ou em outros tipos de vegetação (DENARDIN et al., 2014). Assim, alterações na vegetação, como sua retirada ou substituição podem alterar esses reservatórios. As alterações promovidas na vegetação e no solo podem transformar estes compartimentos em dreno de C ou em fonte para a atmosfera. Deste modo, maior atenção tem sido dada ao potencial do solo em sequestrar carbono, especialmente com o intuito de minimizar emissão de CO₂ atmosférico, mitigando o aquecimento global. O balanço de carbono no solo depende da relação entre adição de carbono fotossintetizado pelas plantas, parte aérea e raízes, e as perdas de carbono para atmosfera, as quais são resultantes da oxidação microbiana do carbono orgânico a CO₂.

Um dos desafios atuais é conciliar a produção agrícola ou florestal com a manutenção ou aumento do conteúdo de carbono no solo, pois o uso e manejo podem influenciar tanto na perda quanto na retenção de carbono. Sistemas de manejo que proporcionam alta de adição de resíduos vegetais e conseqüentemente, retenção de carbono no solo são alternativas importantes para aumentar a capacidade de dreno de C-CO₂ atmosférico e mitigar o aquecimento global (DIEKOW et al., 2005). No sentido oposto, a prática do revolvimento associado a ausência de cobertura vegetal, além de resultar em alta emissão de CO₂ para atmosfera, também contribui para erosão hídrica, ocasionando perda de carbono do solo (MACHADO, 2005).

Em função disso, tornou-se comum a adoção de práticas conservacionistas na área agrícola, como o plantio direto, com o intuito de sequestro de carbono pelo solo, a fim de minimizar a emissão de CO₂ para atmosfera. Práticas de manejo sustentáveis são responsáveis pela melhoria do solo por meio do acúmulo de matéria orgânica e carbono (PRETTY; BALL, 2001).

Em áreas de cultivo de plantas perenes, a ausência de revolvimento do solo associado ao uso de plantas de cobertura, com alto aporte de resíduos, é uma estratégia que pode ser utilizada para elevar os estoques de matéria orgânica do solo e assim contribuir para o aumento da qualidade ambiental. Práticas eficientes na manutenção da matéria orgânica do solo também garantem o incremento de carbono e deste modo, diminuem a quantidade de CO₂ na atmosfera.

As florestas naturais e os plantios florestais se destacam em relação ao sequestro e fixação de C, devido a distribuição no solo, serrapilheira, raízes e biomassa. A preservação da cobertura vegetal em áreas de florestas promovem um alto aporte de resíduos tanto acima do solo como abaixo deste, nas raízes. Práticas conservacionistas ou a utilização de coberturas vegetais auxiliam na manutenção do estoque de carbono do solo, sendo as coberturas florestais consideradas grandes sequestradoras de carbono e os sistemas florestais grandes reservatórios de C (DENARDIN et al., 2014).

Com relação as espécies florestais, a erva-mate destaca-se, pois renova sua biomassa após a poda, a qual produz a matéria-prima utilizada na indústria alimentícia, assim contribui para uma produção sustentável por meio da estocagem de carbono em sua biomassa (MARCOS et al., 2020). As colheitas de erva-mate são realizadas em intervalos de 2 a 3 anos e subsequentemente ocorre a renovação de sua biomassa. Neste sentido, o consórcio da erva-mate com plantas de cobertura pode colaborar para maior sustentabilidade do sistema, pelo fato de manter ou aumentar o estoque de carbono do solo, já que em áreas sem cobertura vegetal ocorre redução no estoque de carbono.

Em estudo de Denardin et al. (2014), a alteração da cobertura florestal (floresta natural para o plantio de erva-mate) e o manejo realizado (preparo convencional) ocasionaram redução no estoque de C do solo. Os autores verificaram maior estoque de C no solo em área de floresta natural, 107,67 Mg C ha⁻¹, já na área com plantio de erva-mate de 25 anos sob sistema convencional, o estoque foi de 47,29 Mg C ha⁻¹.

Nesse sentido, Piccolo et al. (2008) constataram que o após 50 anos do monocultivo de erva-mate ocorreu diminuição no estoque de C em relação a área de floresta natural (58,9 Mg C ha⁻¹ para 34 Mg C ha⁻¹). No entanto, após 10 anos de associação de erva-mate com capim-elefante entre as linhas de plantio ocorreu aumento no estoque de C do solo (40,4 Mg C ha⁻¹) na camada de 0-15 cm em relação ao monocultivo, um aumento de 0,6 Mg C ha⁻¹ year⁻¹. Esses resultados demonstram a capacidade das coberturas vegetais em contribuir com o aporte de carbono no sistema. Sistemas sustentáveis podem proporcionar um acúmulo anual de C em torno de 0,3 - 0,6 Mg ha⁻¹ (PRETTY; BALL, 2001).

Em um experimento de longo prazo (26 anos), Tiecher et al. (2020) avaliaram o efeito de dois sistemas de manejo (preparo convencional e plantio direto) associados ao cultivo de diferentes plantas de cobertura no acúmulo de C e N no solo e avaliaram a recuperação do estoque de C em relação a uma área de floresta nativa. Após 26 anos, o estoque de C da floresta nativa era de 84 Mg ha⁻¹, enquanto o estoque da área com plantio direto e plantas de cobertura foi de 79,4 Mg ha⁻¹. Os resultados demonstraram que o plantio direto associado à alta adição de resíduos por meio das plantas de cobertura promoveu a recuperação do estoque de C do solo, por isso, considera-se uma ferramenta eficiente no acúmulo de carbono do solo.

A ausência do revolvimento do solo nos sistemas de produção auxiliam na manutenção de grandes quantidades de resíduos vegetais na superfície do solo, aumentando o sequestro de C, especialmente nas camadas superficiais (0,00-0,20 m), no entanto, essas mudanças são lentas e ocorrem ao longo dos anos.

No Brasil, as plantas comumente utilizadas como cobertura do solo são da família das gramíneas e leguminosas. As leguminosas possuem alto potencial de produção de matéria seca e podem atingir uma taxa de acúmulo de C de 1,42 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0,00-1,07 m, além disso, a fixação de N por essas plantas é uma estratégia eficiente para o acúmulo de carbono (DIEKOW et al., 2005). Já as gramíneas, possuem um sistema radicular abundante e volumoso, que está em constante renovação, propiciando aumento na entrada de C. Albuquerque et al. (2015) observaram em seu estudo que a taxa de acúmulo de C no solo das gramíneas alcançou 0,50 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0,00-1,00 m.

Estudos como o de Costa et al. (2008) salientam a importância da adoção de um manejo com alto aporte de resíduos vegetais quando o interesse é o acúmulo de carbono orgânico no solo. Além disso, os autores observaram que o sistema plantio direto associado a alta adição de resíduos vegetais pelas plantas de cobertura, ricos em C e N, propiciaram um balanço positivo de C no solo. Em contrapartida, o preparo convencional e o plantio direto associados a sistemas de culturas com baixo aporte de resíduos vegetais representam um balanço negativo de carbono.

A preservação da matéria orgânica do solo, que é constituída por um reservatório heterogêneo de carbono, possibilita um conjunto de benefícios relacionados principalmente a qualidade química, física e biológica do solo. Já a sua influência sob o comportamento mecânico necessita de melhor compreensão (REICHERT et al., 2018).

3.3 INFLUÊNCIA DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL NA QUALIDADE DO SOLO

A qualidade ambiental é composta por três componentes fundamentais, a qualidade da água, do ar e do solo. Tanto a qualidade do ar quanto da água são definidas pelo grau de poluição que interfere principalmente na saúde humana e de animais ou mesmo nos ecossistemas naturais. Diferente do exposto anteriormente, a definição de qualidade do solo é mais complexa. Neste contexto, Doran e Parkin (1994), propuseram a seguinte definição para a qualidade do solo: “A capacidade que o solo possui de funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, de modo a sustentar a produtividade biológica, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde de plantas e animais, incluindo a do homem”.

Desta maneira, compreende-se que a qualidade do solo é a capacidade que ele possui de realizar suas funções na natureza. Essas funções são: atuar como meio para o crescimento e desenvolvimento de plantas, regular e compartimentalizar o fluxo de água, promover a ciclagem de nutrientes e funcionar como reservatório destes nutrientes e ainda servir como tampão ambiental na atenuação de compostos nocivos ao ambiente (LARSON; PIERCE, 1994).

A estrutura é a condição física do solo, expressa pelo arranjo das partículas e do espaço poroso, formando agregados, essa é considerada uma das propriedades físicas do solo mais importantes tornando-se essencial para a manutenção de sua qualidade (BÜNEMANN et al., 2018; BARBOSA et al., 2019). Uma vez que, regula muitos processos que ocorrem no solo, como a infiltração e retenção de água, as trocas gasosas, a resistência à penetração de raízes, a suscetibilidade à erosão (RABOT et al., 2018) e principalmente a resistência que o solo oferece a forças que tendem a deformá-lo causando sua degradação (BÜNEMANN et al., 2018).

A formação de uma estrutura adequada para o solo está intimamente relacionada com a manutenção de uma boa estabilidade de agregados. O processo de formação e estabilização dos agregados do solo são resultantes das interações entre os fatores químicos, físicos e biológicos, como minerais, cátions polivalentes, matéria orgânica, microrganismos e raízes (TISDALL; OADES 1982).

Em uma revisão de modelos propostos a respeito do processo de formação dos agregados do solo Six et al. (2004) definem o modelo proposto por Tisdall e Oades (1982), o conceito hierárquico, um grande avanço teórico para a compreensão da interação da matéria orgânica do solo e agregados. Nesta teoria de hierarquia dos agregados considera-se que agentes de ligação, transitórios, temporários e persistentes atuam em diferentes estágios da agregação do solo.

Em relação as fases da agregação, é possível separá-las em duas etapas: a primeira etapa consiste na aproximação das partículas do solo, em decorrência das variações do conteúdo de água, dos ciclos de umedecimento e secagem, pela ação das raízes e atração eletrostática (BRANDÃO; SILVA, 2012). Posteriormente partículas primárias livres e agregados do tamanho silte são unidas por meio de agentes de ligação persistentes para formar os microagregados, como a matéria orgânica humificada e cátions polivalentes (Fe, Al e Ca) e partículas minerais da fração argila, como caulinita e óxidos de ferro.

Formados e estabilizados os microagregados, esses dão origem aos macroagregados, que por meio de agentes de ligação temporários, como as raízes e hifas de fungos, e os agentes de ligação transitórios, polissacarídeos derivados de microrganismos ou plantas formam macroagregados. Os agregados menores que 250 μm são denominados de microagregados, enquanto os maiores são denominados de macroagregados. Podem ser classificados quanto ao tamanho em quatro grupos: $< 2 \mu\text{m}$, $2 - 20 \mu\text{m}$, $20 - 250 \mu\text{m}$ e $> 2000 \mu\text{m}$ segundo a teoria de hierarquização de Tisdall e Oades (1982).

Com isto, devido a ordem hierárquica, acredita-se que a estabilidade do microagregado é menos dependente do manejo do solo do que a estabilidade do macroagregado. Assim a estabilidade do macroagregado é dependente da adição constante de resíduos vegetais ao solo, para a manutenção dos compostos orgânicos, como raízes e hifas fúngicas (temporários) e os polissacarídeos microbianos (transitórios), como as mucilagens (BRAIDA et al., 2011).

Conforme postulado por Oades (1984) as raízes e hifas de fungos podem ainda formar microagregados no interior dos macroagregados. Estes agentes de ligação temporários ao se decomporem deixam fragmentos, que são revestidos com mucilagens produzidas durante a decomposição que unem as argilas, dando início a um microagregado no interior de um macroagregado. Outro aspecto a ser ressaltado é que fungos e bactérias são fundamentais na agregação do solo, apesar disso, as hifas, podem desaparecer e junto seu efeito sobre a agregação. Isso ocorre devido aos sistemas de preparo que mobilizam o solo e em função da prática de calagem, que altera as condições ácidas do solo, desfavorecendo o seu desenvolvimento.

Neste sentido, Barbosa et al. (2019) destacam que entre os grupos de microrganismos que desempenham funções importantes na construção da estrutura do solo estão os fungos micorrízicos arbusculares, que atuam na formação e estabilização dos agregados. E ainda ressaltam que este efeito é atribuído principalmente as hifas extrarradiculares e à produção da proteína do solo, glomalina. Deste modo, as hifas atuam tanto pela ação mecânica durante seu

crescimento orientando as partículas do solo, quanto pela liberação da glomalina que possui efeito agregador e cimentante das partículas.

Da mesma forma, deve-se destacar a ação simultânea das raízes no processo de agregação do solo, que ocorre por meio da liberação de exsudados orgânicos, que são fonte de alimento (energia) para atividade microbiana, atuam na aproximação das partículas minerais, devido a pressões exercidas durante seu crescimento e devido a compressão das partículas e remoção da água possibilitando o aumento da coesão entre elas no solo (PERIN et al., 2002).

Portanto, práticas de manejo baseadas no mínimo revolvimento aliado ao uso de plantas a longo prazo, por influenciarem no teor de matéria orgânica, na atuação das raízes e atividade biológica, podem colaborar para melhoria da estrutura do solo, maximizando sua resistência e possibilitar aumento de sua qualidade. A formação de uma boa estrutura é essencial para o adequado crescimento de plantas e assim, condição primordial para garantir alta produtividade nos cultivos.

3.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO

O comportamento mecânico do solo refere-se à reação do solo quando ocorre a aplicação de uma força que tende a deformá-lo, envolvendo atributos como a resistência ao cisalhamento, resistência do solo à penetração e a capacidade de suporte de carga (BRAIDA et al., 2011). A avaliação desses parâmetros mecânicos contribui para compreensão do comportamento do solo diante da aplicação de forças externas, como o processo de umedecimento e secagem do solo, o tráfego de máquinas e animais e até mesmo o crescimento de raízes.

A resistência ao cisalhamento é uma importante propriedade mecânica, tema de interesse nos últimos anos, principalmente em estudos relacionados ao uso e manejo do solo (PAIS, 2014; PIRES, 2007; SILVA et al., 2004). Definida como a resistência interna que o solo oferece para resistir a rupturas e a deslizamentos (REICHERT et al., 2010). Quando devidamente compreendida pode auxiliar na escolha de um manejo que minimize a degradação na estrutura do solo. A análise de cisalhamento pode ser mais sensível às alterações de uso do solo, quando comparada com a pressão de preconsolidação e o índice de compressão do solo (MAZURANA, 2011).

Em algumas condições o aumento da resistência ao cisalhamento não é desejável, como por exemplo, em áreas agrícolas, devido ao aumento no esforço de tração requerido pelas hastes de equipamentos para romper as camadas de solo, que está ligado ao maior estado de

compactação, condição que também não é desejável para o desenvolvimento de plantas. No entanto, para a trafegabilidade de máquinas, é desejável uma superfície mais rígida. Em ambientes nativos, a resistência ao cisalhamento pode ser superior a lavoura, como destacado no estudo de Mazurana (2011), devido a maior estabilidade de agregados associado a enorme quantidade de raízes de gramíneas deste local, condição desejada, desde que não comprometa a funcionalidade do solo.

O comportamento mecânico, especialmente a resistência ao cisalhamento, depende da coesão e do atrito que se estabelecem entre as partículas. A coesão e o ângulo de atrito não são características intrínsecas do solo (REICHERT et al., 2010). A coesão pode ser explicada como uma força que atua para que um agregado de solo mantenha sua forma natural, sua estrutura, sem esboroar, ou pode ser definido como o conjunto de forças que ligam as partículas de solo umas nas outras. E o atrito entre as partículas pode ser considerado como uma força que se opõe ou resiste à ação da força que provoca o movimento, que se constitui quando há tendência ao movimento, e se estabelece nos pontos de contato entre duas ou mais partículas que se chocam ao movimentar-se.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dependem de diferentes fatores que expressam a condição estrutural do solo, como a granulometria, mineralogia, conteúdo de água e teor de matéria orgânica (LEBERT; HORN, 1991). O acúmulo de matéria orgânica aumenta a coesão do solo, devido a um incremento das ligações nos pontos de contato entre as partículas minerais (ZHANG et al. 2005) e ainda pelos materiais orgânicos presentes no solo, como raízes de plantas, hifas de fungos e outros que também contribuem para o aumento da coesão do solo (BRAIDA et al., 2011).

A fração orgânica do solo, assim como a fração mineral, está intimamente ligada ao processo de agregação, em função disso, desempenha importante papel na dinâmica da resistência do solo. Entretanto, os mecanismos da interação organo-mineral são complexos, pois o aumento da matéria orgânica aumenta a estabilidade de agregados, e conseqüentemente a resistência do solo, porém, reduz a densidade e contribui para retenção de água, fatores que reduzem a resistência. Contudo, não está claro o efeito da matéria orgânica sobre a resistência do solo, pois a matéria orgânica pode estar associada a efeitos contraditórios sobre a resistência.

Alguns estudos divergem a respeito da relação da matéria orgânica com a resistência do solo. Procurando compreender os efeitos da matéria orgânica sobre o comportamento do solo, Braida et al. (2007) avaliaram os efeitos do acúmulo de carbono orgânico proveniente das combinações de esterco líquido de suínos e plantas de cobertura no sistema plantio direto sobre a resistência ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico e concluiu que a

coesão independe do teor de matéria orgânica, mas que o ângulo de atrito interno foi afetado pelo teor de matéria orgânica do solo, que está relacionado ao teor de água no solo.

Nesse sentido, Ekwue (1990) procurou avaliar os efeitos da matéria orgânica de origens distintas nas propriedades de resistência, em solos com pastagem e em solos com adição de turfa e observou que a resistência ao cisalhamento do solo aumenta ou diminui com o aumento do teor de matéria orgânica, e que isto dependerá de como a forma do material orgânico envolvido aumenta a estabilidade de agregados. Esse autor concluiu que a matéria orgânica da turfa, diminuiu a resistência ao cisalhamento e que a da pastagem aumentou a resistência, no entanto esses aumentos são limitados, pois a matéria orgânica reduziu a densidade do solo e aumentou a umidade, portanto, também contribui para diminuir a resistência ao cisalhamento do solo.

Em estudo relacionado a distintos usos e manejos do solo, Silva et al. (2004), observaram que a área sob cerradão (mais preservada) resultou em maiores valores de resistência do solo ao cisalhamento, quando comparada ao preparo convencional e à semeadura direta. Os autores atribuíram esse resultado ao maior teor de matéria orgânica e possivelmente a maior agregação do solo proporcionada pelas raízes e ainda pelas ligações físico-químicas presentes em ambientes nativos. Eles ainda acrescentaram que este resultado estava em desacordo com os baixos valores de densidade, altos de porosidade total e condutividade hidráulica do solo saturado da área preservada.

Resultado distinto foi encontrado por Pais (2014) na avaliação da resistência do solo ao cisalhamento também para um Latossolo, em que a área de floresta apresentou menor resistência ao cisalhamento em relação ao cerrado e a área com piquetes de gado de leite. A autora considerou que a área da floresta teve menor alteração na estrutura do solo e a área de piquete ocorreu o processo de compactação devido ao pisoteio animal com degradação da estrutura do solo.

Somado a estes fatores, cabe ressaltar que as raízes atuam por meio de diversos mecanismos para proporcionar a manutenção da estabilidade estrutural do solo. Além de sua participação na formação dos agregados, alguns estudos da literatura procuraram investigar a ação das raízes na resistência ao cisalhamento, como: Ali e Osman (2008); Barbosa e Lima (2013); Maffra et al. (2019); Mickovski et al. (2009) e corroboram com o fato de que as raízes possuem considerável influência no aumento da resistência do solo ao cisalhamento.

Ali e Osman (2008) destacaram que a contribuição das raízes no aumento da resistência surge principalmente da coesão e não do ângulo de atrito interno. Segundo os autores, o sistema radicular penetra na massa do solo, reforçando-a, provocando um aumento da coesão, atribuída

ao aumento na quantidade de raízes finas fibrosas. Em adição, Ghestem et al. (2013) com o objetivo de avaliar a influência da morfologia do sistema radicular da planta na resistência ao cisalhamento, concluíram que o sistema radicular axial, de espécies com muitas raízes finas promoveram maior resistência em relação a espécies com raízes laterais mais grossas. Acrescentam que durante a ruptura, as raízes finas, mais curtas e ramificadas deslizaram pelo solo, ao invés de quebrar.

Diante do exposto, é necessário investigar e conhecer a resistência do solo em sistemas com uso de plantas de cobertura consorciadas com cultura perene em área sem mobilização, pois espera-se a maximização da estabilidade estrutural, de modo a permitir a manutenção da qualidade do solo, viabilizando condições mais adequadas para a produção da cultura de interesse.

3.5 COMPRESSIBILIDADE E ELASTICIDADE DO SOLO

A compressão do solo é um processo que sob aplicação de uma carga externa promove aumento da densidade, diminuição da porosidade refletindo na expulsão da água e ar dos poros. Sendo o comportamento compressivo do solo geralmente avaliado pelo teste de compressão uniaxial, pelo qual pressões normais crescentes pré-determinadas são aplicadas uniformemente sobre uma amostra de solo com drenagem livre de água (REICHERT et al., 2010). Assim, a pressão aplicada externamente na amostra comprime o solo, reduzindo o espaço poroso, tendo como consequência, a expulsão do ar e da água e a redução na altura da amostra. O teste de compressão uniaxial tem sido utilizado pois permite avaliar a resistência do solo à aplicação de cargas e sua recuperação a partir de deformações.

A partir do teste citado anteriormente é gerada a curva de compressão do solo, a qual é representada graficamente pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e o índice de vazios e tem por finalidade avaliar o comportamento mecânico dos solos em áreas com culturas anuais ou perenes (CASAGRANDE, 1936). Desta curva podem ser obtidos dois parâmetros ligados a resistência estrutural do solo, como a pressão de preconsolidação (σ_p), que é caracterizada como estimava da capacidade de suporte de carga do solo e o índice de compressão (I_c) que indica a suscetibilidade do solo à compactação (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995). Pelo teste de compressibilidade, realizando o descarregamento das cargas aplicadas também é possível obter o índice de recuperação do solo (IR), o qual representa comportamento elástico do solo.

A pressão de preconsolidação vem sendo considerada como indicador da capacidade de suporte de carga do solo, pois acreditava-se que a partir de determinada tensão a compactação do solo passa a ser constante e o solo se deforma, assim, ocorreriam mudanças irreversíveis nas funções do solo (REICHERT et al., 2010). Por isso, sua determinação era realizada em estudos relacionados a avaliação do manejo e da estrutura do solo, sendo também considerada com indicador de qualidade física.

Contudo, o estudo de Gubiani et al. (2018) faz algumas considerações importantes relacionadas a compressibilidade do solo, a primeira é que não há evidências confiáveis que suportem o conceito atribuído a pressão de preconsolidação, como um valor que separa claramente as regiões de deformação elástica e deformação plástica, ou seja, sendo a capacidade de carga do solo. E a segunda consideração é a respeito do índice de elasticidade determinado por meio do coeficiente de descompressão (C_d), pois verificou-se que com conforme aumentava o carregamento, houve aumento do índice, ou seja, o solo se tornava mais elástico e plástico simultaneamente. Em acordo com esta ideia, o estudo de Ambuz et al. (2018) sugere que a σ_p pode ser alta em condições estruturais boas e más, se tornando um índice confuso para avaliação da qualidade física do solo.

Em vista disso, são necessários estudos que investiguem e identifiquem a real correspondência da σ_p do solo, pois essa vem sendo utilizada em muitos estudos para avaliar a compactação do solo e sua qualidade física e mecânica (SUZUKI et al., 2008). Destaca-se ainda que o conhecimento a respeito tanto da σ_p , como do I_c , são usados para adequação de práticas de uso e manejo do solo, com o intuito de minimizar seus impactos desfavoráveis nas propriedades do solo (SILVA, et al., 2002).

Tanto a compressibilidade quanto elasticidade são propriedades físicas importantes relacionadas a resistência do solo e a resistência à compactação (REICHERT et al., 2018). A compressibilidade pode ser definida como a facilidade com que o solo não saturado decresce de volume quando sujeito a pressões (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996), e a elasticidade como a capacidade do solo em recuperar parte do seu volume após ser comprimido por pressões (REICHERT et al., 2010).

Estudos relacionados a compressão do solo se tornam relevantes especialmente pelas mudanças estruturais ocasionadas por esse processo que interferem negativamente nas propriedades funcionais do solo, que são essenciais para o desenvolvimento de plantas (REICHERT et al., 2016; AMBUZ et al., 2018). Essas mudanças estruturais estão relacionadas aos fluxos de água e ar (REICHERT et al., 2016) e a resistência mecânica enfrentada pelas raízes das plantas (REINERT et al., 2008). Condições adequadas para o desenvolvimento de

plantas nos sistemas de produção são primordiais para garantir o suprimento de alimentos para a população e ao mesmo tempo manter a qualidade do solo.

Os sistemas de manejo do solo afetam as propriedades dos solos que influenciam no comportamento compressivo, como a estrutura (KELLER; ARVIDSSON, 2007), matéria orgânica (SOANE, 1990), conteúdo de água (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996) e a densidade do solo (SUZUKI et al., 2008).

Com o objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas do solo em áreas com distintos usos, Ortigara et al. (2014) verificaram que o pisoteio animal intensivo em área de pastagem causou alterações na estrutura do solo, proporcionou aumento nos valores de pressão de preconsolidação, gerou níveis de compactação restritivos às plantas e decréscimo nos valores de macroporosidade do solo, condição que implica em restrições nos fluxos de ar e água no solo. Os autores ainda observaram que a área de mata nativa foi mais suscetível à compactação, com valor alto para o índice de compressão e baixos para pressão de preconsolidação e densidade do solo.

Em relação a densidade, geralmente quanto maior a densidade inicial do solo maior será a pressão de preconsolidação e menor sua suscetibilidade à compactação e deformação. Contudo, essa condição não indica solo com qualidade física adequada para as culturas (SUZUKI et al., 2008). Quanto à umidade do solo, quanto mais seco está o solo, mais alta a pressão de preconsolidação e evidentemente maior capacidade de suporte de carga. Ao passo que, o conteúdo de água mais alto no solo, evidencia baixa pressão de preconsolidação e menor capacidade de suporte de carga, implicando em maior suscetibilidade à compactação.

Segundo Soane (1990) o aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo reduz a compressibilidade e ocasiona maior resistência a deformação ou aumento da elasticidade. No estudo de Reichert et al. (2018) observaram relação inversa entre a matéria orgânica e a pressão de preconsolidação e relação positiva com o índice de compressão, sugerindo que os solos com maior conteúdo de matéria orgânica são menos resistentes a compactação, porém recuperam-se mais rápido da compactação. Nesse sentido, Zhang et al. (2005) relata que a matéria orgânica do solo pode auxiliar a evitar a degradação da estrutura do solo em virtude do aumento da estabilidade física, da tensão de cisalhamento e da recuperação do solo após remoção da carga aplicada.

Com a finalidade de avaliar os fatores controladores da compressibilidade do solo sob sistema de plantio direto e convencional, com variação no estado de compactação, Silva et al. (2002) observaram que a pressão de preconsolidação e o índice de compressão foram influenciados pelo estado de compactação e pelo manejo do solo dentro de cada classe de

densidade. Os autores verificaram que no sistema de plantio direto os valores de pressão de preconsolidação foram superiores ao do sistema convencional, deste modo, o preparo do solo diminuiu os valores de pressão de preconsolidação em todas as classes de densidade, na superfície e subsuperfície.

Em relação a elasticidade do solo, é uma propriedade importante que informa a respeito da resistência à deformação do solo, ou seja, a capacidade de recuperação da estrutura após aplicação de uma tensão. Assim, o índice que melhor representa este comportamento elástico do solo é o índice de recuperação (IR), também denominado coeficiente de recuperação, que corresponde a relação entre a variação do índice de vazios durante o descarregamento e a variação do índice de vazios durante o carregamento (BRAIDA et al., 2008; GUBIANI et al., 2018). Sistemas que aumentam o conteúdo de matéria orgânica do solo, como a semeadura direta podem estar associados com maior elasticidade, sendo uma possível justificativa para utilização desses sistemas devido a maior resistência à compactação (BRAIDA et al., 2008)

No entanto, como a elasticidade pode ser influenciada pela distribuição granulométrica, solos com maior conteúdo de argila podem fornecer maior elasticidade, devido ao aumento da retenção de água e aprisionamento de bolhas de ar. Os solos arenosos são menos suscetíveis a compactação, no entanto, esses possuem baixa capacidade de recuperação. Uma das estratégias para aumentar a resistência dos solos arenosos é o aumento do carbono orgânico, como demonstrado por Braida et al. (2008), que verificaram aumento da elasticidade de um Argissolo Vermelho com a adição de matéria orgânica, proveniente da aplicação de doses de esterco líquido de suínos e plantas de cobertura.

A matéria orgânica pode alterar o comportamento elástico do solo, por duas razões, a primeira refere-se ao aumento da retenção de água, associado ao acúmulo de matéria orgânica no solo (COSTA et al., 2003). A umidade facilita o aprisionamento das bolhas de ar que se expandem e deslocam partículas de solo, conseqüentemente provocando aumento de sua elasticidade. E a segunda razão, está relacionada a sua própria elasticidade, já que as partículas orgânicas são mais elástica que as partículas minerais. Logo, entende-se que o aumento do conteúdo de matéria orgânica proporciona maior elasticidade ao solo.

No entanto, em estudo de Mentges et al. (2013) verificaram que o aporte de carbono não aumentou a elasticidade e atribuiu ao tipo de estrutura do solo avaliado, concluindo que em alguns casos o aporte de material orgânico não é suficiente para promover o aumento da elasticidade do solo. Outros estudos que buscaram investigar a recuperação dos solos após a aplicação de cargas, não encontram valores de recuperação relevantes (STONE; LARSON, 1980; McBRIDE; WATSON, 1990). O índice de recuperação ou coeficiente de recuperação,

em estudo de Braida et al. (2008) para o Nitossolo, variou de 11,4 a 16,4% e 14,0 a 23,4% para o Argissolo, já no estudo de Reichert et al. (2018) variou de 2,4 e 22,6%. Para o outro índice de elasticidade do solo, o coeficiente de descompressão, Keller e Arvidsson (2007) não encontraram correlação com o teor de matéria orgânica ou textura do solo.

3.6 PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR

Além do estudo de propriedades físicas usualmente determinadas para avaliação da qualidade estrutural do solo, como densidade, porosidade total e macroporosidade, a permeabilidade ao ar tem sido utilizada em estudos que avaliam a estrutura dos solos em distintas condições de uso e manejo (PÉRTILE, 2015; SEQUINATTO, 2010). Resumidamente, a permeabilidade ao ar é um indicativo da facilidade com que o ar passa através de uma massa do solo. Por vezes é descrita como uma importante propriedade para indicar a facilidade que ocorrem os fluxos de gases entre o solo e a atmosfera (MALLMANN, 2017). Assim, valores adequados de permeabilidade ao ar indicam melhores condições para os fluxos e maior capacidade de transporte de gases. Ao passo que, a capacidade dos solos em promover as trocas gasosas entre a atmosfera e as raízes interfere no crescimento das plantas (MENTGES et al., 2016).

O processo de aeração do solo é importante para alcançar uma boa produtividade das culturas, deste modo, a determinação da permeabilidade ao ar se destaca por fornecer informação a respeito da funcionalidade do solo. As concentrações de oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) são fatores primordiais para o crescimento radicular e desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 2009). As raízes das plantas absorvem O_2 e liberam CO_2 no processo de respiração, para isto é necessário que o solo seja aerado. Ou seja, é necessário que aconteça a troca gasosa entre o ar do solo e a atmosfera, impedindo a deficiência de O_2 e o excesso de CO_2 . Em solos bem aerados, o O_2 consumido no solo é repostado rapidamente e o CO_2 gerado é liberado para atmosfera (HILLEL, 1998). Assim como as raízes, os microrganismos do solo respiram e necessitam do oxigênio.

A permeabilidade ao ar é diretamente influenciada pela estrutura do solo, especialmente pelas características do sistema poroso, quantidade e continuidade e de poros (BRAGA et al., 2015). O uso e manejo, principais condicionantes da condição estrutural do solo, refletem em alterações de seus valores. Por isso, a avaliação da permeabilidade ao ar é considerada sensível e eficaz para identificar as alterações na estrutura sob distintos usos e manejos do solo. É

definida como um dos parâmetros mais adequados para avaliar as alterações decorrentes das práticas de manejo (TANG et al., 2011).

Neste sentido, o maior teor de matéria orgânica, a atividade de organismos e a grande quantidade de raízes nas camadas superficiais do solo podem formar uma maior quantidade e continuidade de poros, proporcionando maior permeabilidade ao ar. Em sistemas de manejo sem mobilização do solo e com plantas de cobertura a atividade biológica é favorecida pela preservação da matéria orgânica, além disso, a ciclagem de raízes auxiliam na formação de uma rede estável e contínua de poros. Essa criação de poros no solo pode permitir um ambiente de condições adequadas para o crescimento das plantas (REICHERT et al., 2009).

Um dos benefícios do uso de plantas de cobertura está relacionado a criação de poros biológicos de alta funcionalidade para aeração e infiltração de água no solo (ABREU et al., 2004). Mallmann (2017) avaliando distintas plantas de cobertura atribuiu a maior permeabilidade ao ar na camada superficial do solo à formação de poros estáveis e contínuos possivelmente formados pela decomposição das raízes e criação de bioporos. Os poros biológicos possuem diâmetro maior que 2 a 3 mm e são formados principalmente pela atividade dos organismos do solo (mesofauna) e pela decomposição das raízes (REICHERT et al., 2003).

Para Horn (2004) a funcionalidade dos poros está intimamente relacionada com a deformação do solo, isso porque em sistemas que proporcionam uma estrutura do solo mais estável, a funcionalidade dos poros é mantida. Entretanto, alterações na estrutura do solo ocasionam modificações nos fluxos de ar, por exemplo, quando a pressão de preconsolidação é ultrapassada, ocorre aumento da densidade, redução do espaço aéreo, interferindo nos fluxos de ar no solo (BRAGA et al., 2015).

Espera-se que sob um sistema com práticas conservacionistas, como ausência de mobilização e uso de cobertura vegetal, seja estabelecido um sistema de poros mais estável com reflexos positivos para os fluxos no solo. Contudo, em sistemas com mínima mobilização, como o plantio direto, observa-se problemas relacionados à compactação do solo, reduzindo a permeabilidade ao ar (MENTGES et al., 2016). Deste modo é importante conhecer a funcionalidade do solo por meio da permeabilidade ao ar, não somente em cultivos anuais, mas também em cultivos perenes, como o da erva-mate. Especialmente com diferentes espécies de plantas de cobertura, estabelecidas no sistema por um período mais longo, a fim de proporcionar mudanças no solo, como aumento do conteúdo de matéria orgânica e contínua atividade de raízes e de microrganismos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

O estudo foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, no município de Santa Maria, localizado na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul (latitude 29°68' sul; longitude 53°81' oeste).

O clima da região que compreende a área de estudo é do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen, que corresponde ao clima subtropical úmido, apresenta precipitação média anual de 1620 mm, a temperatura média do mês mais frio é de -3 °C, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C (ALVARES et al., 2013).

Na região fisiográfica da depressão central predominam materiais sedimentares, como arenitos, argilitos, siltitos e folhelhos de diferentes formações geológicas. A formação Santa Maria que abrange os municípios São Pedro do Sul, Santa Maria, Rosário do Sul e Santana do Livramento, possui como material de origem argilitos, siltitos e arenitos (BRASIL, 1973), dando origem aos Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos no topo das coxilhas, onde a drenagem é mais eficiente, no meio da encosta, Argissolos Bruno-Acinzentados, com drenagem restrita e na várzea a classe dos Planossolos. Na área experimental, o solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico abráptico (EMBRAPA, 2013). A composição granulométrica do solo referente as camadas avaliadas neste estudo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição granulométrica do solo referente as camadas avaliadas no estudo, de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico abráptico, em Santa Maria, RS.

Camada	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classe textural
cm	g kg⁻¹				
1 - 4	261	400	234	106	Franco arenoso
10 - 14	259	406	224	110	Franco arenoso

A área na qual o experimento foi instalado, permaneceu em pousio por aproximadamente 15 anos e começou a ser utilizada em 2004, com plantio de aveia no inverno e soja no verão, em sistema de semeadura direta (KAISER, 2010). No período de 2007 a 2010 a área foi utilizada para um estudo de avaliação do efeito dos sistemas de manejo do solo e dos níveis de compactação sobre as propriedades físicas do solo cultivado com milho, realizado por Kaiser (2010). Para realização do estudo, os tratamentos aplicados foram: sistema plantio direto por 4 anos, plantio direto com compactação adicional, escarificação profunda, escarificação superficial e preparo convencional. Os sistemas e níveis de compactação representaram as principais formas de manejo existentes nos solos arenosos do Rio Grande do Sul. Posteriormente a esse estudo, a área foi cultivada com aveia preta.

Em 2014, outro experimento foi instalado para um estudo de doutorado, realizado por Rocha (2018), com o objetivo de avaliar a influência de diferentes plantas de cobertura do solo, na variação de propriedades químicas e físico-hídricas de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico abrupto, com ênfase em temperatura e umidade do solo, e no crescimento inicial da erva-mate (*Ilex paraguariensis*). Para isso, foi realizado o consórcio de plantas de cobertura do solo com a erva-mate, em um delineamento de blocos ao acaso, com cinco tratamentos e quatro repetições. As unidades experimentais foram planejadas com 17,5 x 10 m e possuíam bordadura simples, ou seja, uma linha de árvores em cada um de seus lados. Os tratamentos, cinco tipos de cobertura do solo consistiram em: soja perene (*Neonotonia wightii*), amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*), aveia preta (*Avena strigosa*) + nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e feijão-miúdo (*Vigna unguiculata*), aveia preta (*Avena strigosa*) + ervilhaca (*Vicia sativa* L.) e feijão-miúdo (*Vigna unguiculata*) e vegetação espontânea roçada. As coberturas foram semeadas ou plantadas na linha e entrelinha da erva-mate, no mês de novembro de 2014.

O atual estudo foi realizado na área experimental citada anteriormente e utilizou como tratamentos as plantas de coberturas e a vegetação espontânea do experimento que foi instalado em novembro de 2014 (ROCHA, 2018). Apenas um dos sistemas de coberturas do solo que fazia parte dos tratamentos do estudo anterior não foi utilizado, a cobertura do solo aveia preta + nabo forrageiro e feijão miúdo, retirada do experimento devido à dificuldade de estabelecimento do nabo forrageiro nesta área.

Os tratamentos utilizados no presente estudo consistiram em quatro tipos de coberturas do solo, sendo uma das coberturas a vegetação espontânea do local, e as demais coberturas consistiram em espécies de plantas de cobertura anuais e perenes, as quais foram semeadas ou plantadas na linha e na entrelinha da erva-mate. Estas espécies foram escolhidas pois possuem

potencial de cobertura do solo para utilização em áreas com cultivos perenes, segundo a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (Emater) do estado do Rio Grande do Sul.

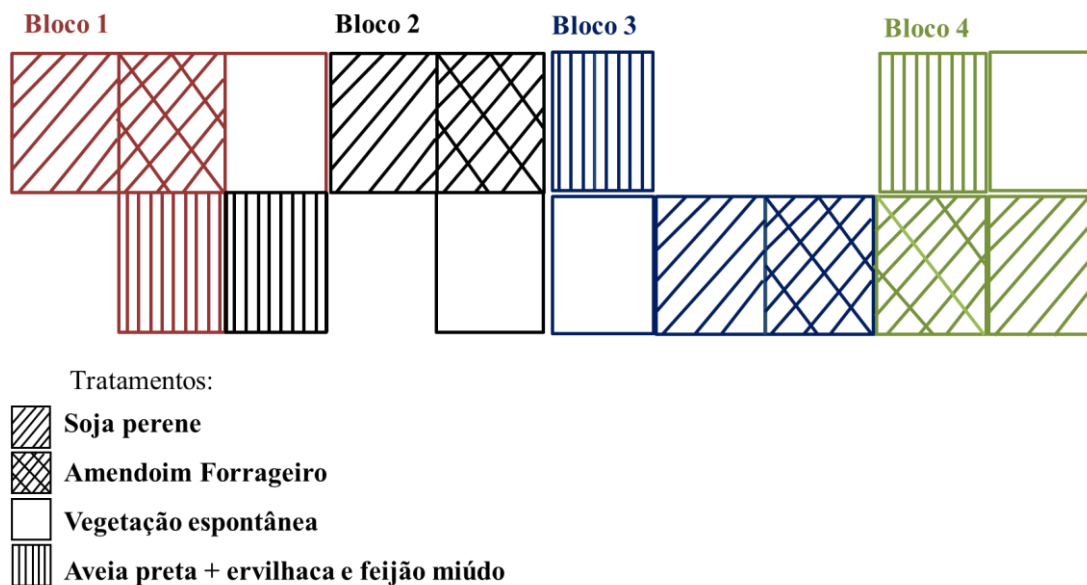
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Com o intuito de realizar a proposta elaborada para o estudo diferentes sistemas de cobertura foram testados em um delineamento de blocos ao acaso, com quatro blocos e quatro tratamentos, totalizando 16 unidades experimentais de 17,5 x 10 m, área de 175 m² por unidade experimental (Figura 1). As coberturas utilizadas possuem potencial para utilização em áreas de produção de culturas perenes e anuais.

Os tratamentos utilizados foram os quatro sistemas de cobertura do solo:

1. Soja perene (SP)
2. Amendoim forrageiro (AM.F)
3. Vegetação espontânea (VE)
4. Aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F)

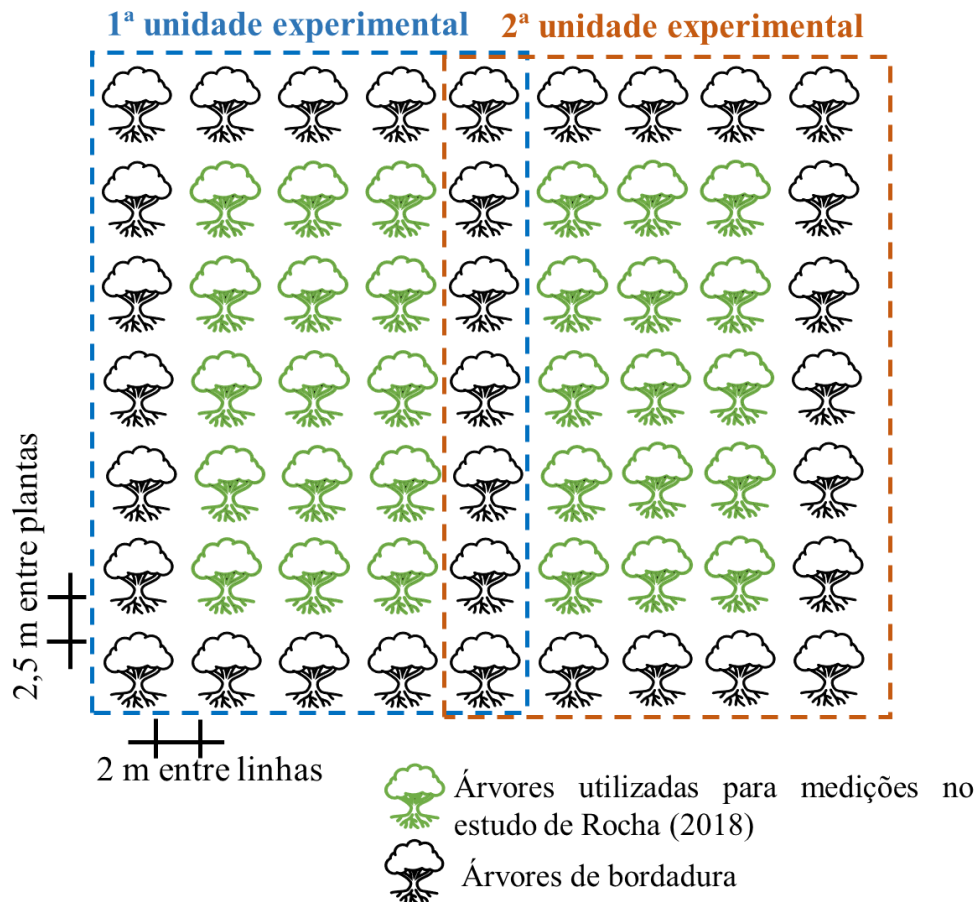
Figura 1 – Croqui da área experimental com os tratamentos.



Fonte: Autora.

As unidades experimentais possuíam bordadura simples, ou seja, possuíam uma linha de árvores em cada um de seus lados (Figura 2).

Figura 2 – Disposição das árvores de erva-mate na área experimental.



Fonte: Autora.

4.3 DESCRIÇÃO DO PLANTIO OU SEMEADURA DAS PLANTAS DE COBERTURA

Anteriormente ao plantio/semeadura das culturas de cobertura, as ervas daninhas foram removidas da área com enxada rotativa manual. As coberturas foram semeadas ou plantadas na linha e entrelinha de plantio da erva-mate, em novembro de 2014.

1. Aveia preta (*Avena strigosa*) + **ervilhaca** (*Vicia sativa*) e **feijão-miúdo** (*Vigna unguiculata*) (AP.E.F): a combinação aveia preta + ervilhaca foi semeada no período entre outono/inverno e o feijão-miúdo no período entre primavera/verão. A aveia preta e a ervilhaca foram semeadas

à lanço com porcentagens de 45 e 55% do total recomendado por hectare, respectivamente, sendo recomendado 80 kg ha⁻¹ para a ervilhaca e 90 kg ha⁻¹ para a aveia preta. O feijão-miúdo foi semeado com um equipamento chamado Saraquá, com uma densidade de 60 kg ha⁻¹, contendo 12 sementes por metro linear, aproximadamente a 10 cm de profundidade do solo e com espaçamento de 0,40 m;

2. Soja perene (*Neonotonia wightii*) (SP): a soja perene foi semeada à lanço com densidade de semeadura de 6 kg ha⁻¹. Até o estabelecimento da soja perene, o controle de plantas daninhas na soja perene foi realizado por meio de capina manual;

3. Amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) (AM.F): o amendoim forrageiro foi plantado por meio de estolões da planta, com um espaçamento entrelinhas de 0,25 m. O controle das plantas daninhas neste tratamento foi feito pelo método manual;

4. Vegetação espontânea roçada (VE): a vegetação espontânea foi roçada periodicamente com uma roçadeira costal a gasolina. Nesse tratamento predominam gramíneas, como papuã, tiririca, capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*), capim-annoni (*Eragrostis plana*). Também foi observada a presença de caraguatá (*Bromelia pinguin*) e buva. Além dessas, outras plantas também aparecem nesta área.

Dando continuidade ao experimento no ano de 2017 a semeadura das plantas anuais foi realizada conforme Rocha (2018) (Figura 3). As plantas de cobertura de solo que exigiram semeadura foram a aveia preta e ervilhaca e o feijão miúdo (Figura 4), já o amendoim forrageiro e a soja são espécies perenes e não necessitam de semeadura, pois rebrotam sem necessidade de plantio (Figura 5).

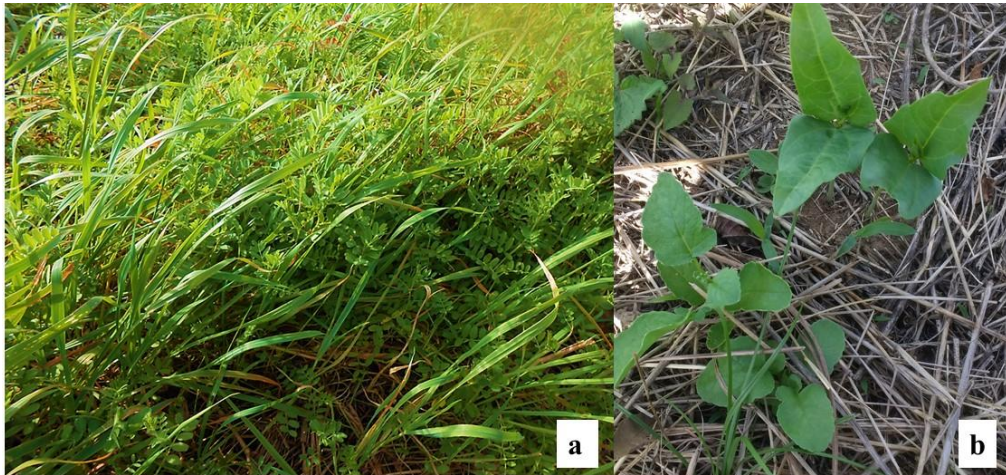
Durante este período foi necessário realizar a manutenção de algumas coberturas do solo implantadas no experimento. Na vegetação espontânea (Figura 6), a roçada ficou mais espaçada, aproximadamente a cada 4 a meses, sendo realizada com roçadeira lateral a gasolina. Nas parcelas com soja perene, foi necessário realizar o coroamento com auxílio de enxada manual, para controle da soja que é uma planta trepadora e crescia demasiadamente sobre a planta de erva mate, causando a morte da planta. Foi constatada a invasão de plantas de amendoim forrageiro em outras parcelas, devido ao seu rápido crescimento, sendo realizado seu controle com auxílio de enxada manual.

Figura 3 – Imagem da área experimental com os tratamentos.



Fonte: Reinert, (2017).

Figura 4 – Plantas de cobertura do solo do período outono/inverno, aveia preta e ervilhaca (a) e planta de cobertura do período primavera/verão, feijão miúdo (b).



Fonte: Autora, (2019).

Figura 5 – Plantas de cobertura do solo, amendoim forrageiro (a) e soja perene (b).



Fonte: Reinert, (2017) em 20/09/2017.

Fonte: Autora, (2018) em 30/09/2018.

Figura 6 – Vegetação espontânea predominante na área experimental cultivada com erva-mate.



Fonte: Autora, 2019.

4.4 AVALIAÇÃO DA MASSA SECA DAS COBERTURAS DO SOLO

A avaliação da massa seca das coberturas do solo foi realizada em dois períodos, novembro de 2018 e abril de 2019. A avaliação foi realizada com auxílio de um amostrador metálico vazado com 0,25 m². O amostrador foi lançado aleatoriamente em cada unidade experimental e coletadas amostras do material vegetal de cada cobertura para determinação da produção de matéria seca, com duas repetições. Posteriormente o material coletado foi alocado em sacos de papel para secagem em estufa a 60 °C, até atingir massa constante. A quantidade de massa seca foi expressa em kg ha⁻¹.

4.5 AVALIAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO

Em cada parcela experimental foram amostradas as camadas de 1-4 e 10-14 cm, totalizando 16 pontos de coleta, em julho de 2019. Amostras com estrutura preservada foram coletadas com anéis metálicos de 9,8 cm de diâmetro e 2,8 cm de altura para realização do teste de cisalhamento direto (Figura 7a). Da mesma forma foram coletados anéis de 5,7 cm de diâmetro e 3 cm de altura (4 anéis por camada) para determinação da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), permeabilidade do solo ar (K_a), resistência do solo à penetração (RP) e adicionalmente os anéis para o ensaio de compressão (4 anéis por camada) (Figura 7b). Com o auxílio de uma pá de corte também foi

coletada uma amostra com estrutura preservada, na camada de 1-4 cm em cada parcela, para análise da estabilidade de agregados.

Figura 7 – Coleta de amostras com estrutura preservada com anéis metálicos de 9,8 cm de diâmetro e 2,8 cm de altura (a) e anéis de 5,7 cm de diâmetro e 3 cm de altura (b).



Fonte: Autora, 2019.

É importante ressaltar a dificuldade encontrada no momento da coleta para retirada das amostras com estrutura preservada nos tratamentos AM.F (Figura 8) e SP (Figura 9). O AM.F é uma planta estolonífera, deste modo, os estolões crescem rente ao solo e enraízam-se nos nós, fato que prejudicou a inserção dos anéis no solo e a sua retirada. Além disso, a quantidade de raízes encontrada na soja perene também dificultou a retirada das amostras de solo e pode ter interferido nas análises (Figura 10).

Figura 8 – Área com cobertura de amendoim forrageiro, utilizada para coleta das amostras de solo.



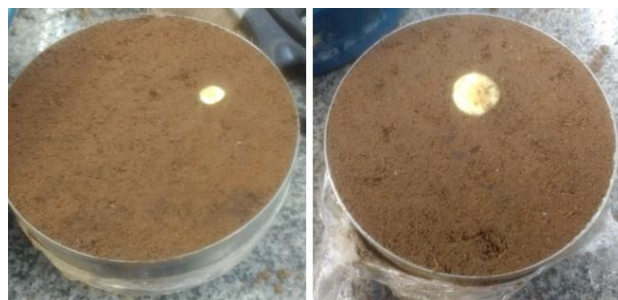
Fonte: Autora, 2019.

Figura 9 – Área com cobertura de soja perene, utilizada para coleta das amostras de solo.



Fonte: Autora, 2019.

Figura 10 – Amostra de solo com estrutura preservada, coletados na área com soja perene.



Fonte: Autora, 2019.

Para as avaliações mecânicas, as amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade por 48 h e posteriormente inseridas em coluna de areia sob tensão de água de 6 kPa (compressibilidade) e 10 kPa (cisalhamento e RP) até cessar a drenagem da água, por 4 dias (REINERT; REICHERT, 2006). Logo após, foram realizados os testes de cisalhamento direto, compressão estática e resistência do solo à penetração.

O teste de compressão foi realizado em um equipamento denominado consolidômetro eletrônico-pneumático, dispositivo S-450, realizados segundo a NBR 12007/90 (ABNT, 1990), utilizando tempo de carregamento de 5 minutos (SILVA et al., 2000). O teste foi realizado em três etapas, sendo que a primeira etapa foi o carregamento das cargas de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 kPa, a segunda etapa foi o descarregamento sequencial de todas as cargas aplicadas até 12,5 kPa, a terceira etapa consistiu em um recarregamento de todas as cargas e incluídas as de 800 e 1600 kPa. Ao final do teste, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, para após determinação da densidade do solo.

A pressão de preconsolidação (σ_p) foi calculada de acordo com Casagrande (1936), e operacionalizada matematicamente com a equação de Van Genuchten (1980), conforme descrito em Baumgartl e Kock (2004). O suplemento para curva de compressão do solo (SCC) Excel® Add-in, desenvolvido por Gubiani et al. (2017) foi utilizado para ajuste dos parâmetros na equação (1) e cálculo da σ_p . Durante a rotina de ajuste, o programa SCC também realiza a conversão da relação ε - σ na relação ε - $\log_{10}\sigma$, que é a forma clássica da curva de compressão (ε - $\log_{10}\sigma$ CC). A partir da curva, a pressão de preconsolidação é dada pelo ponto de intersecção da linha virgem de compressão (LVC) e da bissetriz entre as linhas horizontal e tangente através do ponto de máxima curvatura. A determinação do ponto de máxima curvatura foi realizada conforme Baumgartl e Kock (2004). E o índice de compressão do solo (I_c) foi dado pela inclinação da linha virgem de compressão (LVC).

$$\varepsilon = \varepsilon_f + (\varepsilon_i - \varepsilon_f)[1 + (\alpha\sigma)^n]^{-m} \quad (1)$$

Em que ε_i é o índice de vazios da amostra sem aplicação de carga; ε_f é o índice de vazios final da amostra, estimado como um parâmetro de ajuste; α , n , e m são os parâmetros de ajuste, impondo a restrição $m = 1 - 1/n$.

A elasticidade do solo foi avaliada por meio da determinação do índice de recuperação (I_r) calculado por meio da equação, proposta por Braida et al. (2008) e segundo Gubiani et al. (2018) é o índice que melhor representa a elasticidade do solo:

$$I_r = 100 \frac{\Delta e_d}{\Delta e_c} \quad (2)$$

Em que: I_r é o índice de recuperação (%); Δe_d variação do índice de vazios durante o descarregamento; e Δe_c é a variação do índice de vazios durante o carregamento.

O teste de cisalhamento direto foi realizado com um dispositivo (prensa) com medições automatizadas (marca Wazau). Neste teste, foi aplicada uma força normal (σ) constante, em sequência, uma força tangencial crescente, causando o deslocamento da amostra até sua ruptura. As cargas aplicadas ao solo foram de 25, 50, 100, 200, 400 kPa, conforme Brandt (2005) e a força tangencial com velocidade de deslocamento de $0,3 \text{ mm min}^{-1}$. Para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (c e ϕ), foram plotados os resultados da tensão de cisalhamento (τ) com a tensão normal (σ) aplicada, para o ajuste de uma reta, na qual a inclinação é a tangente do ϕ e a intersecção com o eixo das ordenadas representará a coesão do solo (c). Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) foram estimados conforme a equação de resistência ao cisalhamento de Coulomb:

$$\tau = \sigma \cdot \tan \phi + c \quad (3)$$

Em que τ é a tensão de cisalhamento (kPa); σ é a tensão normal aplicada (kPa); ϕ o ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$) e c a coesão do solo (kPa).

A resistência do solo à penetração foi determinada com penetrômetro de bancada, (Marconi MA 933). As amostras foram saturadas por capilaridade por 48 h e submetidas à tensão de 10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006). As amostras utilizadas para realização do teste de RP de bancada foram as mesmas colocadas na coluna de areia para obtenção da porosidade total, da microporosidade e da permeabilidade ao ar. Entretanto, após a realização destas análises as amostras foram embaladas com papel filme para evitar a perda de umidade já que a haste do penetrômetro do equipamento estava com problemas e não pode ser utilizada de imediato. Após a aquisição da nova haste para o equipamento, as amostras

foram novamente pesadas para obtenção da umidade gravimétrica do solo (U_g) no momento da medição da resistência à penetração. O teste foi realizado com haste de base de 4 mm e velocidade de penetração de 10 mm min^{-1} , os dados são calculados e armazenados automaticamente pelo equipamento.

A resistência do solo à penetração também foi realizada a campo, com o uso de um penetrômetro digital (Eijkelkamp Penetroviewer 6 Data), com armazenamento eletrônico dos dados de ponta cônica de 30° . A determinação da RP foi realizada três dias após a precipitação, de aproximadamente 80 mm acumulados, dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), esperando que a umidade do solo no dia da coleta estivesse próxima a capacidade de campo. As medições foram realizadas a partir do ponto 0 que correspondia a planta de erva-mate, com distância de 0,20 m até 1,00 m para a direita e para esquerda até a profundidade de 0,30 m, com duas repetições na parcela. Juntamente com as medições de RP, foram coletadas amostras com o uso de um trado calador para obtenção da umidade gravimétrica do solo (U_g), nas profundidades de 0-10 e 10-20 e 20-30 cm do solo. As demais propriedades físicas do solo, densidade, porosidade total, macroporosidade e a microporosidade foram determinadas utilizando a metodologia descrita por Embrapa (2017).

Para a permeabilidade do solo ar, as amostras foram saturadas por capilaridade por 48 h e posteriormente colocadas em coluna de areia sob tensão de água de 10 kPa até cessar a drenagem da água, por aproximadamente 4 dias (REINERT; REICHERT, 2006). Após o equilíbrio na tensão, as amostras foram retiradas, pesadas e imediatamente levadas para determinação da permeabilidade do solo ao ar em permeâmetro de carga constante, que quantifica o fluxo de ar que passa pela amostra de solo, mantendo um gradiente de pressão constante, correspondente a 0,1 kPa ou 1 cm de coluna de água. Para o cálculo da permeabilidade ao ar, será realizado o cálculo da condutividade do ar no solo (k_t):

$$k_t = \rho_t \cdot g \frac{\Delta V \cdot L}{\Delta t \cdot \Delta p \cdot A} \quad (4)$$

Em que k_t é condutividade ao ar (cm s^{-1}); ρ_t é a densidade do ar (g cm^3); g é a aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}); ΔV é o volume de ar que passa pela amostra no Δt (cm^3); L é a altura da amostra de solo (cm); Δt é o tempo em que passa ΔV (s); Δp é a pressão com que o ar passa pela amostra (1 cm de coluna de água); A é a área da amostra de solo (cm^2).

A densidade do ar (ρ_t) será corrigida para a condição padrão de pressão e temperatura (1013 mbar e 273,15 K), de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_l = \rho_n \left(\frac{T_n P}{P_n T} \right) \quad (5)$$

Em que ρ_l é a densidade do ar (kg m^{-3}); ρ_n é a densidade padrão do ar ($1,293 \text{ kg m}^{-3}$); T_n é a temperatura padrão ($273,15 \text{ }^\circ \text{K}$); P é a pressão atmosférica durante a medida (mbar); P_n é a pressão atmosférica padrão (1013 mbar); T = temperatura do ar durante a medida ($\text{K} = \text{ }^\circ \text{C} + 273,15$).

Desta forma, pela obtenção do k_l é possível calcular a permeabilidade do solo ao ar (k_a), conforme segue a equação:

$$k_a = k_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad (6)$$

Em que: k_a é a permeabilidade ao ar (cm s^{-1}); k_l - condutividade ao ar (cm s^{-1}); η - viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$); ρ_l - densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3}); g - aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}).

4.6 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE AGREGADOS ESTÁVEIS EM ÁGUA

Para determinação da distribuição do tamanho de agregados estáveis em água foi utilizado o método modificado de Kemper e Chepil (1965). Amostras com estrutura preservada foram coletadas com o auxílio de uma pá de corte e levadas ao laboratório.

As amostras foram destorroadas manualmente em seus planos de fraqueza, realizando movimentos de tração tomando o cuidado para não comprimir o agregado, mas também não pulverizar o solo. Sucessivamente, os agregados foram passados em peneira de 8 mm e alocados em caixa de madeira para secagem ao ar.

Realizou-se a pesagem de 50 g de agregados para cada tratamento. Esses foram colocados sobre o jogo de peneiras posicionadas por ordem de tamanho de 4,76; 2,00; 1,00 e 0,21 mm no equipamento de oscilação vertical e umedecidos por capilaridade por 10 minutos. Após o período de umedecimento dos agregados o equipamento foi ligado por 10 minutos para oscilação das peneiras.

O solo retido em cada peneira foi passado para latas de alumínio previamente pesadas utilizando um jato de água e colocado na estufa a $105 \text{ }^\circ \text{C}$ por 24 horas. Retirado o material da estufa e pesado, foi possível proceder com a determinação da quantidade de areia (material inerte, outros que não agregados) por meio da imersão em solução dispersante de NaOH a 6%.

A areia retida em cada peneira foi colocada em latas e levada para estufa, posteriormente este material foi pesado para definição da massa de agregados sem a fração areia.

Conforme o método foi necessário determinar a umidade residual, para isso, pesou-se mais ou menos 50 g de agregados que foram colocados na estufa a 105 °C por 24 horas e após pesados. Além do cálculo da percentagem de agregados por classe de tamanho (AGR_i), dois índices relacionados a estabilidade de agregados foram determinados, o diâmetro médio geométrico (DMG), que evidencia os agregados de maior ocorrência e o diâmetro médio ponderado (DMP), o qual seu valor será tanto maior, quanto maior for a porcentagem de agregados grandes.

Os cálculos dos índices foram realizados por meio das fórmulas abaixo:

$$AGR_i = mAGR_i / \sum_{i=1}^n AGR_i \quad (7)$$

$$DMG = EXP [\sum_{i=1}^n (AGR_i * LN (c_i)) / \sum_{i=1}^n AGR_i] \quad (8)$$

$$DMP = \sum MA_i * c_i / MAT \quad (9)$$

em que:

AGR_i - percentagem de agregados por intervalo de classe de tamanho (%);

$mAGR_i$ - massa de agregados da classe i , menos areias (g);

$\sum_{i=1}^n AGR_i$ - massa total de agregados, menos areias (g).

DMG - diâmetro médio geométrico (mm);

LN - logaritmo neperiano;

c_i - valor médio da classe de agregados i (mm);

$\sum_{i=1}^n AGR_i$ - massa total de agregados, menos areias (g);

DMP - diâmetro médio ponderado (mm);

MAT = massa total de agregados descontada a fração inerte (g);

MA_i = massa de agregados da classe i (g).

4.7 ANÁLISE TEXTURAL, DENSIDADE DE PARTÍCULAS, CARBONO TOTAL E NITROGÊNIO TOTAL DO SOLO

Amostras com estrutura alterada foram coletadas nas camadas 1-4 e 10-14 cm, armazenadas em sacos plásticos previamente identificados para determinação da análise textural, da densidade de partículas e do teor carbono total e nitrogênio total do solo.

A análise textural foi determinada conforme Embrapa (2017), as frações grosseiras foram separadas por tamisação, secas em estufa e calculados seus percentuais, sendo quantificado o teor de areia fina (0,2 – 0,05 mm) e areia grossa (2 – 0,2 mm). A fração argila (< 0,002 mm), foi separada por sedimentação pelo método da pipeta. E, o silte (0,05 – 0,002 mm) foi determinado pela diferença das massas de TFSA e areia mais argila.

A densidade de partículas do solo (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico descrito por Embrapa (1997) e modificado por Gubiani et al. (2006). Deste modo, as amostras de solo foram maceradas e secas em estufa a 105° C por 24 horas (TFSE), após foram colocadas em dessecador para o resfriamento. A seguir foi realizada a aferição volumétrica dos balões de 50 ml com bureta, após os balões foram colocados para secar e determinado por medição a massa do balão volumétrico previamente aferido e seco (M_b). Posteriormente foi realizada a transferência de aproximadamente 20g de TFSE para o balão volumétrico, aferido a 50 ml, determinando-se a massa do balão mais solo (M_{bs}). Subsequentemente, o álcool foi adicionado até a metade do volume do balão com o solo e agitado manualmente para eliminar o ar existente entre as partículas do solo, completando o volume do balão até próximo ao traço de aferição. Em seguida, o balão volumétrico foi preenchido com o álcool até os 50 ml, aferidos anteriormente, obtendo-se o peso do balão mais o solo e o álcool (M_{bsa}). Além disso, foi realizada a determinação da densidade do álcool (D_a) por meio da relação massa do álcool pelo seu volume. E por fim, a densidade de partículas do solo foi calculada por meio da seguinte equação:

$$D_p = \frac{(M_{bs} - M_b)}{50 - \left[\frac{M_{bsa} - M_{bs}}{D_a} \right]} \quad (10)$$

Em que D_p é a densidade de partículas do solo (g cm^{-3}); M_b a massa do balão volumétrico (g); M_{bs} a massa do balão volumétrico contendo o solo (g); M_{bsa} a massa do balão volumétrico contendo solo mais álcool (g) e D_a a densidade do álcool (g cm^{-3}).

A determinação do teor de carbono total do solo (CT) e nitrogênio total do solo (NT), foram quantificados na fração TFSA macerada, por combustão seca em autoanalisador CHNS, modelo FlashEA 1112 pelo Laboratório de Microbiologia de Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria.

4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para iniciar a análise estatística foram verificadas as pressuposições para a realização da análise de variância, como a normalidade da distribuição dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. Como este pressuposto não foi atendido, os dados de permeabilidade ao ar foram transformados para se obter uma distribuição mais próxima da normalidade e prosseguir com a análise estatística paramétrica.

Após os dados foram submetidos a análise de variância e quando significativo aplicado o teste de comparação de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. A análise estatística foi realizada no Sisvar (FERREIRA, 2014) e para elaboração de alguns gráficos foi utilizado o software SigmaPlot 14.0 (Systat Software Inc., San Jose, CA).

Posteriormente foi realizada a análise de correlação de Pearson entre as propriedades físicas-mecânicas e carbono orgânico total usando o software estatístico R version 4.1 (R CORE TEAM, 2021), quando o ajuste das equações foi significativo, o coeficiente de correlação R é seguido de um asterisco, que indica 5% de significância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

No presente estudo, os valores observados das propriedades físicas do solo, na camada superficial, não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 2). Mesmo não sendo verificada diferença significativa, observa-se valor numérico superior de densidade do solo na VE, seguida do AM.F e da AP.E.F, e o menor valor na SP.

Possivelmente a SP teve o menor valor de densidade pelo fato de ser uma leguminosa, fazendo com que ocorresse aumento do conteúdo de matéria orgânica ao solo, visto que produzem elevada quantidade de resíduos (Figura 11) e proporcionam um balanço positivo de nitrogênio no sistema (Figura 12). Essas plantas fixam nitrogênio e reduzem a necessidade de aplicação de adubos nitrogenados. Assim, possuem em seus tecidos elevados teores de nitrogênio, resultando em baixa relação C/N (DONEDA et al., 2012), que representa decomposição mais fácil dos resíduos destas plantas.

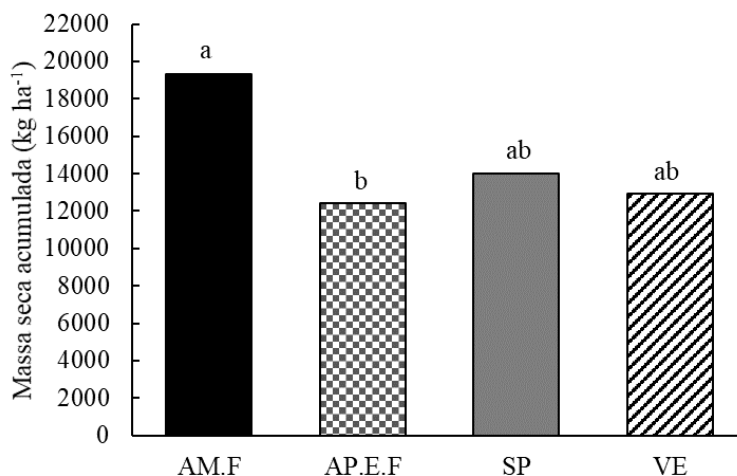
Plantas de cobertura que possibilitam o acúmulo de matéria orgânica juntamente com o crescimento de raízes na superfície do solo colaboram para diminuição da densidade (NASCENTE et al., 2015). Somado a isso, um sistema com plantas de cobertura que forneçam elevada quantidade de resíduos e adicionem nitrogênio ao sistema colaboram para o acúmulo de matéria orgânica ao solo, já os sistemas com balanço negativo de nitrogênio parecem impedir o acúmulo de matéria orgânica ao solo (ROSCOE et al., 2006).

Tabela 2 – Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo sob uso de plantas de cobertura e vegetação espontânea em área com erva-mate, em julho de 2019, nas camadas 1 - 4 e 10 - 14 cm em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

Densidade do solo (g cm^{-3})		
Tratamentos	Camadas	
	1 - 4 cm	10 - 14 cm
AM.F	1,40 ^{ns}	1,68 ^{ns}
AP.E.F	1,40	1,71
SP	1,35	1,73
VE	1,44	1,69
CV (%)	7,12	3,30
Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		
Tratamentos	Camadas	
	1 - 4 cm	10 - 14 cm
AM. F	0,45 ^{ns}	0,33 ^{ns}
AP.E.F	0,45	0,32
SP	0,46	0,32
VE	0,42	0,33
CV (%)	9,95	9,21
Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		
Tratamentos	Camadas	
	1 - 4 cm	10 - 14 cm
AM. F	0,19 ^{ns}	0,09 ^{ns}
AP.E.F	0,17	0,07
SP	0,17	0,07
VE	0,13	0,08
CV (%)	30,46	41,65
Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		
Tratamentos	Camadas	
	1 - 4 cm	10 - 14 cm
AM. F	0,26 ^{ns}	0,24 ^{ns}
AP.E.F	0,28	0,25
SP	0,29	0,24
VE	0,29	0,25
CV (%)	8,85	4,07

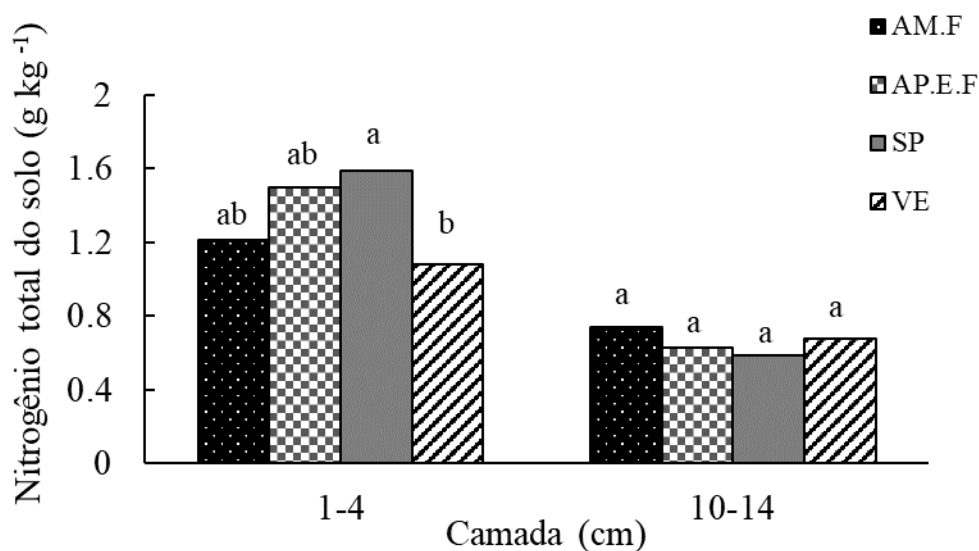
ns: não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CV - Coeficiente de variação (%). AM.F - Amendoim forrageiro, AP.E.F - Aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo, SP - Soja perene, VE - Vegetação espontânea.
Fonte: Autora.

Figura 11 – Massa seca acumulada das plantas (kg ha^{-1}) em dois períodos de avaliação (novembro de 2018 e abril de 2019), nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.



Fonte: Autora.

Figura 12 – Nitrogênio total do solo (g kg^{-1}) avaliado nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), para as camadas 1-4 e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.



Fonte: Autora.

Assim como as plantas de cobertura selecionadas para o cultivo, a vegetação espontânea demonstrou valor adequado de densidade, não exibindo valores restritivos. O valor de massa seca acumulada da vegetação espontânea, que é composta por gramíneas, foi alta, assim como

do AM.F e da SP (Figura 11). O cultivo de espécies com boa produção de biomassa e com o crescimento radicular vigoroso é desejável, especialmente para uso como cobertura do solo, pois geralmente resultam em melhorias estruturais do solo. Diferentemente das leguminosas, as gramíneas possuem relação C/N alta, sendo assim, a decomposição dos seus resíduos e liberação de nutrientes é mais lenta. Deste modo, os resíduos desta planta permanecerão por mais tempo na superfície do solo. Além disso, as gramíneas possuem alta densidade de raízes, fato que também pode contribuir para diminuição da densidade do solo.

Nesta mesma área experimental e com o uso de plantas de cobertura Rocha (2018) salienta que não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos para densidade do solo em nenhuma das épocas avaliadas (abril de 2015, novembro de 2015 e novembro de 2016). A autora destaca que aos dois anos de implantação do experimento foi observado diminuição da densidade do solo no AM.F, com valor de 1,49 para 1,40 g cm⁻³. Este efeito positivo na diminuição da densidade persistiu até a avaliação do presente estudo, pois também foi encontrado o valor de 1,40 g cm⁻³ para o AM.F. Para as demais plantas de cobertura, AP.E.F e SP, em novembro de 2016, as densidade eram de 1,50 e 1,46 g cm⁻³ respectivamente, e no atual estudo 1,40 e 1,35 g cm⁻³, já na VE o valor da última avaliação era 1,42 e no atual estudo 1,44 g cm⁻³. Evidencia-se uma tendência de diminuição da densidade com as plantas de cobertura.

É válido destacar, assim como na densidade do solo, o comportamento semelhante para a macroporosidade na camada superficial, na qual ocorreram maiores valores para as plantas de cobertura do solo, mas sem diferença significativa. Outro efeito benéfico relacionado a algumas plantas de cobertura é a formação de bioporos proporcionada pelo sistema radicular mais agressivo com a capacidade alargamento dos poros existentes e criação de novos. Isso resulta em aumento dos macroporos, refletindo na permeabilidade ao ar e na condutividade hidráulica, que são consideradas propriedades funcionais, pois descrevem processos no solo (HOLTHUSEN et al, 2018).

Na camada subsuperficial (10-14 cm) também não ocorreu diferença significativa para densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade nos tratamentos avaliados (Tabela 2). Contudo, em todos os tratamentos os valores de macroporosidade do solo foram inferiores a 0,10 cm³ cm⁻³. Comumente é destacado que valores inferiores a 0,10 m³ m⁻³ de macroporosidade podem comprometer a aeração e as trocas gasosas no solo, e assim, restringir o desenvolvimento das plantas (VAN LIER, 2010).

Com relação à densidade do solo, geralmente os solos arenosos possuem valores mais elevados, em torno de 1,3 a 1,8 g cm⁻³, enquanto, os solos argilosos possuem valores de

densidade menor, de 0,9 a 1,6 g cm⁻³. Em relação aos valores densidade do solo na camada de 10-14 cm, em todos os tratamentos, os valores permaneceram abaixo de 1,75 Mg m⁻³, acima desse valor, pode ocorrer limitação do crescimento do sistema radicular das plantas em solos arenosos (REICHERT et al., 2003). Investigando limite críticos de densidade em um Argissolo com plantas de cobertura, Reinert et al. (2008) observaram que até o valor de densidade de 1,75 Mg m⁻³ as raízes das plantas de cobertura cresceram normalmente, e acima deste valor ocorreu restrição, com deformações na morfologia das raízes.

Mallmann (2017) avaliou o efeito do uso de plantas de cobertura sobre as propriedades físico-hídricas de um Argissolo por um curto período e relatou que não ocorreram alterações significativas nas propriedades físicas do solo como densidade, porosidade, estabilidade de agregados e condutividade hidráulica. No presente estudo, comparando a área com plantas de cobertura e a área com vegetação espontânea também não foi observada grande variação sobre as propriedades físicas do solo. Portanto, em uma perspectiva de promover boas condições para o solo em determinado sistema, com este período de avaliação, tanto as plantas de cobertura quanto a vegetação espontânea cumprem esta função.

As alterações promovidas no solo pelo uso de plantas de cobertura geralmente são constatadas ao longo do tempo, como ocorreu para o carbono orgânico. Para os teores de carbono orgânico total (COT), verificou-se diferença significativa entre os tratamentos na camada de 1-4 cm e na camada de 10-14 cm não foi constatada diferença (Figura 13). A VE teve o menor valor de COT, enquanto a SP, AP.E.F e AM.F, os maiores valores.

Por outro lado, as raízes das gramíneas também são eficazes em incrementar o teor de matéria orgânica no solo. Hernani et al. (2013) buscaram compreender melhor a relação entre a presença de cobertura vegetal e raízes das gramíneas e os atributos do solo e constataram que as raízes ativas da *Brachiaria ruziziensis* foram mais eficazes para incrementar o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-5 e 5-10 cm do que a simples cobertura morta.

Neste estudo as plantas de cobertura com maior adição de N ao solo (Figura 12), também promoveram maior incremento no conteúdo de carbono orgânico total na camada de 1-4 cm (Figura 13). Plantas de cobertura que forneçam alta quantidade de resíduos e simultaneamente possibilitem um balanço de nitrogênio positivo no solo evitam a perda de matéria orgânica do solo (MOS) e podem proporcionar seu acúmulo, enquanto o balanço negativo de nitrogênio no solo impede o acúmulo de MOS (ROSCOE et al., 2006; SALTON et al., 2005). Em função disso, para o acúmulo de MOS, o ideal seria incluir no sistema plantas com alta capacidade de aporte de resíduos, como as gramíneas, mas também plantas que promovam o incremento de N ao solo, como as leguminosas. As gramíneas respondem muito

bem a adição de nitrogênio, assim, a consorciação com leguminosas estaria favorecendo a produção de biomassa das gramíneas.

O uso de coberturas vegetais pode garantir a estabilidade da matéria orgânica do solo e o incremento de carbono (LEWIS et al., 2017), diminuindo assim a quantidade de CO₂ liberado para atmosfera (DENARDIN et al., 2014). O incremento de carbono orgânico no solo ocorre por meio da entrada de material orgânico, através da senescência da biomassa acima e abaixo do solo, queda de folhas, animais mortos e outros tipos de resíduos.

É válido destacar que os plantios florestais, como da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) podem servir para o sequestro e fixação de C (DENARDIN et al., 2014). Porém, o monocultivo de erva-mate pode reduzir os estoques de C, como confirmado por Piccolo et al. (2008), em função da retirada de galhos e folhas, matéria-prima para produção de erva-mate, aliado ao cultivo convencional, pelo tráfego contínuo para o controle mecânico de plantas daninhas em solo sem cobertura vegetal. Os autores declararam ainda que na área onde a erva-mate foi cultivada em associação com capim-elefante por 10 anos, o conteúdo de C do solo aumentou 19% em relação ao monocultivo de erva-mate.

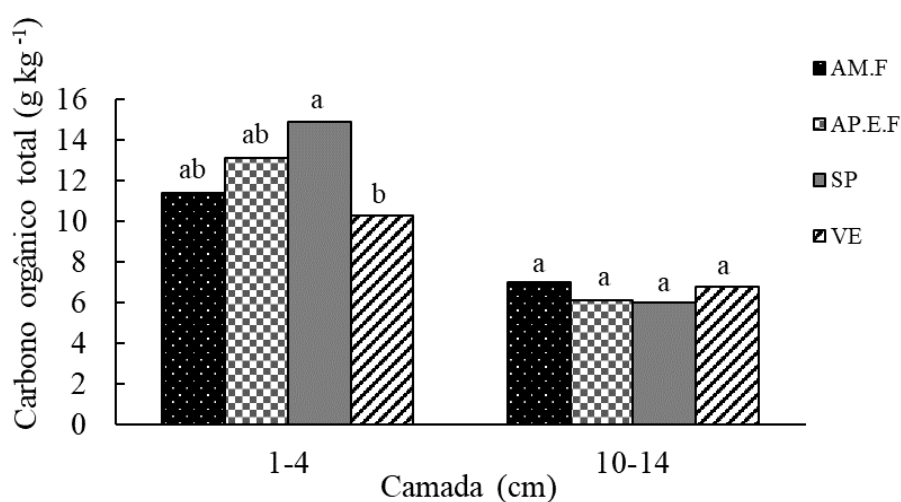
Com o intuito de avaliar o potencial de sistemas de preparo de solo e de culturas na conservação de carbono orgânico em um Argissolo Vermelho da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS), Costa et al. (2008) afirmam que sistemas como o plantio direto, com mínima mobilização contribuem para o balanço positivo de carbono orgânico ao solo. E acrescentam que esse efeito é potencializado pela inserção de plantas de cobertura leguminosas, pois favorecem o acúmulo de carbono, já que fornecem N ao solo, assim permitem maior adição de resíduos vegetais das gramíneas cultivadas em sucessão. Ressalta-se que a disponibilidade de nitrogênio no solo é determinante para o acúmulo de MOS, isto sugere que os sistemas produtivos devem incluir não apenas culturas com alto aporte de resíduos, como as gramíneas, mas também culturas com a função de inserir nitrogênio no sistema, como leguminosas (SALTON et al., 2005).

Práticas de manejo conservacionistas, especialmente a ausência do revolvimento do solo e inclusão de espécies com elevado aporte de resíduos e que disponibilizem N ao sistema resultam na manutenção ou até mesmo incremento da MOS. Por isso devem ser recomendadas com a finalidade de aumentar a produtividade dos cultivos e reduzir os impactos causados ao ambiente, principalmente pela elevada emissão de CO₂ para atmosfera (COSTA et al., 2008), contribuindo para maior estabilidade do sistema.

Almejando a melhoria da qualidade ambiental, Amado et al. (2001) avaliaram o potencial de plantas de cobertura no acúmulo de carbono em sistema plantio direto e

observaram aumento no estoque de carbono orgânico com o uso de planta de cobertura leguminosa em comparação ao pousio. Os autores salientam que o uso de coberturas do solo, especialmente as leguminosas tem efeito sobre a produtividade da cultura comercial, além disso, consistem em uma estratégia importante para melhoria da qualidade ambiental.

Figura 13 – Carbono orgânico total do solo (g kg^{-1}) avaliado nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), para as camadas 1-4 e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.



Fonte: Autora.

5.2 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS AGREGADOS ESTÁVEIS EM ÁGUA

Para os dois índices de estabilidade de agregados avaliados, DMP e DMG não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos na camada superficial (Figura 14 e 15). Os valores de ambos os índices foram maiores que 2 mm para todas as coberturas do solo. Esses resultados sugerem que tanto as plantas de cobertura quanto a vegetação espontânea composta por gramíneas foram eficientes para aumentar os valores de DMP e DMG na camada superficial. Considera-se que a ausência do revolvimento do solo associado a cobertura vegetal neste sistema com cultura perene ocasionou efeito positivo na estabilidade de agregados. Este resultado evidencia a importância da adoção de plantas de cobertura em área de produção de culturas perenes.

As plantas de cobertura proporcionaram maior incremento de COT em relação a vegetação espontânea na camada superficial (Figura 13), mas não refletiu em diferenças entre os tratamentos para a estabilidade de agregados. Logo, percebe-se que outros fatores

contribuíram para o estado de agregação do solo. O sistema radicular das gramíneas, por exemplo, é extremamente eficiente em promover uma boa estrutura do solo, formando agregados mais estáveis, assim pode ter contribuído para os valores altos de agregação na vegetação espontânea.

Os resultados do estudo de Castro Filho et al. (1998) evidenciaram que o sistema plantio direto melhorou a agregação na superfície do solo, pois elevou a porcentagem de agregados > 2,00 mm, sendo atribuída ao acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo e aumento do carbono orgânico. A relação positiva entre o carbono orgânico e a estabilidade de agregados é destacada por alguns trabalhos, como o de Pereira et al. (2009), Perin et al. (2002), Portella et al. (2012) e Wendling et al. (2005). No entanto, outros não verificaram clara relação entre o carbono orgânico e a estabilidade de agregados como o de Vezzani e Mielniczuk (2011) e Cunha Neto et al. (2018).

A matéria orgânica é considerada um componente fundamental para os processos de formação e estabilização dos agregados (SIX et al., 2004; TISDALL; OADES, 1982). O aumento da estabilidade dos agregados deve-se principalmente pela capacidade da matéria orgânica aderir as partículas minerais formando ligações argilo-metal-húmicas (EDWARDS; BREMNER, 1967).

Contudo, outros fatores são fundamentais para o processo de formação e estabilização dos agregados, como a fauna do solo, os microrganismos, as raízes, agente inorgânicos e variáveis ambientais (SIX et al., 2004). Portanto, é possível supor que neste estudo as raízes foram essenciais para o processo de agregação devido aos valores estatisticamente semelhantes de DMP e DMG das plantas de cobertura e a vegetação espontânea. Corroborando com este resultado, Vezzani e Mielniczuk (2011) constataram a ação eficiente da gramínea pangola sobre a agregação, devido a ação do seu sistema radicular e das hifas de fungos, considerados os principais agentes agregantes, já que, os valores de carbono orgânico estavam inferiores a outros sistemas de uso do solo. De acordo com o exposto, Brandão e Silva (2012); Carpenedo e Mielniczuk (1990) e Silva e Mielniczuk (1997) relatam a eficiência das gramíneas em promover a formação de agregados estáveis no solo, especialmente pela ação das raízes.

A contribuição das gramíneas para o processo de formação e estabilização dos agregados se dá por meio de diversos fatores. Primeiro, elas possuem alta densidade de raízes, assim, durante seu crescimento exercem pressão sobre as partículas do solo aproximando-as, e removem a água ao seu redor, favorecendo o aumento da coesão entre as partículas (BRAIDA et al., 2011). Aliado a isso, a constante renovação do sistema radicular e posterior decomposição contribuem para o aumento do conteúdo de carbono orgânico do solo (VEZZANI;

MIELNICZUK, 2011) e para produção de exsudados orgânicos que estimulam a atividade microbiana do qual os subprodutos colaboram na estabilização dos agregados (BRANDÃO; SILVA, 2012).

Outro tratamento a ser considerado é o AM.F, que resultou em altos valores de DMP, que significa a formação de agregados maiores no solo. O amendoim forrageiro promove uma alta porcentagem de cobertura do solo e de produção de fitomassa em relação a outras espécies leguminosas (DALCOMO et al., 1999), além de apresentar um sistema radicular denso e bem desenvolvido, com grande quantidade de raízes finas, o que pode explicar os altos valores na agregação do solo (PERIN et al., 2002).

Assim como o AM.F, o tratamento AP.E.F, dispôs de um alto valor de DMP. Neste sentido, o sistema radicular da aveia preta pode contribuir para agregação do solo. Segundo Torres et al. (2015b) mais de 80% do sistema radicular fasciculado das Poáceas desenvolvem-se até os 20 cm de profundidade, enquanto o sistema radicular das Fabáceas atingem maiores profundidades, porém desenvolvem-se pouco lateralmente, fato que pode afetar a capacidade de agregação das partículas. Os autores concluíram que os melhores índices de agregação do solo ocorreram nas áreas cultivadas com Poáceas.

Em relação ao DMG, que representa uma estimativa do tamanho da classe de agregados de maior ocorrência, os valores foram > 2 mm para todas as coberturas avaliadas. Quanto maior o DMP e DMG, maior a contribuição do manejo na estabilização dos agregados do solo (HERNANI; SALTON 2009; TORRES et al., 2015a). Sistemas com alta deposição de resíduos orgânicos ao solo concomitantemente com alta quantidade de raízes estimulam a biomassa microbiana (SOUZA et al., 2010), importantes agentes do processo de estabilização dos agregados. Na área experimental do presente estudo, Rocha (2018) avaliou o efeito de plantas de coberturas no tempo e não observou diferença significativa, mas acrescenta que ocorreu aumento do DMG de abril de 2015 para novembro de 2016 nos tratamentos do amendoim forrageiro e vegetação espontânea.

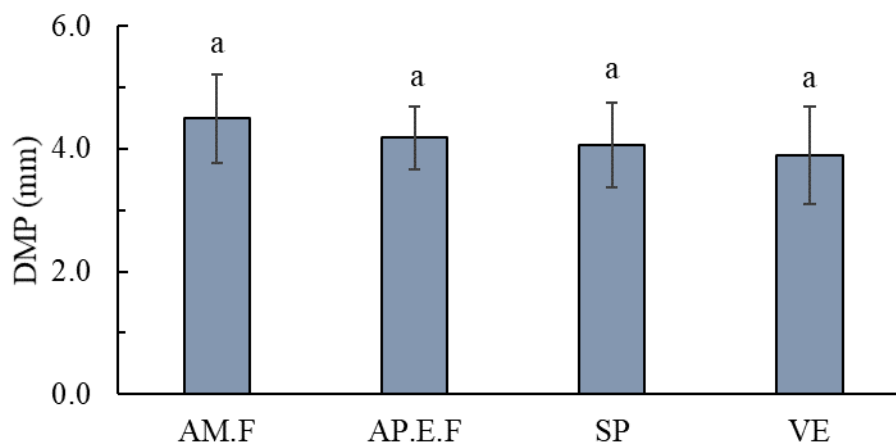
Em estudo conduzido por Luciano et al. (2010), os autores verificaram que a mata nativa teve um valor de DMG considerado alto, de 4,21 mm na camada superficial (0 – 4 cm) e no plantio direto, implantado há um ano o valor de DMG foi de 4,62 mm. Os mesmos autores consideram que os altos valores de DMG indicam agregados do solo mais estáveis, porém essa maior estabilidade no plantio direto pode ser resultado da compactação do solo.

Pinheiro et al. (2004) avaliaram o efeito dos sistemas de preparo na agregação do solo, e relatam que agregados com diâmetro maior que 2 mm são indicadores adequados da influência do manejo do solo sobre a agregação. Nesse mesmo estudo, para a camada de 0-5 cm, no plantio

direto mais de 50% dos agregados estavam na classe > 2 mm de diâmetro e no preparo convencional apenas 30%. Os resultados indicam que a mobilização do solo e a ausência de práticas conservacionistas causam redução na agregação, o que torna o solo mais suscetível a erosão, com redução da fertilidade e da produção vegetal.

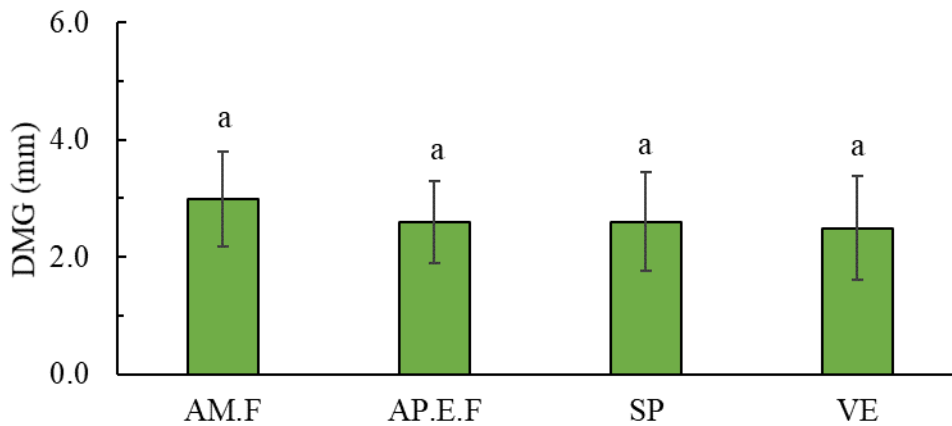
É importante destacar que os sistemas de manejo sem revolvimento do solo ao longo do tempo tendem a recuperar ou favorecer o aumento da agregação (ROCHA, 2018; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011; PORTELLA et al., 2012; WENDLING et al., 2012). A ausência do revolvimento e o uso de plantas de cobertura caracterizam um manejo conservacionista do solo e influenciam na formação e estabilização dos agregados, consequentemente na estabilidade estrutural do solo. A formação de agregados estáveis no solo é essencial para manutenção de sua qualidade, visto que agregados com baixa estabilidade são menos resistentes e desagregam-se facilmente. Desta forma, admite-se que os sistemas produtivos que mantenham uma boa estrutura do solo estão propensos a altas produtividades (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990), pois a estrutura é uma propriedade primordial para que o solo realize suas funções, além evitar a sua degradação.

Figura 14 – Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados estáveis em água, avaliado nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), na camada de 1-4 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.



Fonte: Autora.

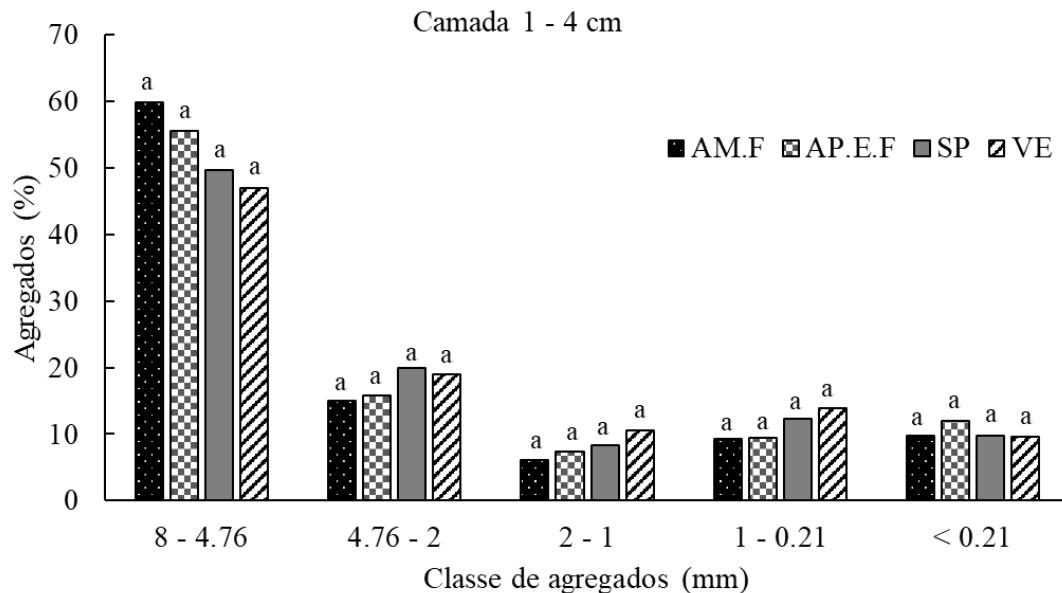
Figura 15 – Diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados estáveis em água, avaliado nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), na camada de 1-4 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.



Fonte: Autora.

Na avaliação da porcentagem de agregados não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados. Em todos os tratamentos, a maior porcentagem de agregados ocorreu na classe de 8,00 – 4,76 mm, classe de maior tamanho avaliada (Figura 16). Agregados maiores são reflexos de uma boa agregação do solo, confirmando o efeito positivo do uso e manejo adotados neste sistema. Um solo mais agregado é mais resistente a rupturas e a desagregação, além disso, uma boa agregação reflete em maior aeração, facilita trocas gasosas e a infiltração de água no solo (SIX et al., 2004). Logo, a estabilidade de agregados é utilizada como um dos indicadores de qualidade física do solo, pois é sensível a alterações causadas pelo manejo e desta forma, permite monitorar a eficiência do sistema de manejo e realizar inferências a respeito das condições do solo (PORTELLA et al., 2012; TORRES et al., 2015a).

Figura 16 – Distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água, avaliada nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE) na camada de 1-4 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.



Fonte: Autora.

5.3 PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR

Os valores de permeabilidade ao ar não apresentaram distribuição normal, devido a isso foi necessário transformá-los para forma raiz quadrada, para se obter uma distribuição mais próxima da normalidade e prosseguir com a análise estatística paramétrica. Maiores valores de permeabilidade ao ar (K_a) ocorreram na camada de 1-4 cm (Figura 17A) e menores valores na camada de 10-14 cm (Figura 17B). Não houve diferença significativa entre os tratamentos em ambas as camadas.

Comumente as camadas superficiais do solo possuem maior permeabilidade ao ar do que as camadas mais profundas (BRAGA et al., 2015). Os valores da K_a são influenciados pela estrutura do solo, especificamente no que se refere a quantidade, tamanho e continuidade de poros (SILVA et al., 2009; TULI et al., 2005). Em razão disso, as camadas superficiais que geralmente possuem maior teor de matéria orgânica, conseqüentemente maior atividade de raízes e de microrganismos contribuem para a maior quantidade e continuidade de poros no solo.

Sistemas com plantas de coberturas tendem a aumentar a permeabilidade ao ar, pois são utilizadas como estratégia para recuperação estrutural do solo, principalmente com a finalidade de amenizar os efeitos da compactação (GUEDES FILHO et al., 2015; TANG et al., 2011). Porém neste estudo não foram evidenciadas diferenças entre os tratamentos. Torna-se necessário relatar que no momento da coleta das amostras de solo, nos tratamentos AM.F e SP, observou-se grande massa de raízes. No AM.F havia uma grande quantidade de raízes finas, enquanto na SP, as raízes encontradas eram mais grossas, ocasionando dificuldade para a retirada das amostras com estrutura preservada em ambos os tratamentos. Assim, supõe-se que a presença de raízes pode ter interferido nas medições da permeabilidade e no resultado da análise.

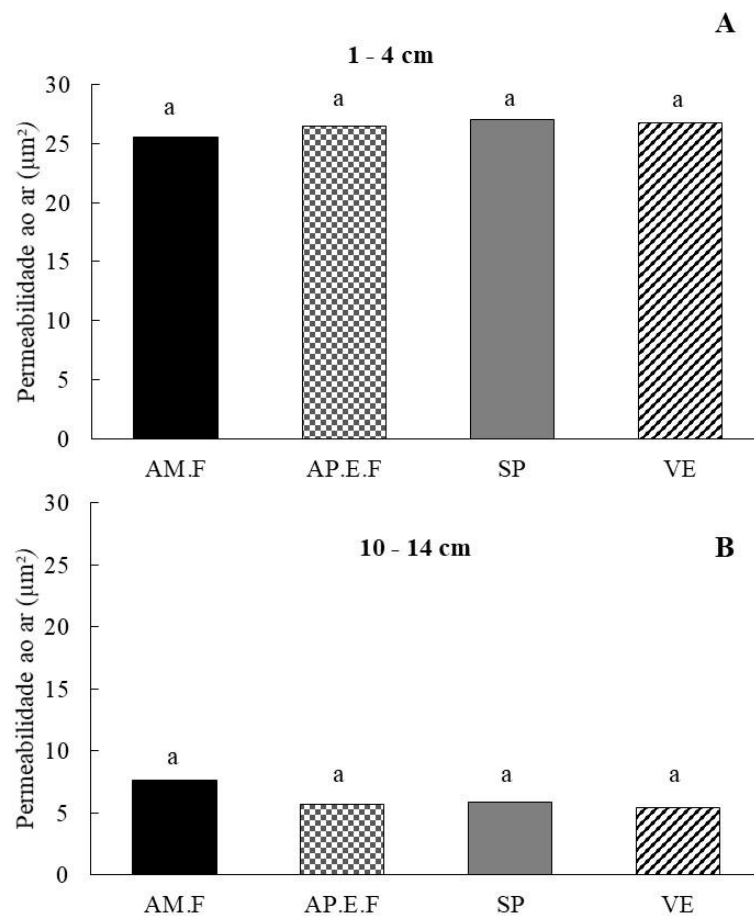
Após a morte da planta de cobertura, as raízes permanecem no solo por um determinado período e posteriormente se decompõe originando os bioporos, isso altera a estrutura do solo, de forma benéfica, pois facilita os fluxos de água e ar. Os canais promovidos pelas raízes normalmente aumentam a porosidade total, o tamanho e continuidade dos poros (CHEN et al., 2014). Deste modo, é possível que os valores de permeabilidade ao ar para as plantas de cobertura AM.F e SP, fossem superiores aos obtidos neste estudo, caso fossem analisados em outro período, após a decomposição de suas raízes.

De acordo com McQueen e Shepherd (2002) um valor de K_a de $1 \mu\text{m}^2$ é sugerido como limite crítico, abaixo desse valor as condições se tornam desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas. Com isso, afirma-se que os valores de K_a não são limitantes neste sistema para o desenvolvimento das plantas, reflexo de uma boa estrutura do solo em todas as coberturas avaliadas. Mas é necessário destacar que Mentges et al. (2016) verificaram que a permeabilidade ao ar é diretamente influenciada pelo conteúdo de água, pois a diminuição da umidade ocasiona aumento da permeabilidade ao ar, em virtude do aumento da quantidade e continuidade dos poros disponíveis para o fluxo de ar no solo.

Com o objetivo de comparar o efeito de plantas de cobertura em solos compactados sobre a permeabilidade do solo ao ar, Chen et al. (2014) verificaram aumento da permeabilidade ao ar com o uso de plantas de cobertura (nabo forrageiro e colza) cultivadas sob alto nível de compactação. Os autores atribuíram este resultado aos canais radiculares formados que possibilitaram maior continuidade dos poros, influenciando nos valores obtidos. No entanto, os mesmos autores notaram que para os solos não compactados ou arenosos o efeito das plantas de cobertura sobre permeabilidade ao ar foi menos pronunciado e mencionam que em solos arenosos a permeabilidade ao ar estaria altamente correlacionada aos macroporos e menos correlacionada com a continuidade de poros, o que explicaria este resultado.

O funcionamento do sistema poroso, principalmente o fluxo de ar é afetado pela deformação do solo, que pode ser ocasionada principalmente pelo tráfego de máquinas e animais e pelos sistemas de cultivo (MENTGES et al., 2016). Geralmente promovem aumento da densidade, causam alterações no tamanho, na forma e distribuição dos poros do solo (LIMA et al., 2005). Essas alterações são desfavoráveis para os fluxos de gases entre o solo e atmosfera. Por outro lado, sistemas que promovem melhorias na estrutura do solo, com aporte de resíduos, aumento do conteúdo de matéria orgânica, da atividade biológica e da atividade de raízes, contribuem para diminuição da densidade e formação de poros biológicos com reflexos na permeabilidade ao ar.

Figura 17 – Permeabilidade do solo ao ar (μm^2) avaliada em amostras submetidas à tensão de água de 10 kPa para os tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), para as camadas de 1-4 cm (A) e 10-14 cm (B) em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.



5.4 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

Para as duas camadas avaliadas não foram observadas diferenças significativas na avaliação da resistência do solo à penetração entre os tratamentos (Figura 18). A menor resistência do solo à penetração ocorreu na camada superficial, com valores menores que 2 MPa. Mesmo sem diferenças significativas é possível observar que na camada superficial o valor de RP foi menor para as plantas de cobertura e maior na vegetação espontânea, valores que possivelmente estão relacionados a densidade do solo e maior conteúdo de carbono orgânico total. Somado a isso, os menores valores de RP na camada superficial podem estar relacionados com a maior umidade volumétrica do solo. Uma vez que se observa correlação significativa entre a RP, a U_v e a D_s (TORRES et al., 2015b). A U_v diferiu entre os tratamentos na camada superficial, com maior valor para a VE, SP, AP.E.F e menor valor para o AM.F (Figura 19).

Figura 18 – Resistência do solo à penetração (MPa), avaliada nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), nas camadas de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. ns: não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

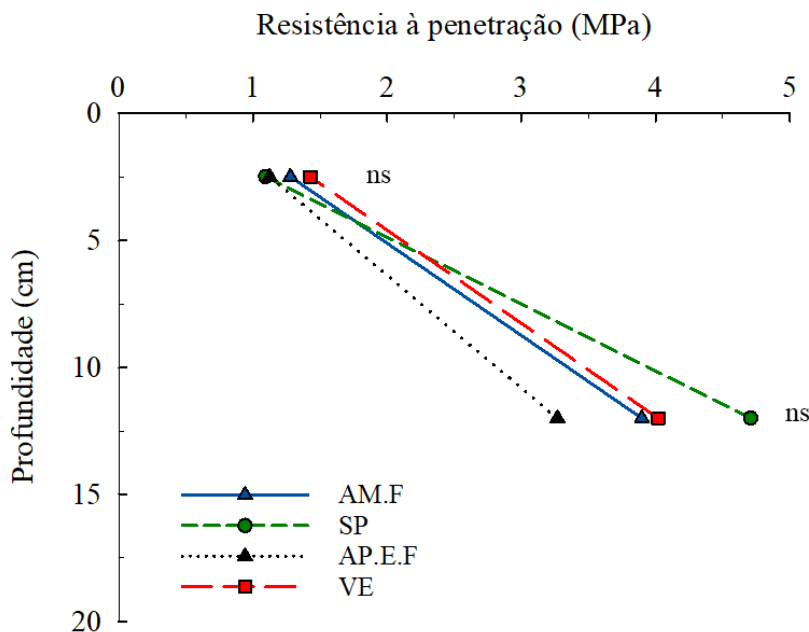
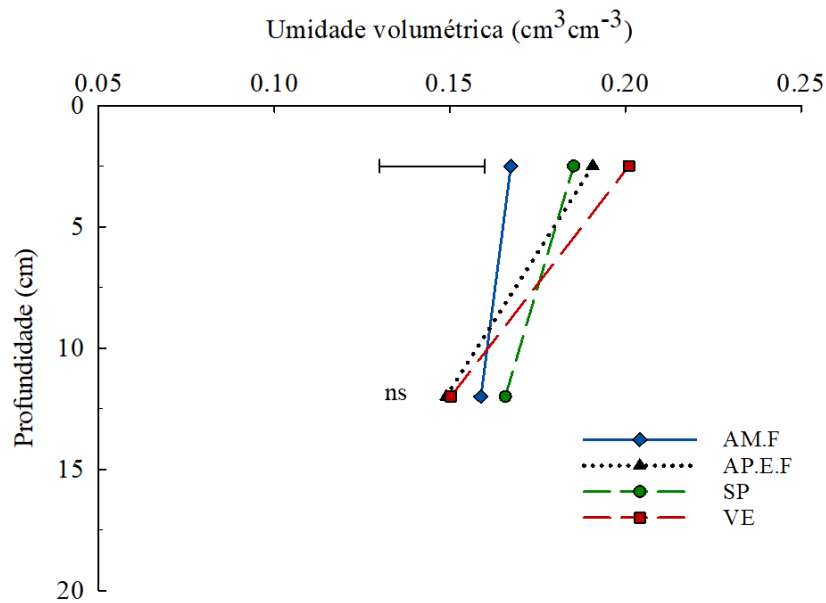


Figura 19 – Umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) avaliada nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), nas camadas de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Barra horizontal indica a diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade; ns: não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



Em uma área anteriormente cultivada sob plantio direto, que apresentava sinais de degradação foram estabelecidas plantas de cobertura (período de dois e três anos) a fim de verificar possíveis alterações nos atributos físicos do solo, porém, os autores Reinert et al. (2008) declararam que não ocorreu diferença entre o uso de plantas de cobertura e o pousio na avaliação da RP, sugerindo que seria necessário um período mais longo de avaliação para atuação das plantas de cobertura e modificação nos atributos físicos do solo.

Em estudo de Alvarez et al. (2017), os autores realizaram uma análise de informações disponíveis a respeito do efeito de plantas de cobertura de inverno sobre as propriedades químicas e físicas do solo, em experimentos com duração de 1 a 15 anos, na região dos Pampas Argentinos. E observaram que as plantas de cobertura possibilitaram a redução da resistência do solo à penetração em todos experimentos e profundidades avaliadas (0-10 e 10-20 cm) em relação ao pousio.

Após o período de cinco anos de implantação das plantas de coberturas no sistema com erva-mate esperava-se que as plantas de cobertura se sobressaíssem a vegetação espontânea, em relação as melhorias nas propriedades físicas do solo, entre elas, na RP. No entanto, a

medição da RP na vegetação espontânea resultou em valores semelhantes as plantas de cobertura, demonstrando que essa vegetação também propicia uma boa condição para o solo.

Apesar dos baixos valores de RP neste sistema na camada superficial, para a camada subsuperficial (10-14 cm), os valores de RP foram altos e ultrapassaram o valor de 2 MPa, em todos os tratamentos, valor considerado restritivo ao crescimento das raízes (RICHART et al., 2005; TAYLOR et al, 1966; TORMENA et al., 1998). Entretanto, Moraes et al. (2014) afirmam que o limite crítico de RP de 2 MPa é válido para sistemas de preparo intensivo do solo, como o preparo convencional, mas para sistemas de preparo mínimo com escarificação o valor restritivo é de 3 MPa, já para o sistema de plantio direto, é de 3,5 MPa. Asseguram ainda que utilizando esses valores como limitantes, o rendimento de grãos para as culturas anuais avaliadas não é prejudicado.

Contudo, ainda há incertezas quanto a estes valores, e é importante considerar que para culturas florestais os valores também podem ser ampliados, aproximadamente 2,5 e 3 MPa, pois a partir desses valores observa-se redução no crescimento da raiz (CAMBI et al., 2015; SINNETT et al., 2008). Bécél et al. (2012) buscaram compreender os efeitos das condições do solo no processo de crescimento das raízes de plantas perenes (pessegueiro) e relatam que o aumento da resistência do solo à penetração afeta a ramificação das raízes e causa redução em sua taxa de alongamento, especialmente nas raízes grossas.

A menor umidade das amostras no momento da realização do teste pode ter interferido nas medições de RP principalmente para a camada de 10-14 cm, elevando os valores de RP. Já que a umidade do solo para os tratamentos avaliados foi baixa e variou entre 0,14 e 0,16 cm³ cm⁻³, sem diferença significativa (Figura 19). Na fase de realização do teste de RP de bancada, ocorreu um problema com a haste do penetrômetro que seria utilizado e durante a espera da aquisição do novo equipamento as amostras perderam umidade. Outro fator que pode ter contribuído para os maiores valores de RP é a maior coesão e estabilidade de agregados, possivelmente proporcionadas pela cobertura vegetal, embora a estabilidade de agregados não fosse avaliada neste estudo para a camada de 10 - 14 cm.

No entanto, a detecção destes valores de RP na camada de 10-14 cm não necessariamente indicam degradação da estrutura do solo. Tal fato, é explicado pelo sistema uso e manejo adotados, cujas condições estruturais do solo são preservadas, devido a ausência de mobilização juntamente com a contínua adição de resíduos vegetais. Com isso, proporciona uma boa estrutura, poros contínuos, bioporos e agregados bem desenvolvidos como identificados neste estudo. Assim, a penetração da raiz é facilitada, mesmo sob alta resistência do solo.

As raízes das culturas perenes crescem a uma profundidade maior, ultrapassando a camada de 10-14 cm. A erva-mate, cultura perene implantada na área experimental, concentra a maior parte de suas raízes até a profundidade de 45 cm (MEDRADO et al., 2000), necessitando assim de boas condições para seu desenvolvimento. Existem alguns mecanismos que as raízes utilizam para se desenvolver em condições de alta resistência do solo, elas costumam encontrar rachaduras e fissuras no solo que podem explorar, (SINNETT et al, 2008), e podem ainda desenvolver-se lateralmente não restringindo-se a áreas compactadas do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005). Diante destes resultados, salienta-se que é necessário cautela quando se utiliza a RP para avaliar a condição estrutural do solo.

5.5 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO A CAMPO

A resistência do solo à penetração é uma propriedade físico-mecânica que reflete à dificuldade que uma raiz enfrenta para penetrar as camadas do solo. A Figura 20 demonstra a RP para as coberturas de solo avaliadas neste estudo, evidenciando maior RP no AM.F, principalmente em maior profundidade, com valores de 2,5 e 3 MPa. Observa-se ainda que os valores de RP são menores nos tratamentos AP.E.F e VE, em relação aos tratamentos AM.F e SP.

O amendoim forrageiro é uma planta leguminosa herbácea, de ciclo perene, que garante uma boa cobertura do solo, especialmente devido a sua densa camada de estolões, que se fixam ao solo por meio de numerosas raízes que crescem nos nós e sua elevada produção de massa seca (PERIN et al., 2003). Por isso, possui imenso potencial de uso como cobertura viva permanente de solo especialmente em pomares, pois compete com espécies de ocorrência espontâneas e interferem no seu ciclo reprodutivo. Quanto às raízes, Perin et al., (2002) verificaram que o amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) apresentou área e massa radicular superiores as demais coberturas leguminosas perenes, cudzu tropical (*Pueraria phaseoloides*) e siratro (*Macroptilium atropurpureum*) até 40 cm de profundidade e ressaltaram ainda que essa característica contribuiu para potencializar a agregação do solo.

As raízes além de melhorar a agregação por meio da exsudação de compostos orgânicos que estimulam a microbiota do solo, durante seu crescimento exercem pressão mecânica que resulta na aproximação das partículas, refletindo no secamento do solo em seu entorno e consequentemente no aumento da coesão (BRAIDA et al., 2011). Corroborando com esta explicação, observa-se na Figura 21, menor valor de umidade do solo no AM.F, mas com

diferença significativa apenas na última camada. Este menor valor de umidade do solo pode ter relação com o maior valor de resistência demonstrado neste tratamento.

A umidade do solo avaliada no momento de realização da RP, pode ser observada na Figura 21, nas duas primeiras camadas não houve diferença significativa para os tratamentos, já na última camada os tratamentos diferenciaram-se com maior valor de umidade na VE. A umidade é um fator fortemente relacionado com a resistência que as raízes enfrentam ao tentar penetrar no solo, pois em condições de baixa umidade no solo, a coesão entre as partículas aumenta. Logo, a pressão hidrostática das células das raízes diminui, sendo essa a responsável por empurrar a coifa e a região meristemática (HAMZA; ANDERSON, 2005). Deste modo, a raiz não terá força suficiente para superar a resistência do solo.

Em um sistema de manejo com plantas de cobertura permanentes nas entrelinhas de laranjeira em Argissolo Vermelho, Fidalski e Tormena (2007) avaliaram a RP e observaram que a gramínea (*Paspalum notatum*) proporcionou menor valor de RP, enquanto o amendoim forrageiro e a vegetação espontânea maiores valores na camada de 5-10 cm de profundidade. E recomendam a utilização desta gramínea nas entrelinhas dos pomares, devido a melhoria na qualidade física do solo.

Neste sentido, Torres et al. (2015b) avaliaram atributos físicos em área sob plantio direto há doze anos com uso de distintas coberturas do solo (gramíneas e leguminosas) e rotação de milho e soja e relataram a ocorrência de valores muito altos de RP a partir da profundidade de 10-20 cm para todas as coberturas avaliadas, e destacam que os valores de U_v mantiveram-se constantes e os de D_s muito próximos em todas as profundidades. Justificaram que outros fatores podem ter influenciado a RP, como o sistema radicular denso e emaranhado das gramíneas cultivadas, que provavelmente interferiu na medida de RP.

No estudo de Silva et al. (2012), que avaliou o efeito de distintas coberturas do solo na resistência a penetração em um sistema agroflorestal, os autores não encontraram diferença significativa nos valores de resistência à penetração. E verificaram que em todos os tratamentos (cultivo de leguminosas, cultivo de feijão-caupi e mandioca e vegetação espontânea) na camada de 0-10 cm, os valores de RP ficaram abaixo de 1,5 MPa. Este fato foi atribuído ao efeito da incorporação da matéria orgânica ao solo, resultante dos resíduos orgânicos provenientes das árvores e da vegetação utilizada como cobertura.

Para a cobertura do solo SP, os valores de RP atingiram 1,5 MPa até a profundidade de 10 cm e em maior profundidade os valores passaram a 2 MPa, chegando em 2,5 MPa em alguns pontos. Nas coberturas AP.E.F e na VE os valores de RP foram similares e mais baixos na faixa de 1,5 a 2 MPa, a partir dos 10 cm até os 30 cm de profundidade, a RP aumentou chegando a

valores de 2 MPa. Sinnott et al. (2008) afirmam que em seu estudo as raízes das árvores foram significativamente reduzidas à medida que a RP aumentou e sugerem que o desenvolvimento das raízes de árvores é prejudicado com valores de resistência do solo à penetração de 2 a 3 MPa.

É válido ressaltar que a resistência do solo à penetração real enfrentada pela raiz normalmente é menor que a determinada com o uso de penetrômetros. Assim, é possível que mesmo com valores de RP acima dos citados na literatura, como restritivos ao desenvolvimento radicular, se houver condições favoráveis como difusão de oxigênio, boa umidade do solo e nutrientes, as raízes podem usar estratégias para seu desenvolvimento, ainda que ocorram deformações morfológicas.

Apesar de maior valor de RP no AM.F, nota-se que a erva-mate, cultura principal, demonstra um bom estabelecimento consorciada com esta cobertura, evidenciada pela maior altura das árvores e biomassa comercial avaliadas antes da poda da erva-mate, realizada em setembro de 2020 (dados não apresentados). Mesmo em zonas com alta RP, o desenvolvimento das culturas pode não ser comprometido, devido aos mecanismos utilizados pelas raízes para seu crescimento.

Figura 20 – Resistência do solo à penetração (MPa) medida em uma transeção de 2 m com a planta de erva-mate, na metade da distância (no zero da figura), avaliada nos tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

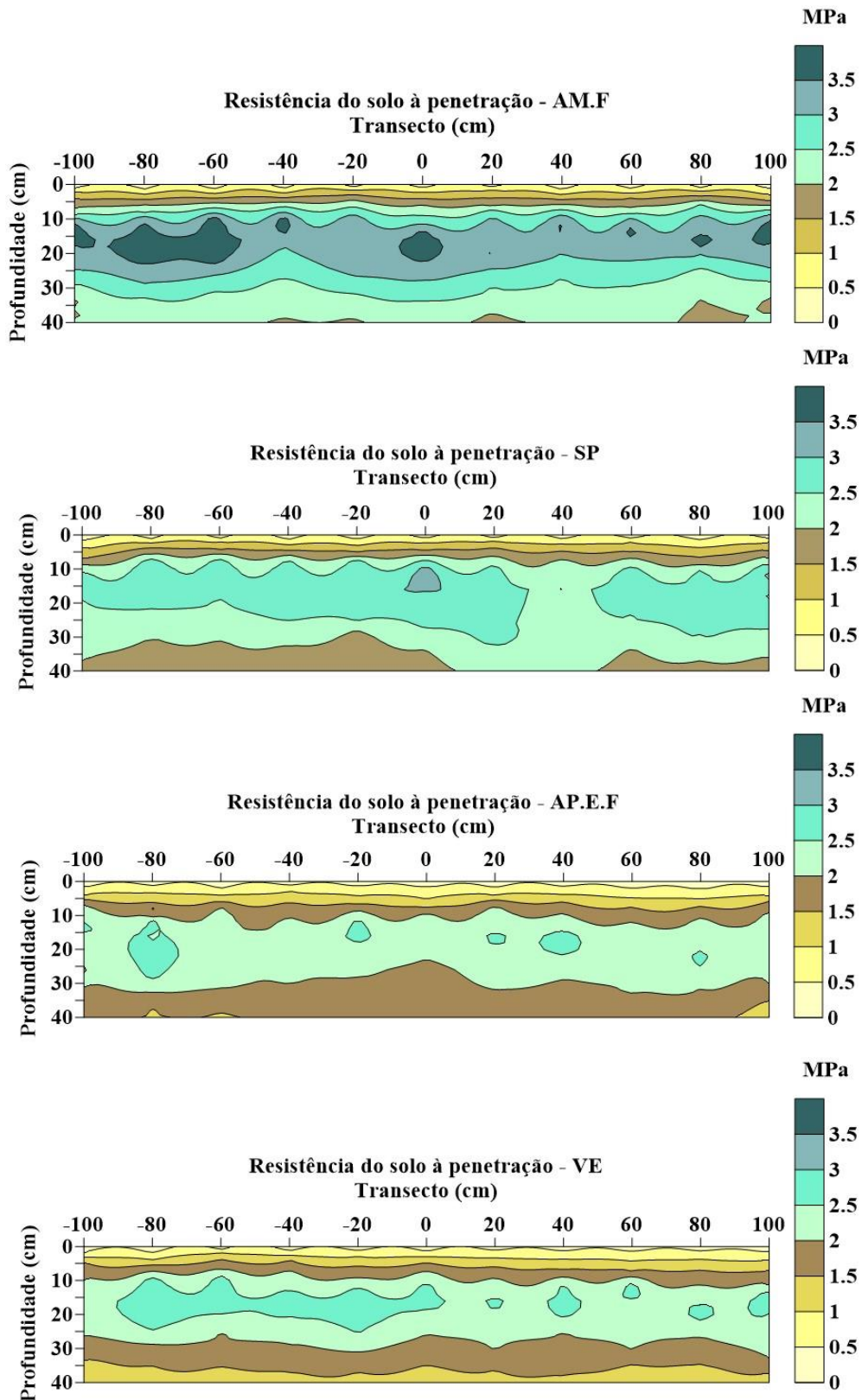
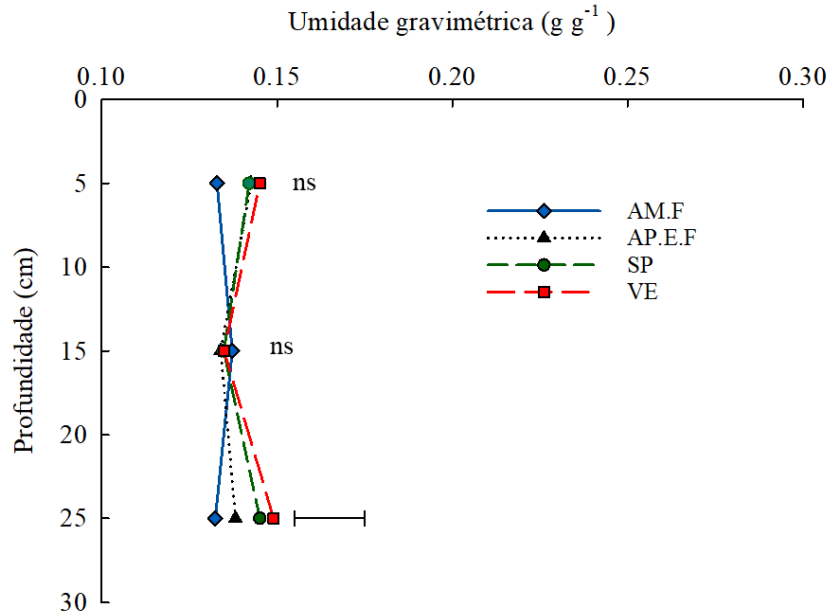


Figura 21 – Umidade gravimétrica do solo (g g^{-1}) no momento da avaliação da RP, para os tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F), soja perene (SP) e vegetação espontânea (VE), em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade; ns: não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



5.6 RESISTÊNCIA DO SOLO AO CISALHAMENTO

A resistência do solo ao cisalhamento pode ser representada pela equação de Mohr-Coulomb ($\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}\phi$). Sabe-se que alterações no sistema de uso e manejo do solo podem afetar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, os quais são representados pela coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ).

Os valores dos parâmetros mecânicos, c e ϕ para as coberturas de solo avaliadas podem ser visualizados na Tabela 3. A coesão, que corresponde a força de ligação entre as partículas, mostrou-se alta para as coberturas avaliadas, principalmente na camada de 10-14 cm, com valor de 87 kPa na cobertura AP.E.F, mas não foi verificada diferença significativa entre os tratamentos. Na camada superficial também houve uma tendência de maior valor de c na AP.E.F e menor valor na VE. O consórcio de plantas de cobertura com gramíneas e leguminosas promove melhorias na agregação e estruturação do solo, além de produzir resíduos com uma relação C/N intermediária, o que favorece a mineralização de nitrogênio (GIACOMINI et al., 2004) e proporciona maior acúmulo de carbono no solo ao longo do tempo (CALEGARI, 2008).

Um dos benefícios mais esperados com o uso de plantas de cobertura é o aumento do carbono orgânico no solo, mesmo que seja um processo de longo prazo (LEWIS et al., 2017).

Tabela 3 – Média das propriedades mecânicas, coesão e ângulo de atrito interno (amostras drenadas na tensão de água de 10 kPa) para as camadas 1-4 e 10-14 cm.

Tratamentos	Camada	COT	c	ϕ
	cm	g kg ⁻¹	kPa	°
AM.F	1-4	11,4	60 ^{ns}	36 ^{ns}
	10-14	7,0	83 ^{ns}	32 ^{ns}
AP.E.F	1-4	13,1	62	35
	10-14	6,1	87	32
SP	1-4	14,9	50	34
	10-14	6,0	80	34
VE	1-4	10,3	47	37
	10-14	6,8	80	34

ns: não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). AM.F - Amendoim forrageiro, AP.E.F - Aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo, SP - Soja perene, VE - vegetação espontânea.

Fonte: Autora.

Silva et al. (2004) e Carvalho et al. (2010) verificaram que o uso e manejo do solo interferem na coesão e no ângulo de atrito interno, e, portanto, na tensão de cisalhamento. Os parâmetros de resistência não são características intrínsecas do solo, portanto dependem de sua condição estrutural, da textura, do teor de matéria orgânica, da mineralogia e teor de água (LEBERT; HORN, 1991). Contudo, no presente estudo, não foi verificada diferença significativa para as plantas de cobertura e vegetação espontânea para os parâmetros analisados em condição de solo semelhante.

Geralmente, o incremento nos valores de coesão do solo ocorrem devido ao aumento do teor de matéria orgânica e pela ação de raízes. As raízes da vegetação agem como fibras, em que ocorre a transferência das tensões cisalhantes da matriz do solo para as fibras e assim aumentam a resistência ao cisalhamento e a estabilidade do solo (BARBOSA; LIMA, 2013). As raízes também colaboram, incrementando a resistência por meio da retenção de água próximo das partículas, causando redução do conteúdo de água e aumento da coesão entre as

partículas. Somado a isso, acrescenta-se que a maior agregação do solo, determinada neste estudo por meio dos índices DMP e DMG, pode ter contribuído para os altos valores de coesão. As raízes aceleram a agregação por meio da liberação de exsudatos orgânicos que servem de energia para fungos e bactérias, os quais excretam polissacarídeos, substâncias primordiais para estabilização dos agregados (SILVA; MIELNICZUK, 1997).

Ao avaliar o efeito do reforço mecânico do solo produzido pelas raízes de Salgueiro (*Salix viminalis*), Mickovski et al. (2009) constataram que o solo com planta apresentou resistência ao cisalhamento superior ao solo em pousio. Corroborando, Maffra et al. (2019) afirmaram que as raízes de Sarandi contribuíram para o aumento da resistência ao cisalhamento tanto de um solo arenoso quanto de um argiloso.

Nos valores do ϕ houve pouca variação entre as coberturas do solo e esses foram altos para as duas camadas avaliadas ($> 30^\circ$). Assim, pressupõe-se que o ângulo de atrito interno não foi afetado pelo uso das coberturas do solo. Corroborando com este resultado, Braida (2004) avaliou combinações de doses de esterco líquido de suínos associado ao uso de plantas de cobertura e encontrou valores semelhantes ao deste estudo para ângulo de atrito interno na camada superficial ($> 30^\circ$) em um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico. O autor observou ainda que, o ângulo de atrito interno não se alterou com a variação do teor de carbono para as tensões de água de 6 e 100 kPa, já na tensão de 500 kPa houve uma tendência de diminuição do ângulo de atrito interno com o aumento do conteúdo de carbono.

As raízes contribuem para alterações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento (ALI; OSMAN, 2008; MAFFRA et al., 2019), mas essas afetam principalmente a coesão e pouco o ângulo de atrito interno (ALI; OSMAN, 2008; MAFFRA et al., 2017). Barbosa e Lima (2013) avaliaram a resistência do solo ao cisalhamento com o uso de capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) e ressaltam pequena variação no ângulo de atrito interno, mas considerável aumento na coesão após três e quatro anos de plantio da cultura com valor médio para os respectivos anos de 68,9 e 73,5 kPa. Já para as amostras sem o cultivo de capim vetiver, os autores observaram valor do intercepto de coesão de 28,4 kPa.

Com isso, nota-se a necessidade de um período maior de avaliações para constatar possíveis alterações associadas ao uso de coberturas do solo nos parâmetros de resistência. Além disso, deve ser ressaltado que na vegetação espontânea, as gramíneas são responsáveis pela elevada produção e renovação da biomassa radicular, fator que contribui para formação e estabilização dos agregados (CUNHA NETO et al., 2018). Estas características provavelmente contribuem para a semelhança estatística nos valores dos parâmetros avaliados na vegetação espontânea e nas plantas de cobertura. Diferentemente do uso do solo sem cobertura vegetal,

não avaliado neste estudo, mas que poderia ressaltar as alterações promovidas pelo uso da cobertura vegetal.

No que diz respeito as regressões ou relações, houve uma tendência de diminuição da coesão com o aumento teor de carbono orgânico, mas a correlação foi significativa e moderada, com $R = -0,61$ (Figura 22). Esse resultado provavelmente está relacionado com o efeito do carbono orgânico sobre a densidade do solo, pois com o aumento no conteúdo de carbono verificou-se diminuição na densidade (Figura 23). Já para o ângulo de atrito interno não houve relação significativa.

Neste contexto, a matéria orgânica atua sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo de duas formas, espera-se um aumento da coesão entre as partículas e diminuição do ângulo de atrito interno devido à redução na densidade (SOANE, 1990). A influência da matéria orgânica sobre a coesão é resultante do aumento da força de ligação entre as partículas que se dá pelas características físicas e químicas das moléculas orgânicas. Bem como pela maior estabilidade dos agregados do solo produzida pelos compostos orgânicos transitórios, como os polissacarídeos microbianos e temporários como hifas de fungos e raízes (TISDALL; OADES, 1982).

Em relação ao ϕ , a matéria orgânica colabora para redução nos valores de densidade e conseqüentemente do ângulo de atrito interno, em virtude da diminuição do contato entre as partículas e pelas características das partículas orgânicas que são mais flexíveis e de menor dureza que as minerais. Apesar disso, as partículas orgânicas podem colaborar para o aumento do ângulo de atrito interno, pois sob baixos conteúdos de água, elas retêm fortemente a água e causam aumento da fricção entre as partículas. Deste modo, a matéria orgânica influencia os parâmetros de resistência de diferentes formas (EKWUE, 1990; ZHANG, 1994), e isso depende de um conjunto de efeitos sobre os parâmetros, que pode provocar o aumento ou a redução da resistência.

Figura 22 – Coesão do solo (kPa) em função do teor de carbono orgânico total (%) determinado com amostras das camadas 1-4 e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$).

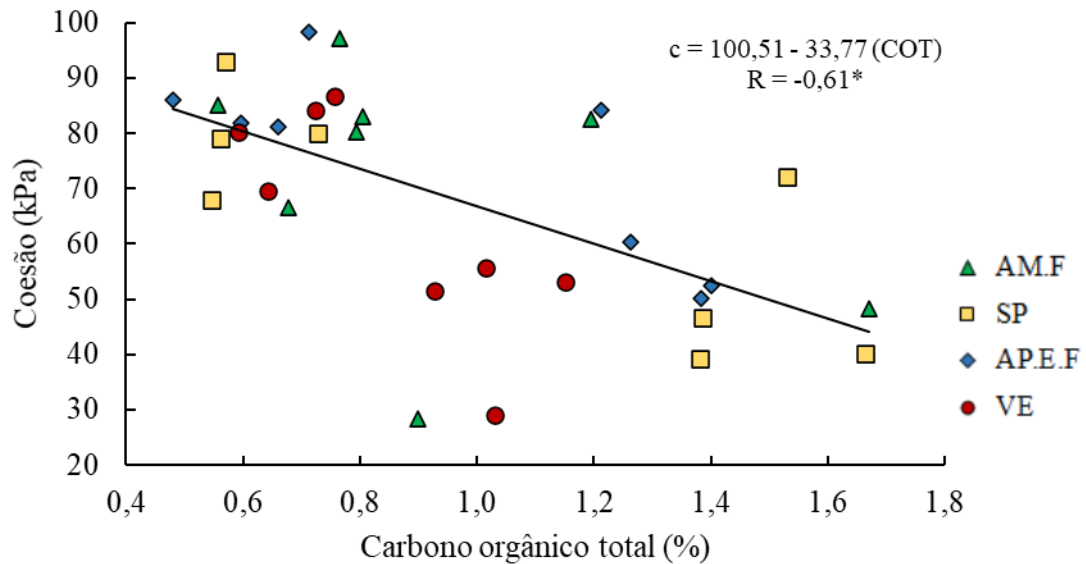
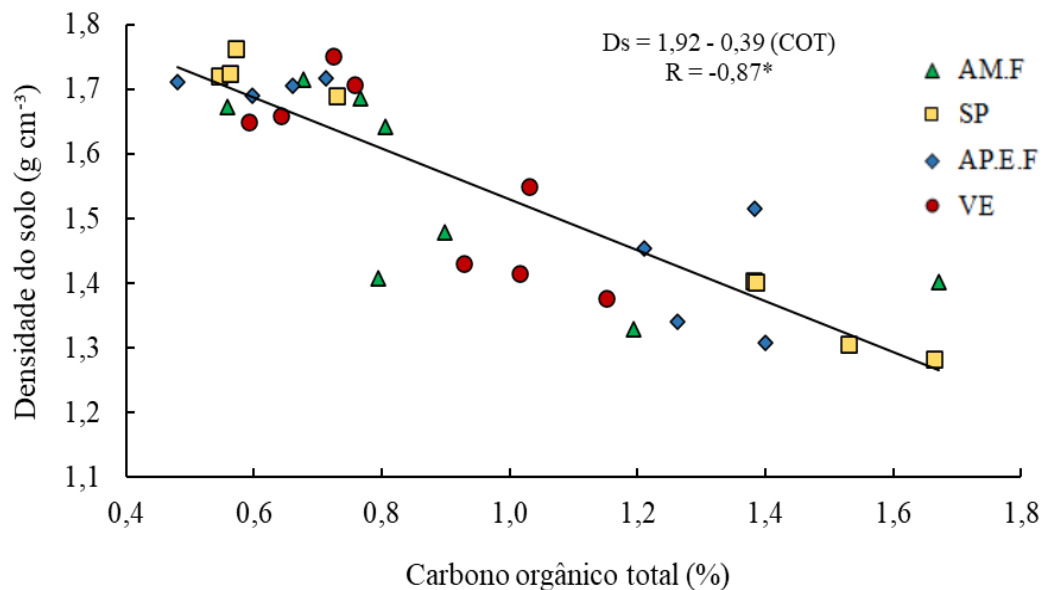


Figura 23 – Densidade do solo (g cm^{-3}) em função do teor de carbono orgânico total (%) determinado com amostras das camadas 1-4 e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$).



As envoltórias de resistência ao cisalhamento foram ajustadas para cada cobertura do solo e podem ser observadas na Figura 24a e b para as camadas de 1-4 e 10-14 cm respectivamente. Com o incremento da tensão normal (σ) houve aumento da resistência ao cisalhamento (τ), visto que, quanto maior a tensão aplicada ao solo, maior poderá ser o contato entre as partículas e o atrito interno do solo.

Os solos arenosos geralmente possuem fraca agregação, fator que contribui para menor resistência ao cisalhamento, pois os agregados não possuem resistência considerável para produzir alterações significativas na inclinação e no intercepto da envoltória. O solo deste estudo possui cerca de 661 g kg⁻¹ de areia e apenas 106 g kg⁻¹ de argila na camada superficial. Em vista disso, práticas de manejo que garantam a melhoria da estabilidade estrutural e aumento da resistência do solo são primordiais para estabelecer condições ao desenvolvimento das culturas em sistema agrícola ou florestal.

Nota-se que, tanto para a camada de 1-4 cm quanto para 10-14 cm as envoltórias estão bem próximas, com comportamento semelhante para as diferentes coberturas. Na camada de 1-4 cm, percebe-se que a τ foi maior para a cobertura AM.F, este comportamento pode estar relacionado com a boa agregação do solo e a abundância de raízes que atuam de diversas formas influenciando no aumento da resistência ao cisalhamento. E possivelmente a proximidade das envoltórias das plantas de coberturas e da vegetação espontânea está relacionada com as raízes das gramíneas, as quais possuem uma densa massa de raízes que influenciam na resistência ao cisalhamento.

Maffra et al. (2019) compararam as envoltórias de resistência ao cisalhamento de um solo com e sem raízes e observaram que as raízes de Sarandi (*Phyllanthus sellowianus*) contribuíram para aumento da resistência ao cisalhamento. Mazurana (2011) observou em seu estudo que áreas de campo nativo resultam em altos valores de resistência ao cisalhamento, em virtude da grande quantidade de raízes emitida pelas gramíneas.

As raízes das plantas, por meio de diferentes mecanismos, demonstram a capacidade de aumentar a resistência dos solos, pois diminuem o efeito das tensões normais aplicadas no mesmo (MAFFRA et al., 2017). Nesse sentido, Mickovski et al. (2009) avaliando raízes de salgueiro (*Salix viminalis*) concluíram em seu estudo que, as raízes com diâmetro menor são capazes de resistir a tensões maiores que raízes mais grossas, pois estas eram mais fortes e mais rígidas. Vale salientar que, no tratamento AM.F foi observado uma grande quantidade de raízes finas, principalmente na camada de 1-4 cm, as quais podem ter colaborado para o incremento da resistência ao cisalhamento.

Um esclarecimento importante a respeito da influência da morfologia do sistema radicular na resistência do solo ao cisalhamento é descrito por Ghestem et al. (2013), os quais verificaram que a espécie *Ricinus communis* L. popularmente chamada de mamona conferiu maior resistência ao cisalhamento, fato atribuído ao seu sistema radicular axial altamente ramificado com muitas raízes finas em comparação a outras espécies com predominância de raízes laterais mais grossas. Os autores relatam que as características morfológicas da raiz como densidade, ramificação, comprimento, volume e orientação influenciam significativamente as propriedades mecânicas do solo.

Para a camada de 10-14 cm houve uma tendência de maior τ para a cobertura AP.E.F e SP e menor para o AM.F, que pode estar ligada a densidade do solo. Já que nas coberturas AP.E.F e SP foram encontradas as densidades mais altas de 1,71 e 1,73 g cm⁻³ respectivamente. Em apoio a esta afirmação, é possível citar o estudo de Silva e Carvalho (2007), que teve como objetivo estudar o comportamento mecânico de horizontes coesos e não-coesos de um Latossolo e observaram que o horizonte coeso, com maior densidade resultou em maiores valores de resistência ao cisalhamento.

Neste sentido, Carvalho et al. (2010) com o intuito de comparar as envoltórias de resistência ao cisalhamento de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes usos e manejos em amostras submetidas a tensão de água de 6 kPa, verificaram tensões cisalhantes superiores para a floresta natural e pastagem com irrigação em comparação a pastagem não irrigada. A justificativa para alta resistência na pastagem com irrigação é a maior umidade, visto que a água atua como lubrificante das partículas sólidas e quando este é submetido a forças externas, como o pisoteio animal, ocorre a aproximação das partículas. Comumente nos solos compactados a resistência ao cisalhamento é maior devido à proximidade das partículas, em decorrência da maior densidade do solo.

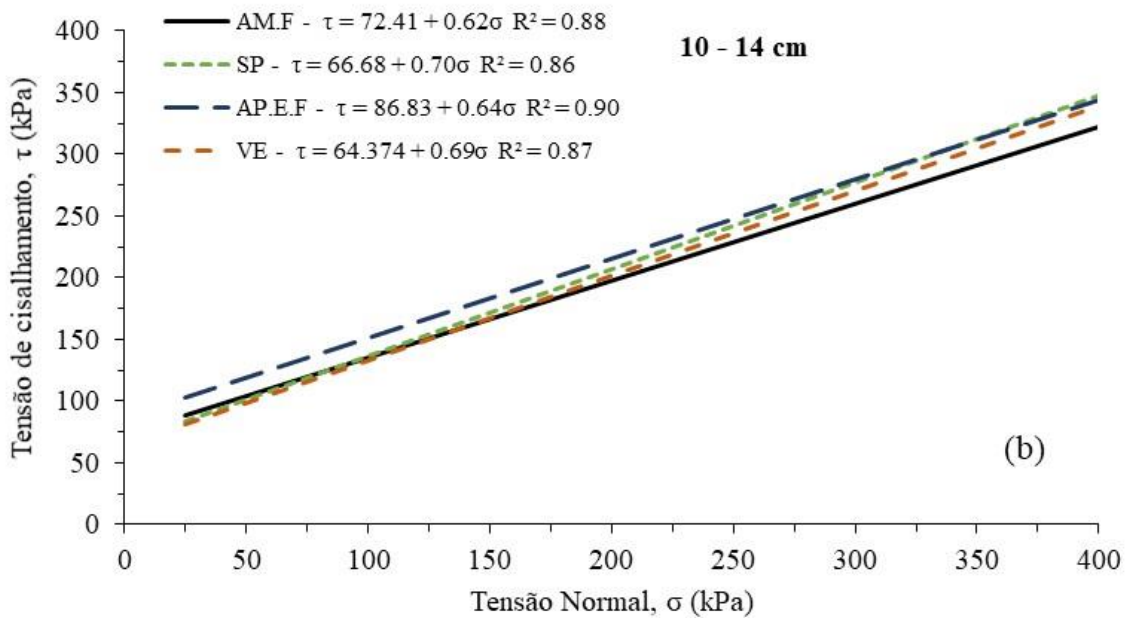
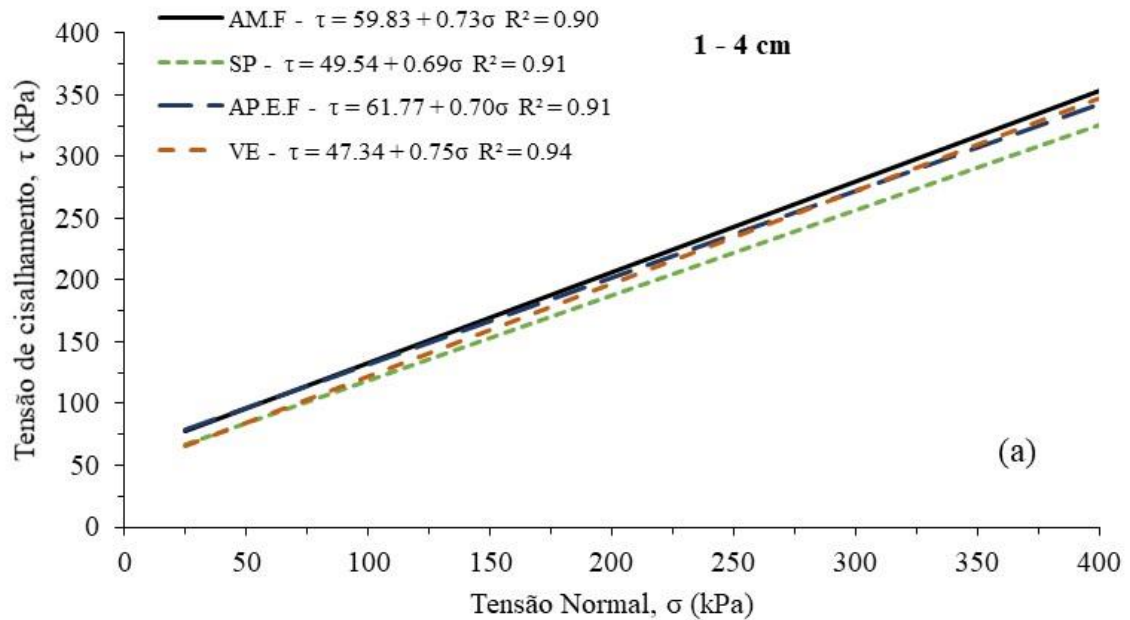
Em áreas produtivas, a avaliação da resistência ao cisalhamento é uma ferramenta importante para avaliar a influência do uso e manejo do solo, uma vez que o aumento da resistência possui estreita relação com o estado de compactação do solo (SILVA; CABEDA 2005). Avaliações a respeito da resistência do solo ao cisalhamento também estão sendo realizadas, com a intenção de garantir maior estabilidade do solo e evitar principalmente movimentos de massa e erosão pela água (BARBOSA; LIMA, 2013; GHESTEM et al., 2013; MAFFRA et al., 2017), uma das principais causas de degradação dos solos, o que os torna inaptos ao cultivo.

Geralmente a mecânica do solo está inserida junto a física com o intuito de estudar o comportamento mecânico do solo e sua relação com plantas. A avaliação de propriedades

mecânicas do solo em áreas agrícolas ou florestais, que realizam operações de mobilização do solo e utilizam máquinas são frequentemente estudadas. Contudo, ênfase deve ser dada para as áreas de plantio de culturas perenes, onde não há necessidade mobilização do solo, mas dependendo do sistema pode ocorrer a passagem de animais ou máquinas, a fim de conhecer sua resistência estrutural e seu comportamento, principalmente com adoção de práticas conservacionistas.

Apesar do cultivo da erva-mate, normalmente abranger pequenas áreas, é uma cultura fundamental para a economia dos municípios do Sul do Brasil e o principal produto não madeireiro do agronegócio florestal (PENTEADO JÚNIOR; GOULART, 2019). Assim como a erva-mate outras culturas perenes como as árvores frutíferas recebem destaque no setor econômico, pois a fruticultura é um dos setores de maior destaque do agronegócio brasileiro (IBRAF, 2017). As plantas perenes possuem como vantagem a redução dos tratos culturais, como a utilização de maquinários e defensivos agrícolas durante sua produção, uma vez que a planta é capaz de se manter viva e produtiva durante anos após ser implantada.

Figura 24 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento para os tratamentos: amendoim forrageiro (AM.F), soja perene (SP), aveia preta + ervilhaca e feijão miúdo (AP.E.F) e vegetação espontânea (VE), para as camadas de 1-4 cm (a) e 10-14 cm (b), em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.



5.7 PROPRIEDADES DE COMPRESSIBILIDADE E ELASTICIDADE DO SOLO

Os parâmetros mecânicos, pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (I_c) e índice de recuperação (IR) são utilizados na avaliação estrutural do solo. Para esses parâmetros, houve diferença significativa apenas para a pressão de preconsolidação, nas duas camadas avaliadas (Tabela 4). Os maiores valores de σ_p para a camada de 1-4 cm ocorreram respectivamente no AM.F, na VE e na AP.E.F e o menor valor na SP. Os valores de σ_p foram maiores na camada de 10-14 cm e o tratamento AP.E.F obteve o maior valor, diferenciando-se das demais coberturas avaliadas.

Tabela 4 – Média das propriedades mecânicas (amostras drenadas na tensão de água de 6 kPa) para as camadas 1-4 e 10-14 cm.

Tratamentos	U_g g g ⁻¹	σ_p kPa	I_c	IR %
1-4 cm				
AM.F	0,16 ^{ns}	106,5 a	0,28 ^{ns}	10,75 ^{ns}
SP	0,22	78,9 b	0,34	13,04
AP.E.F	0,19	81,5 ab	0,33	10,80
VE	0,18	103,3 ab	0,30	11,09
10-14 cm				
AM.F	0,13 ^{ns}	187,33 b	0,15 ^{ns}	15,44 ^{ns}
SP	0,13	156,72 b	0,15	14,34
AP.E.F	0,13	233,01 a	0,16	16,76
VE	0,13	169,76 b	0,16	16,43

U_g – umidade gravimétrica; σ_p - pressão de preconsolidação; I_c - índice de compressão; IR - índice de recuperação; Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey (p < 0,05); ns: não significativo pelo teste de Tukey (p < 0,05); AM.F - Amendoim forrageiro, AP.E.F - Aveia preta/ervilhaca e feijão miúdo, SP - Soja perene, VE - vegetação espontânea.

Fonte: Autora.

Fidalski et al. (2015) avaliaram a pressão de preconsolidação após 18 anos de implantação de plantas de cobertura nas entrelinhas de um pomar de laranja em um Argissolo e ressaltam que não ocorreu diferença significativa para a pressão de preconsolidação nos tratamentos avaliados, o amendoim forrageiro apresentou valor de 230 kPa, a vegetação espontânea o valor de 220 kPa e a gramínea o de 138 kPa, na camada de 0-10 cm, na posição entre rodado.

Conforme o estudo de Horn e Fleige (2003) os valores de σ_p para essas coberturas estariam dentro de uma faixa indicando valores muito altos (120 a 150 kPa) e extremamente altos (> 150 kPa). Neste contexto, Dias Junior e Pierce (1996) ressaltam que nos sistemas produtivos, quando cargas são aplicadas ao solo e ultrapassam os valores de σ_p é possível que ocorra a degradação da estrutura do solo.

Com o objetivo de avaliar o efeito do tempo e de distintos sistemas de preparo do solo na σ_p , Moraes et al. (2019) observaram incremento nos valores de σ_p devido ao aumento do período sem mobilização do solo, com maior valor no sistema plantio direto, com 24 anos, com valor médio de 290 kPa na camada 0-10 cm. Esta maior resistência foi atribuída a formação de agregados estáveis, a ausência de mobilização e o maior acúmulo de carbono neste sistema. Os autores destacaram que o maior tempo sob plantio direto promove melhorias na estrutura e na capacidade de carga do solo.

No entanto, como destacado por Gubiani et al. (2018), o conjunto de resultados obtidos em seu estudo não corroboram com a definição de pressão de preconsolidação como um valor de carga de transição da deformação elástica para plástica. A σ_p enfrenta críticas em relação a sua definição como capacidade de suporte de carga do solo (KELLER et al., 2011; SOMAVILLA et al. 2017). Nesse contexto, Ambuz et al. (2018) acrescentam que a pressão de preconsolidação pode ser alta para condições estruturais do solo distintas, boa e má, desta forma representa um índice confuso para avaliar a qualidade física do solo. Por isso, é necessário relacionar a pressão de preconsolidação com as demais propriedades físicas do solo, a fim de identificar quando este parâmetro pode interferir negativamente nas condições estruturais do solo.

Neste sentido, Nunes et al. (2019) avaliaram a relação entre propriedades mecânicas, indicadores físicos do solo e de crescimento de plantas e observaram forte correlação entre a pressão de preconsolidação e o grau de compactação, além de correlação entre a pressão de preconsolidação com outros atributos físicos do solo, como resistência à penetração, macroporosidade e estabilidade de agregados. Os autores verificaram que o modelo de regressão estimou valores de σ_p de 100,4 e 104,5 kPa, respectivamente, correspondendo a um nível de macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e resistência à penetração de 2 MPa, valores que são considerados restritivos ao crescimento radicular. Também são relatados efeitos negativos da alta pressão de preconsolidação sobre o crescimento da parte aérea e da raiz da planta. Com isso, a σ_p relaciona a condição física do solo com o crescimento de plantas e com o comportamento mecânico.

No presente estudo, a análise de regressão entre a densidade do solo e a macroporosidade apresentou um coeficiente de correlação alto ($R = -0,91$). O valor de densidade correspondente a macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foi de $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 25). Assim como o estudo de Nunes et al. (2019), neste estudo houve relação da pressão de preconsolidação com as propriedades físicas. Conforme a regressão realizada no presente estudo, o valor de σ_p de 157 kPa corresponde a um nível de macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 26).

Diante destas relações, é possível inferir que na camada superficial os valores de σ_p podem ser considerados adequados para o crescimento das plantas, já na camada 10-14 cm, cujos valores de σ_p são superiores ao estimado como limitante da macroporosidade, podem ocorrer limitações ao desenvolvimento das plantas em todos os tratamentos avaliados. Logo, essa interação entre o comportamento mecânico do solo e sua condição física, sugere uma situação desfavorável para a produção de plantas neste sistema. No entanto, para melhor compreensão destas interações, seria adequado fazer relações com algum aspecto relacionado ao crescimento de plantas, o qual não foi avaliado neste estudo.

Figura 25 – Densidade do solo em função da macroporosidade em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$).

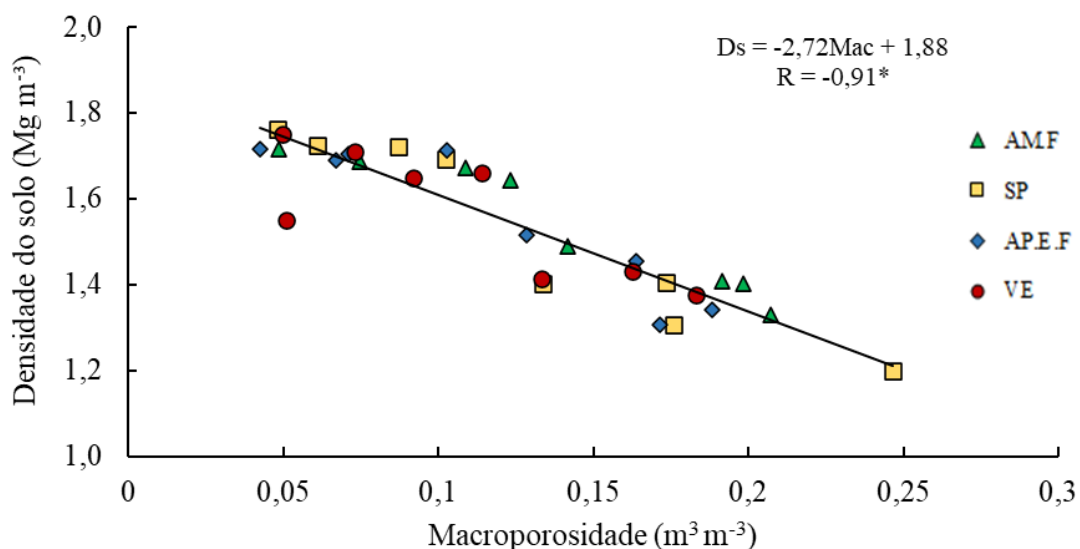
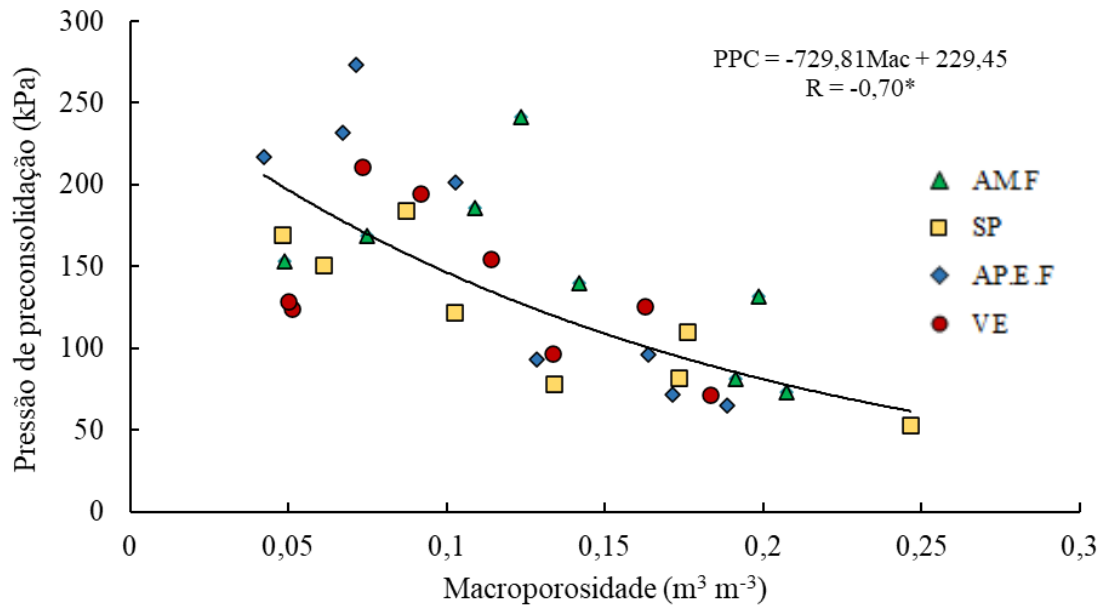


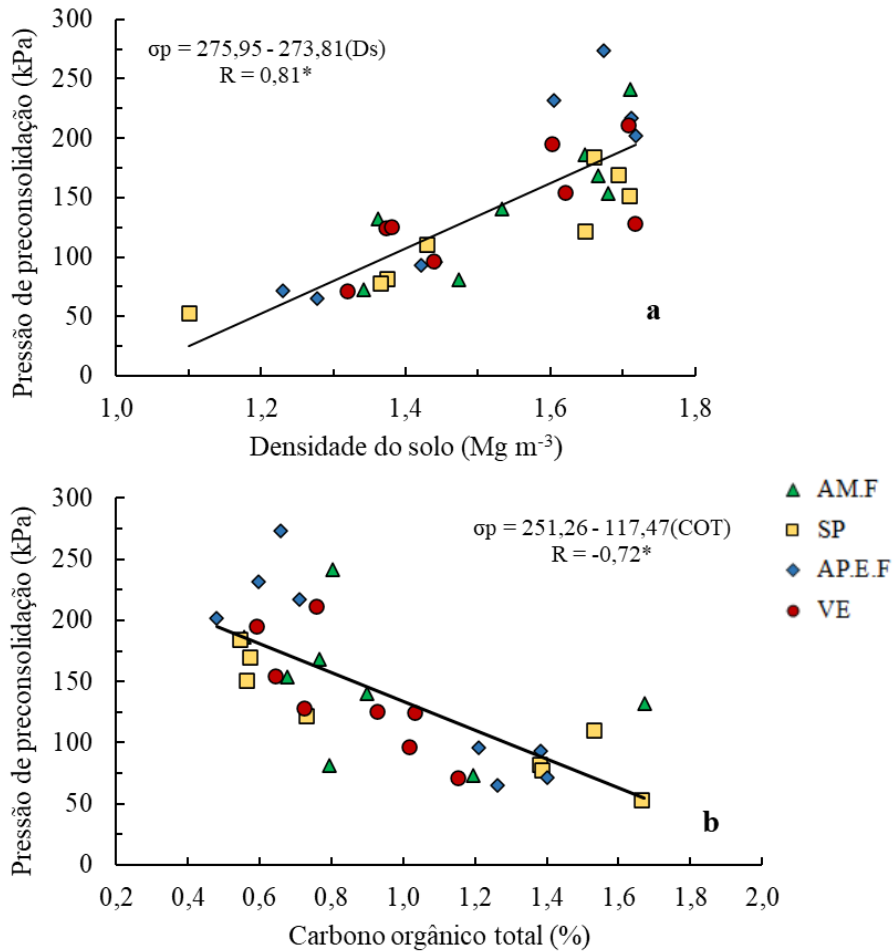
Figura 26 – Pressão de preconsolidação em função da macroporosidade do solo em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$).



Os menores valores da pressão de preconsolidação observados na camada superficial podem ser atribuídos a menor densidade do solo e ao maior conteúdo de carbono. Essa inferência é baseada nos dados da Figura 27a, em que os valores da σ_p se relacionam de forma significativa e positiva com a D_s ($R = 0,81$) e negativamente com o conteúdo de carbono ($R = -0,72$) (Figura 27b). Redução da σ_p em função da densidade também foram constatadas por Debiasi et al. (2008) e da densidade e matéria orgânica por Reichert et al. (2018). Porém, Fidalski et al. (2015) afirmam em seu estudo em um pomar de laranja que a pressão de preconsolidação não foi dependente da densidade e do teor de carbono orgânico do solo.

Contudo, os valores de σ_p do atual estudo são superiores aos encontrados por outros estudos em Argissolo com uso de plantas de cobertura como o de Braida (2004) e Debiasi et al. (2008). A ação do sistema radicular das plantas de cobertura aliado a adição de carbono contribuiu para formação de agregados mais estáveis no solo (Figura 14 e 15), fato que explica os altos valores de σ_p . Embora os valores de σ_p para solos arenosos sejam geralmente mais baixos, já que o teor de argila e a σ_p apresentam uma relação positiva (BRAGA et al., 2015; MAZURANA et al., 2017).

Figura 27 – Pressão de preconsolidação em função da densidade do solo (a) e do teor de carbono orgânico total (b) em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$).

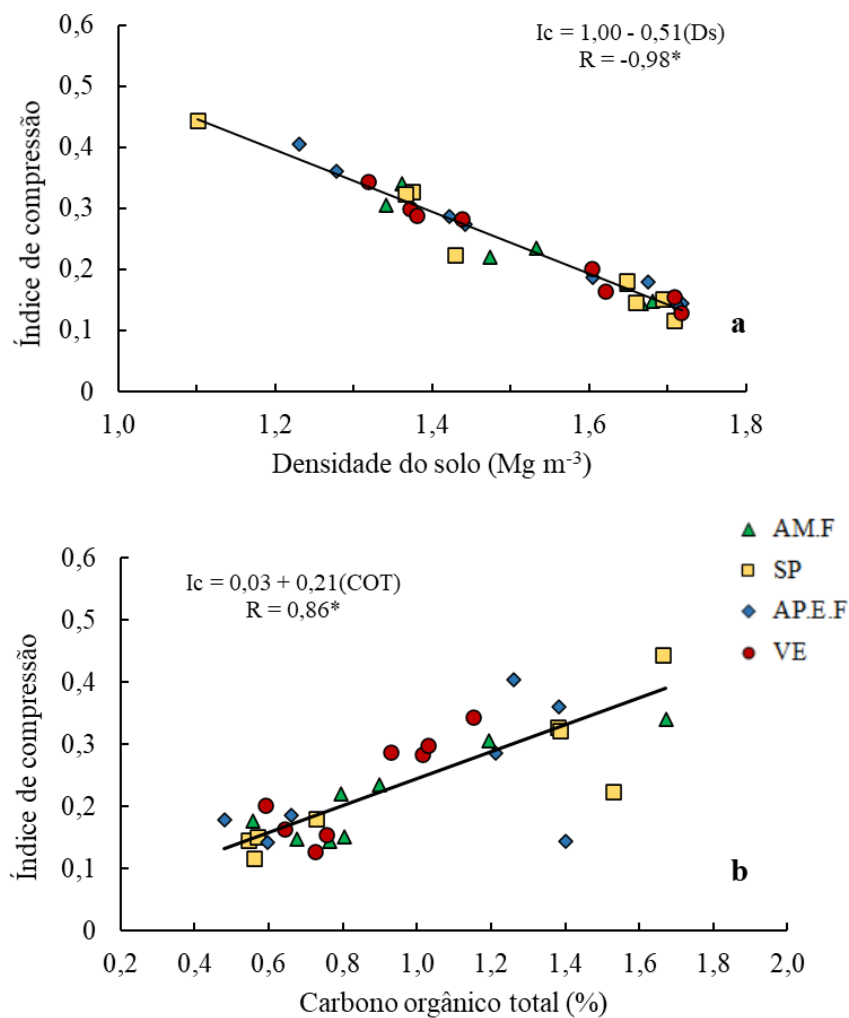


O índice de compressão (I_c) representa a suscetibilidade do solo à compactação (REICHERT et al., 2010), pois quanto mais acentuada for a diminuição do índice de vazios conforme a pressão aplicada, maior é o valor do I_c . Assim, maiores valores do I_c ocorreram na camada superficial, o que significa menor resistência à compactação. Entre as coberturas de solo, os valores de I_c variaram de 0,28 a 0,34, valores semelhantes aos observados por Braida et al. (2010) e Mazurana et al. (2017) em um Argissolo. Os valores mais altos desse índice para esta camada estão associados a menor densidade do solo e maior teor de carbono orgânico.

A relação entre o I_c e a D_s foi significativa e inversa, pois quanto maior a densidade, menor foi o I_c ($R = -0,98$) (Figura 28a), enquanto a relação com o carbono orgânico total foi

significativa e direta ($R = 0,86$) (Figura 28b). Esses resultados corroboram com o estudo de Reichert et al. (2018), que observaram forte correlação entre a densidade do solo e o índice de compressão, e relação deste índice com a matéria orgânica. E concordam ainda com o estudo de Mentges et al. (2013), que verificaram uma correlação negativa entre o I_c e a densidade do solo.

Figura 28 – Índice de compressão em função da densidade do solo (a) e do teor de carbono orgânico total (b) em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$).



A fim de verificar o efeito de plantas de cobertura de inverno e do tráfego de rodados sob a compressibilidade de um Argissolo, Debiasi et al. (2008) constataram que o uso de plantas de cobertura de inverno aliada a ausência de tráfego causou diminuição da pressão de preconsolidação e aumento da suscetibilidade a compactação na camada superficial (0,03-0,06 m). Braida et al. (2010) mencionam que o acúmulo de matéria orgânica está associado a alterações na suscetibilidade à compactação do solo. E acrescentam que o incremento de carbono resultou em aumento da suscetibilidade à compactação em um Argissolo de textura arenosa. Já Mentges et al. (2013) não verificaram relação significativa entre o I_c e o carbono e atribuíram este resultado a pequena diferença na quantidade de carbono entre os usos avaliados no estudo.

A menor densidade e maior porosidade da camada superficial neste estudo, representam menor número de pontos de contatos entre as partículas, o que torna o solo menos resistente à deformação, ou seja, maior valor de I_c . Com isso, há mais poros livres para deformação e a resposta do solo à aplicação das cargas pode ser mais intensa (AMBUZ et al., 2018). Na camada de 10-14 cm, o I_c diminuiu, mas sem diferenças entre os tratamentos, uma vez que a densidade foi maior, ou seja, maior número de pontos de contato entre as partículas, maior coesão, o que representa maior resistência do solo.

Apesar do solo demonstrar propriedades do sistema poroso, como alta densidade, baixos valores de macroporosidade e de porosidade total, o processo de compressão pode não resultar em efeito negativo sobre a funcionalidade do solo para um sistema como o deste estudo, sem mobilização aliado ao uso de cobertura vegetal. Rücknagel et al. (2017) destacam que no sistema de plantio direto, após a compressão, a estrutura do solo e um determinado volume de macroporos podem ser restaurados, desde que os agregados não sejam compactados.

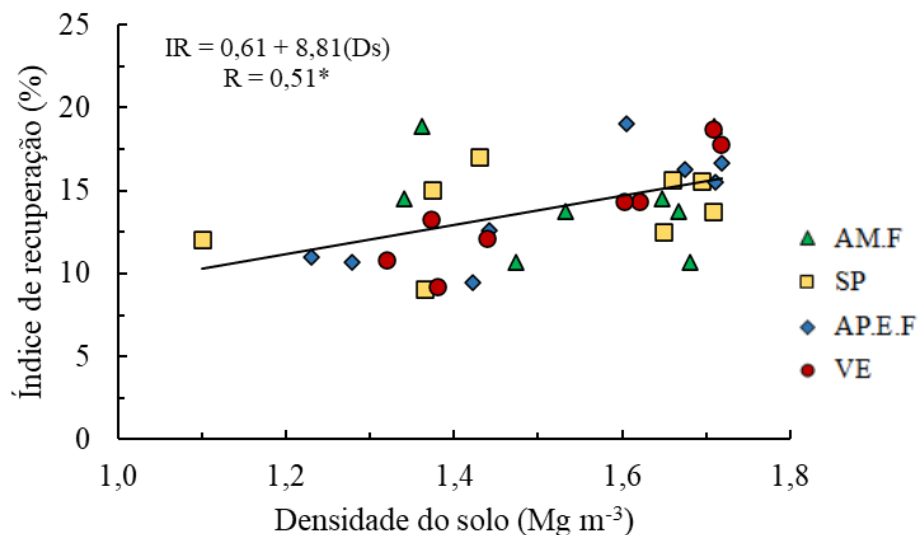
Na avaliação do comportamento mecânico do solo, além da compreensão de sua resistência à aplicação de cargas, é importante também conhecer sua capacidade de recuperação diante das deformações. A elasticidade do solo, determinada por meio do IR, conforme Gubiani et al. (2018) é o índice mais coerente para representar a elasticidade do solo, que corresponde a recuperação de parte da deformação que foi imposta ao solo, após a remoção de uma carga.

Na camada superficial, os valores de recuperação do solo foram baixos (em torno de 10%) para todas as coberturas avaliadas e não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. A relação entre o IR e a densidade do solo foi significativa, com coeficiente de correlação de 0,51 (Figura 29), ou seja, quanto mais alta a densidade, maior seria o potencial de recuperação do solo. Em amostras de maior densidade, a deformação geralmente é menor, assim uma pequena expansão após a remoção da carga poderá resultar em um percentual

elevado de recuperação. Na camada subsuperficial também não foi verificada diferença significativa e os valores do IR foram mais altos, variando de 14 a 16% (Tabela 4).

Em oposição a esse resultado, Capurro et al. (2014) observaram valores mais altos do IR na camada superficial (0-3 cm) em relação à camada subsuperficial (9-12 cm) de um Vertissolo e associaram ao maior teor de carbono orgânico proporcionado pelo sistema de campo nativo melhorado com trevo. E acrescentam que os valores do IR foram estatisticamente semelhantes nas três intensidades de pastejo avaliadas, ou seja, não houve alteração conforme o manejo adotado.

Figura 29 – Índice de recuperação em função da densidade do solo em amostras das profundidades de 1-4 cm e 10-14 cm, em área com erva-mate, em um Argissolo Vermelho-Amarelo. O asterisco (*) ao lado do coeficiente de correlação (R) indica que o ajuste das equações foi significativo ($p < 0,05$).



Neste estudo não foi confirmada a relação entre o IR e o COT, pois as variáveis não apresentaram correlação significativa, mas é provável que este fato esteja associado a pequena diferença no teor de carbono entre as coberturas do solo. O comportamento elástico do solo possui relação com o material que compõe o solo, ou seja, mineral ou orgânico, e com a umidade do solo que interfere no aprisionamento de bolhas de ar no interior do mesmo (BRAIDA et al., 2008).

Os valores de elasticidade para este sistema de uso e manejo não foram expressivos. No entanto, solos arenosos tendem a ter menor elasticidade do que os argilosos. Isto ocorre porque os solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de água, decorrente de composição

estrutural (maior quantidade de microporos) que possibilita maior aprisionamento de bolhas de ar (REICHERT et al., 2018).

Quando o solo está mais úmido, a elasticidade aumenta devido ao aprisionamento de bolhas de ar que são comprimidas durante a aplicação de uma carga e se expandem após a retirada da mesma, deslocando o solo (PERDOK et al., 2002). Por outro lado, quando o conteúdo de água no solo é baixo, com mais facilidade o ar será eliminado dos poros pela compressão. Assim, medições realizadas com maior umidade do solo, resultariam em valores superiores de elasticidade do solo, pela presença de água que dificulta a expulsão do ar dos poros, aumentando o confinamento de bolhas de ar.

Outro fator relacionado é a matéria orgânica, que é considerada um material flexível e elástico, desta forma possui grande capacidade de recuperação após a remoção da aplicação de uma carga. Teoricamente, embora mais suscetível a deformações por ação de forças externas, o solo com contínua adição de resíduos vegetais, como pelo uso de plantas de cobertura, que promove a adição de material orgânico ao solo teria maior capacidade de se recuperar da deformação após a aplicação de uma carga (SOANE, 1990). Nesse caso, a maior elasticidade estaria associada a ação das raízes e do material orgânico que influenciam em sua recuperação.

O uso de plantas de cobertura possibilita a adição de resíduos ao solo de espécies distintas, as quais encontram-se em diferentes estágios de decomposição. Segundo Soane (1990), a elasticidade também depende do estado de decomposição do material orgânico. E acrescenta que as raízes vivas e mortas constituem uma rede filamentosa que auxilia na resistência à compressão assim como a ação de hifas fúngicas que proporcionam aumento da estabilidade e resistência dos agregados de modo a contribuir para diminuição da compactação.

Braida et al. (2008) encontraram valores do IR superiores aos observados neste estudo, em área com plantas de cobertura e adição de esterco líquido de suínos, em um Argissolo avaliado na profundidade de 0 a 2 cm. Reichert et al. (2018) analisaram quatro solos distintos, cultivados com culturas de verão e de inverno e ressaltam que o IR variou de 2,4% a 22,6%, também com amostras submetidas a tensão de água de 6 kPa. Perdok et al. (2002) salientam que os resultados encontrados para a elasticidade ainda são pouco significativos, sendo desconsiderados em modelos relacionados deformação do solo após a aplicação de cargas.

Contudo, nos sistemas que proporcionam a adição constante de resíduos ao solo, como o sistema plantio direto e outros sistemas conservacionistas, como pelo uso de plantas de cobertura é imprescindível a avaliação da elasticidade do solo. Pois ela pode estar relacionada com o aumento da resistência a compactação, tornando-se um dos benefícios da adoção destes sistemas, principalmente quando há a passagem de máquinas ou animais sobre o solo.

Embora os resultados obtidos neste estudo indiquem valores baixos de recuperação após a deformação, vale destacar que esta avaliação foi realizada com um curto período de adoção das plantas de cobertura. E que o tempo de permanência da carga aplicada no campo por máquinas ou animais é inferior à aplicada no laboratório, em virtude disso, sistemas como estes podem proporcionar maior elasticidade, representando um benefício para qualidade do solo.

6 CONCLUSÕES

O uso de plantas de cobertura aliado a ausência de revolvimento do solo não ocasionou alterações na densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e permeabilidade do solo ao ar, e nos parâmetros mecânicos, índice de compressão e índice de recuperação em relação a vegetação espontânea, composta principalmente por gramíneas. É válido destacar que as plantas de cobertura estão estabelecidas há cinco anos, tempo que pode ser insuficiente para promover alterações significativas nestes parâmetros. Sugere-se um período de avaliação mais longo para verificar possíveis modificações nestas propriedades, pois as transformações que ocorrem no solo são lentas e é provável que aumentem com o tempo de adoção das plantas de cobertura.

A inclusão de plantas com alta adição de massa seca incrementam o conteúdo de carbono orgânico do solo, principalmente com a inserção de leguminosas, e proporcionam aumento na estabilidade do solo e conseqüentemente em sua resistência. Com isso, condições estruturais mais adequadas são estabelecidas neste sistema para favorecer a produção da cultura perene.

Neste sentido, a alta resistência do solo observada tanto com o uso plantas de coberturas quanto com a vegetação espontânea não prejudicou sua funcionalidade avaliada por meio da permeabilidade ao ar, a qual resultou em valores apropriados para todas as coberturas, nas duas camadas avaliadas.

Os teores de carbono orgânico total influenciaram as propriedades mecânicas. O incremento de carbono orgânico diminuiu a pressão de preconsolidação e aumentou o índice de compressão, mas não foi verificada relação com a elasticidade do solo, determinada por meio do índice de recuperação. Os valores de elasticidade não foram expressivos, o manejo com o cultivo de plantas de cobertura e sua adição de carbono não foram suficientes para produzir altos valores de recuperação do solo após a deformação.

Conforme a regressão, a pressão de preconsolidação de 157 kPa corresponde a um nível de macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Na camada superficial (1-4 cm) os valores de pressão de preconsolidação em todos os tratamentos foram menores que este valor, já camada de 10-14 cm, todos os tratamentos ultrapassaram este valor, o que pode representar condições limitantes ao desenvolvimento das plantas.

Considerando os resultados obtidos neste estudo, constata-se que as coberturas utilizadas, as plantas de cobertura e a vegetação espontânea, associadas a ausência de mobilização promovem valores adequados das propriedades físicas e mecânicas do solo, além do aumento dos parâmetros de resistência, principalmente relacionadas a estrutura. Desta forma, o uso de vegetação deve ser indicada a fim de melhorar as condições do solo, no sistema de produção de cultura perene.

Contudo, as avaliações realizadas antes da poda para acompanhar o crescimento da erva-mate (altura e biomassa comercial), as quais fazem parte de um banco de dados, demonstraram que o amendoim forrageiro proporcionou aumento no crescimento e produtividade da erva-mate em relação aos demais tratamentos. Em função disso, ressalta-se a importância de investigações futuras em relação a outras propriedades do solo para compreensão do motivo da maior produtividade do consórcio da erva-mate com amendoim forrageiro.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, M.; HASTINGS, A.; CHENG, K.; YUE, Q.; CHADWICK, D.; ESPENBERG, M.; TRUU, J.; REES, R. M.; SMITH, P. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. **Global Change Biology**, v. 25, p. 2530-2543, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 13 p.
- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 519-531, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300013>.
- ALBURQUERQUE, M. A.; DIECKOW, J.; SORDI, A.; PIVA, J. T.; BAYER, C.; MOLIN, R.; PERGHER, M.; RIBEIRO-JUNIOR, P. J. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. **Soil Use and Management**, v. 31, p. 1-9, 2015. <https://doi.org/10.1111/sum.12173>
- ALI, F. H.; OSMAN N. Shear strength of a soil containing vegetation roots. **Soils and Foundations**, v. 48, n. 4, p. 587-596, 2008. <http://dx.doi.org/10.3208/sandf.48.587>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n.6 p. 711-728, 2013.
- ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S.; DE PAEPE, J. L. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 170, p. 53-65, 2017.
- AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 189-197, 2001.
- AMBUS, J. V.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; CARVALHO, P. C. F. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, v. 330, p. 232-243, 2018.
- ANGELETTI, M. da P.; SOUZA, J. L. de; COSTA, H.; FAVARATO, L. F.; MUZZI, E de M.; MUNIZ, E. S.; LAURETT, L.; ZANUNCIO JUNIOR, J. S.; GUARÇONI, A. **Espécies vegetais para cobertura do solo: guia ilustrado**. Circular técnica, n. 07, Incaper, 2018.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C. WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 425-435, 2005.
- BAUMGARTL, T., KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 57-65, 2004. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.5700>

BARBOSA, M. C.; LIMA, H. M de. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 113-120, 2013.

BARBOSA, M. V.; PEDROSO, D. de F.; CURI, N.; CARNEIRO, M. A. C. Do different arbuscular mycorrhizal fungi affect the formation and stability of soil aggregates. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2019.

BÉCEL, C.; VERCAMBRE, G.; PAGÈS, L. Soil penetration resistance, a suitable soil property to account for variations in root elongation and branching. **Plant Soil**. 353, p. 169-180, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1020-7>.

BEVILAQUA, G. A. P.; GALHO, A. M.; ANTUNES, I. F.; MARQUES, R. L. L.; MANOEL, de S. M. **Manejo de sistemas de produção de sementes e forragem de feijão-miúdo para a agricultura familiar**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007. 60p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 204).

BRAGA, F. V. A., REICHERT, J. M., MENTGES, M. I., VOGELMANN, E. S., PADRÓN, R. A. R. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência Argissolo-Gleissolo: Variação no perfil e efeito de compressão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p.1025-1035, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140724>.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 126p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. **Matéria orgânica e seu efeito na física no solo**. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Eds.) *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 7, p. 221-278, 2011. Disponível em: http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Disciplinas/FisicaSolo/Braida_J.A_TCS2011.pdf.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 477-485, 2008.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SOARES, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1646-1653, 2007.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 131-139, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000200003>.

BRANDÃO, E. D.; SILVA, I. F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, p. 1193-1199, 2012.

BRANDT, A. A. **Propriedades mecânicas do solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. 2005. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

BRASIL, Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisas Pedológicas. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife. 1973. 431 p. (Boletim Técnico N° 30).

BRUNETTO, G.; ROZANE, D. E.; de MELO, G. W. B.; ZALAMENA, J.; GIROTTO, E.; LOURENZI, C.; COUTO, R. R.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J. 2016. Manejo da fertilidade de solos em pomares de frutíferas de clima temperado. In: TIECHER, T. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS, p. 141-158, 2016.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; GROENIGEN, J. W. V.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

CALEGARI, A. Plantas de cobertura e rotação de culturas no sistema plantio direto. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 122, p. 18-21, jun. 2008.

CAMBI, M.; CERTINI, G.; NERI, F.; MARCHI, E. The impact of heavy traffic on forest soils: a review. **Forest Ecology and Management**, v. 338, p. 124-138, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>.

CAPURRO, E. P. G.; SECCO, D.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. Compressibilidade e elasticidade de um Vertissolo afetado pela intensidade de pastejo bovino. **Ciência Rural**, v. 44, n. 2, p. 283-288, 2014.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 99 - 105, 1990.

CARVALHO, R. de C. R.; ROCHA, W. W.; PINTO, J. C.; PIRES, B. da S.; DIAS JUNIOR, M. de S.; NUNES, A. H. B. Soil shear strength under non-irrigated and irrigated short duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 631-638, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000300004.

CASAGRANDE, A. Determination of the preconsolidation load and its practical significance. In: **Proceedings of International Conference on the Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Cambridge: Harvard University, 1936. p. 60-64.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527- 538, 1998.

CHEN, G.; WEIL, R.R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**. v. 136, p. 61- 69. 2014.

COELHO, G. C. Ecosystem services in brazilian's southern agroforestry systems. **Tropical and subtropical agroecosystems**. v. 20, n.3, p. 475-492, 2017.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27 p. 527-535, 2003.

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323-332, 2008.

CUNHA NETO, F. V.; PEREIRA, M. G.; LELES, P. S. S.; ABEL, E. L. S. Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em Além Paraíba - MG. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 13-24, 2018. ISSN 1980-5098 <https://doi.org/10.5902/1980509831569>

DALCOMO, J. M.; ALMEIDA, D. L. de.; GUERRA, J. G. M. **Avaliação de leguminosas perenes para cobertura do solo em pomar cítrico no município de Jerônimo Monteiro, ES**. EMBRAPA, 1999. p. 1-8, Comunicado técnico 36.

DAVIES, J. The business case for soil. **Nature**, v. 543, 2017.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; MAZURANA M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2629-2637, 2008.

DEDECEK, R. A. Manejo de solo em ervais. In: Congresso Sul-Americano da Erva-mate, 1.; Reunião técnica do Cone Sul sobre a cultura da Erva-mate, 2., 1997, Curitiba. **Anais...** Colombo: EMBRAPA-CNPf, 1997. p. 439. (EMBRAPA-CNPf. Documentos, 33).

DENARDIN, R. B. N.; MATTIAS, J. L.; WILDNER, L. do P.; NESI, C. N.; SORDI, A.; KOLLING, D. F.; BUSNELLO, F. J.; CERUTTI, T. Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó - SC. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 59-69, 2014.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v. 8, n. 2, p. 139-151, 1995.

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

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, v. 81, p. 87-95, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.05.003>

DONEDA, A.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; MIOLA, E. C. C.; GIACOMINI, D. A.; SCHIRMANN, J.; GONZATTO, R. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de

cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1714-1723, 2012.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p. 1-20. (Special Publication, 35)

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Microaggregates in soils. **Journal Soil Science**, v. 18, p. 64-73, 1967.

EKWUE, E. I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 33, p. 289-297, 1990.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Adubação verde com leguminosas**. Embrapa Agrobiologia, Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 49 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)**, 3º ed. Brasília. 2013.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA Solos, 2017.

FEDERIZZI, L. C.; ALMEIDA, J. L.; MORI, C.; LÂNGARO, N. C.; PACHECO, M. T. P. Importância da cultura da aveia. In: LÂNGARO, N. C.; CARVALHO, I. Q. (Eds.). **Indicações técnicas para a cultura da aveia: XXXIV Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Aveia**. Passo Fundo – Universidade de Passo Fundo. 2014. 136 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014.

FIDALSKI, J.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; ANGHINONI, G.; AULER, P. A. M. Capacidade de Suporte de Carga do Solo em Sistemas de Produção de Laranja Conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 880-885, 2015.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1316-1322, 2007.

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI R. S. **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2 ed. 2012. 544 p.

GAN, R. Y.; ZHANG, D.; WANG, M.; CORKE, H. Health Benefits of Bioactive Compounds from the Genus *Ilex*, a Source of Traditional Caffeinated Beverages. **Nutrients**, v.10, p.17, 2018.

GHESTEM, M.; VEYLON, G.; BERNARD, A.; VANEL, Q.; STOKES, A. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. **Plant and Soil**, v. 377, n. 1, p. 43-61, 2013. DOI 10.1007/s11104-012-1572-1

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; CHIAPINOTTO, I. C.; HÜBNER, A. P.; MARQUES, M. G.; CADORE, F. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto. II - Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 751-762, 2004.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E. R. O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R. S.; FRIES, M. R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 325-334, 2003.

GOULART, I. C. G. R. **Fatores que afetam a produtividade e a adoção de tecnologias na cultura da erva-mate**. 2020. 106 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

GUBIANI, P. I.; PÉRTILE, P.; REICHERT, J. M. Relationship of precompression stress with elasticity and plasticity indexes from uniaxial cyclic loading test. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 29-37, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.004>.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo: exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 664-668, 2006.

GUBIANI, P. I., REINERT, D. J., REICHERT, J. M., GOULART, R. Z., FONTANELA, E. Excel add-in to model the soil compression curve. **Engenharia Agrícola** v. 37, p. 603-610, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n3p603-610/2017>.

GUEDES FILHO, O.; SILVA, A. P. da.; GIAROLA, N. F. B. TORMENA, C. A. Permeabilidade ao ar da cama de semeadura do solo em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 841-851, 2015.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, p. 121-145, 2005. doi:10.1016/j.still.2004.08.009

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C. **Atributos de solo e produtividade de culturas em sistemas de manejo conduzidos por dezesseis anos**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS. 2009; 54:1-63.

HERNANI, L. C.; ZANATTA, J. A.; SALTON, J. C. Efeito de raízes e cobertura morta de *B. ruziziensis* na matéria orgânica e na agregação de um Latossolo Vermelho distroférico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

HILLEL, D. **Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, v. 177, p. 113-124, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.12.003>.

HORN, R. Stress–strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v. 116, n. 1, p. 77-88, 2003.

HORN, R. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1131-1137, 2004. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.11>

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, v. 73, p. 89-99, 2003.

IBRAF - INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS. Cleonice de Carvalho [et al.]. – Santa Cruz do Sul : **Editora Gazeta Santa Cruz**, 2017. 88 p. : il. ISSN 1808-4931.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes**. 2020 a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?edicao=29008&t=resultados>> Acesso em: 17 dez 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. 2020 b. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?edicao=31773&t=resultados>> Acesso em: 17 dez 2021.

KAISER, D. R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

KELLER, T., ARVIDSSON, J. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. **European Journal of Soil Science**, v. 58, p. 1373-1381, 2007. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00944.x>.

KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P.; DEXTER, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, v. 163, p. 13-23, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.006>.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-509.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.37-51. (Special, 35)

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v. 19, n. 2, p. 275-286, 1991.

LEWIS K. L.; DELAUNE P.; KEELING W. Securing our soil in intensive monoculture cropping systems. **Global Soil Security**, p. 145-151, 2017.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 677-684, 2005.

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; KURTZ, C.; FAYAD, J. A. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 9, n. 1, p. 09-19, 2010.

MACHADO, A. N.; SIEWERDT, L.; ZONTA, E. P.; VAHL, L. C.; COELHO, R. W.; FERREIRA, O. G. L.; AFFONSO, A. B. Rendimento do amendoim-forrageiro estabelecido sob diferentes arranjos populacionais de plantas em Planossolo. **Ciência Animal Brasileira**, v. 6, n. 3 p. 151-162, 2006. <https://www.revistas.ufg.br/vet/article/view/369>

MACHADO, P. L. de A. Carbono do solo e mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, p. 329-334, 2005.

MAFFRA, C. R. B.; MORAES, M. T.; SOUZA, R. S.; SUTILI, F. J.; PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. Métodos de avaliação da influência e contribuição das plantas sobre a estabilidade de taludes. **Revista Scientia Agraria**, v. 18, n. 4, p. 129-143, 2017.

MAFFRA, C.; SOUSA, R.; SUTILI, F.; PINHEIRO, R. The effect of roots on the shear strength of texturally distinct soils. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n.3, p. 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.101817>

MALLMANN, M. S. 2017. **Infiltração de água no solo condicionada pelo uso de plantas de cobertura**. 2017. 72 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

MARCOS, D. P.; FRIEDRICH, F.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. Compartimentação do estoque individual de carbono em uma plantação comercial de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.- Hil.). **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, p. 168-173, 2020.

MARQUES, A. C.; REIS, M. S.; DENARDIN, V. F. As paisagens da erva-mate: uso das florestas e conservação socioambiental. **Ambiente e Sociedade**, v. 22, 2019.

MAZURANA, M. **Atributos físicos, mineralógicos e matéria orgânica de solos relacionados à capacidade de suporte de carga**. 2011. 169 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; INDA JUNIOR, A. V.; CONTE, O.; BRESSANI, L. A.; MULLER, J. Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, p. 60-71, 2017.

McBRIDE, R. A., WATSON, G. C. An investigation of the re-expansion of unsaturated, structured soils during cyclic static loading. **Soil and Tillage Research**, v. 17, p. 241-253, 1990. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90039-G](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(90)90039-G).

McQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T. G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, v. 25, p. 217-230, 2002.

MEDRADO, M. J. S.; LOURENÇO, R. S.; RODIGHERI, H. R.; DEDECEK, R. A.; PHILIPPOVSKY, J. F.; CORREA, G. **Implantação de Ervais**. Embrapa Florestas, Circular Técnica 41. 2000; 26 p.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P.I.; REINERT, D. J.; XAVIER, A. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 221-231, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S010006832013000100023>.

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, p. 47-59, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.042>.

MICKOVSKI, S. B.; HALLETT, P. D.; BRANSBY, M. F.; DAVIES, M. C.; SONNENBERG, R.; BENGOUGH, A. G. Mechanical reinforcement of soil by willow roots: impacts of root properties and root failure mechanism. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 4 p. 1276-1285, 2009. doi:10.2136/sssaj2008.0172

MIQUELONI, D. P.; ASSIS, G. M. L. Amendoim forrageiro: principais características, uso e melhoramento genético. **Docência, Pesquisa e Liderança em Zootecnia**. 27 p. 2020.

MIRANDA, E. M. de; SAGGIN JUNIOR, O. J.; SILVA, E. M. R. da. Seleção de fungos micorrízicos arbusculares para o amendoim forrageiro consorciado com braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 9, p. 1185-1191, 2008.

MIRANDA, E. M. de; SILVA, E. M. R. da; SAGGIN JUNIOR, O. J. Comunidades de fungos micorrízicos arbusculares associados ao amendoim forrageiro em pastagens consorciadas no Estado do Acre, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 40, n. 1, p. 13-22, 2010.

MORAES, M. T de.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 288-298, 2014.

MORAES, M. T. de.; LUZ, F. B.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da. Soil load support capacity increases with time without soil mobilization as a result of age-hardening phenomenon. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 128-134, 2019.

NASCENTE, A. S.; CRUSCIOL, C. A. C. Soil aggregation, organic carbon concentration, and soil bulk density as affected by cover crop species in a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 871-879, 2015.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; SUZUKI, L. E.; VAN ES, H. M. Dynamic changes in compressive properties and crop response after chisel tillage in a highly weathered soil. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 183-190, 2019.

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

OGILVIE, C. M.; ASHIQ, W.; VASAVA, H. B.; BISWAS, A. Quantifying Root-Soil Interactions in Cover Crop Systems: A Review. **Agriculture**, 11, 218, 2021. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030218>

ORTIGARA, C; KOPPE, E; LUZ, F. B. da; BERTOLLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. S. da. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 619-626, 2014.

PAIS, P. S. M. **Atributos físicos, capacidade de suporte de carga e resistência ao cisalhamento de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes usos e manejos.** 2014. 91 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2014.

PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. R. Erva 20: **Sistema de produção para erva-mate.** Brasília, DF: Embrapa, 2019. 152 p.

PERDOK, U. D.; KROESBERGEN, B.; HOOGMOED, W. B. Possibilities for modeling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types. **Soil and Tillage Research**, v.65, p. 61-75, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00277-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00277-X)

PEREIRA, A. L.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M. de.; CAVALCANTE, I. H. L.; SILVA, V. A. da.; MARTINS FILHO, M. V. Atributos do solo sob pastagem em sistema destema de sequeiro e irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 2, p. 377-384, 2009.

PERIN, A.; GUERRA, J. G. M.; TEIXEIRA, M. G.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A. Efeito da cobertura viva com leguminosas herbáceas perenes na agregação de um Argissolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 713-720, 2002.

PERIN, A.; GUERRA, J. G.; TEXEIRA, M. G. Cobertura do solo e acumulação de nutrientes pelo amendoim-forrageiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 7, p. 791-796, 2003.

PÉRTILE, P. **Propriedades mecânicas em micro e mesoescala de solos do Rio Grande do Sul.** 2015. 164 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

PICCOLO, G. A.; ANDRIULO, A. E.; MARY, B. Changes in soil organic matter under different land management in Misiones Province (Argentina). **Scientia Agricola**, v. 65, n. 3, p. 290-297, 2008.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.77, p. 79-84, 2004.

PIRES, B. S. **Resistência ao cisalhamento e compressibilidade de um Latossolo sob diferentes usos e manejos**. 2007. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2007.

PORTELLA, C. M. R.; GUIMARÃES, M. de F.; FELLER, C.; FONSECA, I. C. de B.; TAVARES FILHO, J. Soil aggregation under different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1868-1877, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600021>.

PRETTY, J.; BALL, A. **Agricultural influences on carbon emissions and sequestration: a review of evidence and the emerging trading options**. Centre for Environment and Society Occasional. 2001. University of Essex, United Kingdom. Disponível em: <http://www2.essex.ac.uk/ces/ResearchProgrammes/CESOccasionalPapers/OccPaper2001-4.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2021.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122 -137, 2018.

R CORE TEAM (2021). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2021. ISBN 3-900051-07- 0, URL <http://www.R-project.org>.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 44, p. 310-319, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300013>.

REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; RODRIGUES, M. F.; CAVALLI, J. P.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry, organic matter, bulk density and moisture. **Catena**, v. 165, p. 345-357, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.014>

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

REICHERT, J. M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: VAN LIER, Q. J. (Ed). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 30-102.

REICHERT, J. M.; ROSA, V. T. da; VOGELMANN, E. S.; ROSA, D. P. da; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTLER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.11.010>.

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. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.

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

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, 2006.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, p. 321-344, 2005.

ROCHA, S. P. **Propriedades físico-hídricas e químicas do solo e crescimento inicial de erva-mate cultivada em diferentes tipos de cobertura do solo**. 2018. 208 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J. C. Sistemas de Manejo e Matéria Orgânica do Solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. (Ed.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 17-35.

RÜCKNAGEL, J.; RADEMACHER, A.; GÖTZE, P.; HOFMANN, B.; CHRISTEN, O. Uniaxial compression behaviour and soil physical quality of topsoils under conventional and conservation tillage. **Geoderma**, p. v. 286, 1-7, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.015>.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L.; BOENI, M.; CONCEICAO, P. C. **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 58 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 29).

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação**. 2010, 158 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

SIGMAPLOT. Version 14. **Systat Software**, Inc., San Jose, California.

SILVA, A. A.; SILVA, P. R.; SUHRE, E.; ARGENTA, G.; STRIEDER, M. L.; RAMBO, L. Sistemas de coberturas de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos do milho em sucessão. **Ciência Rural**, v. 37, p. 928-935, 2007.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro submetido a pressões uniaxiais. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., Recife, 2005. **Anais...** Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. CD-ROOM.

SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 853-862, 2007.

SILVA, A. P.; LEÃO, T. P.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1535 -1545, 2009.

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

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 2: p. 313- 319, 1997.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E.J., 3ed. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre, 2006. p.63-90.

SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIEDER, M.L.; SILVA, A. A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1011-1020, 2006.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SANTOS, F. L.; FRANZ, C. A. B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 165-173, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000100016.

SILVA, R. L. F. da; GIMENES, F. M. de A. HYONEMOTO, L. N.; LACERDA, L. B.; COLANIGO, J. S. Análise de crescimento e morfologia de raízes de leguminosas forrageiras submetidas a adubação nitrogenada no plantio. In: Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica, 13., 2019, Campinas, São Paulo. Disponível em: http://www.ciic.net.br/resumos_2019/IZ/RE19711.pdf . Acesso em: 18 jun. 2021.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo vermelho-escuro e de um podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 239-249, 2000.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1-8, 2002.

SINNETT, D., MORGAN, G., WILLIAMS, M., HCTCHINGS, T. Soil penetration resistance and tree root development. **Soil Use and Management**, v. 24, p. 273-280, 2008.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, p. 179-201, 1990. [http://dx.doi.org/10.1016/01671987\(90\)90029-D](http://dx.doi.org/10.1016/01671987(90)90029-D).

SOMAVILLA, A.; GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; ZWIRTES, A. L. Exploring the correspondence between precompression stress and soil load capacity in soil cores. **Soil and Tillage Research**, v. 169, p. 146-151, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.02.003>

SOUZA, E. D. de.; COSTA, S. E. V. G. de A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S de.; CARVALHO, P. C. de F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 79-88, 2010.

SSSA, SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Madison, WI. 2008, 88 p.

STONE, J. A.; LARSON, W. E. Rebound of five one-dimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 819-822, 1980. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400040032x>.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade a compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 963-973, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300006>.

TAGLIAFERRE, C.; SANTOS, T. J.; SANTOS, L. da C.; SANTOS NETO, I. J.; ROCHA, F. A.; PAULA, A. Características agronômicas do feijão caupi inoculado em função de lâminas de irrigação e de níveis de nitrogênio. **Revista Ceres**, v. 60, n. 2, p. 242-248, 2013.

TANG, A. M.; CUI, Y.; RICHARD, G.; DÉFOSSEZ, P. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. **Geoderma**, v. 162, p. 171-181, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.01.019>.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, p. 18-22, 1966.

TIECHER, T.; GUBIANI, E.; SANTANNA, M. A.; VELOSO, M. G.; CALEGARI, A.; CANALLI, L. B. dos S.; FINCKH, M. R.; CANER, L.; RHEINHEIMER, D. dos S. Effect of 26-years of soil tillage systems and winter cover crops on C and N stocks in a Southern Brazilian Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2020; 44:e 0200029. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200029>

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.

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.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L.; SOUZA, Z. P. Atributos físicos de um Latossolo vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n.1, p. 428-437, 2015a.

TORRES, J. L. R.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L. Atributos indicadores da qualidade do solo numa área sob plantio direto há doze anos. **Comunicata Scientiae**, v. 6, p. 123-133, 2015b.

TULI, A.; HOPMANS, J. W.; ROLSTON, D. E.; MOLDRUP, P. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1361-1371, 2005. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0332>

USP, Universidade de São Paulo. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. **Leguminosas forrageiras de clima tropical e temperado**, 2016. Disponível em: <<https://sites.usp.br/gefepfzea/wp-content/uploads/sites/134/2014/05/Leguminosas.pdf>> Acesso em: 18 jun. 2021.

VALENTIM, J. F.; MOREIRA, P. **Produtividade de forragem de gramíneas e leguminosas em pastagens puras e consorciadas no Acre**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Embrapa Acre, 2001, 35p.

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

VAN LIER, Q. de Jong. Energia térmica do solo. In: VAN LIER, Q. de J. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 153-175.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 213-223, 2011. Disponível em: doi: 10.1590/S0100-06832011000100020.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C. de.; BATATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 256-265, 2012.

WINGEYER, A. B.; AMADO, T. J. C.; BIDEGAIN, M. P.; STUDDERT, G. A.; VARELA, C. H. P.; GARCIA, F.; KARLEN, D. L. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. **Sustainability**, v. 7, p. 2213-2242, 2015. doi:10.3390/su7022213

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects on mechanical properties of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 31, p. 263-175, 1994.

ZHANG, Y. The microstructure and formation of biological soil crusts in their early developmental stage. **Chinese Science Bulletin**, v. 50, n. 2, p. 117-121, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados da coesão (c) e ângulo de atrito interno do solo (ϕ), na camada de 1-4 cm, de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com erva-mate consorciada com plantas de cobertura em Santa Maria - RS.

Blocos	Tratamentos	Camada cm	c kPa	ϕ °
1	Amendoim Forrageiro	1 - 4	83	36
2	Amendoim Forrageiro	1 - 4	48	40
3	Amendoim Forrageiro	1 - 4	80	31
4	Amendoim Forrageiro	1 - 4	28	38
1	Aveia Preta e Ervilhaca	1 - 4	84	32
2	Aveia Preta e Ervilhaca	1 - 4	50	31
3	Aveia Preta e Ervilhaca	1 - 4	60	39
4	Aveia Preta e Ervilhaca	1 - 4	52	39
1	Soja Perene	1 - 4	39	38
2	Soja Perene	1 - 4	40	29
3	Soja Perene	1 - 4	72	34
4	Soja Perene	1 - 4	47	38
1	Vegetação Espontânea	1 - 4	53	38
2	Vegetação Espontânea	1 - 4	56	34
3	Vegetação Espontânea	1 - 4	29	41
4	Vegetação Espontânea	1 - 4	52	34

APÊNDICE B – Dados da coesão (c) e ângulo de atrito interno do solo (ϕ), na camada de 10-14 cm, de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com erva-mate consorciada com plantas de cobertura em Santa Maria - RS.

Blocos	Tratamentos	Camada cm	c kPa	ϕ °
1	Amendoim Forrageiro	10 - 14	85	32
2	Amendoim Forrageiro	10 - 14	83	33
3	Amendoim Forrageiro	10 - 14	67	34
4	Amendoim Forrageiro	10 - 14	97	27
1	Aveia Preta e Ervilhaca	10 - 14	86	31
2	Aveia Preta e Ervilhaca	10 - 14	81	33
3	Aveia Preta e Ervilhaca	10 - 14	82	39
4	Aveia Preta e Ervilhaca	10 - 14	98	27
1	Soja Perene	10 - 14	80	43
2	Soja Perene	10 - 14	68	40
3	Soja Perene	10 - 14	93	29
4	Soja Perene	10 - 14	79	26
1	Vegetação Espontânea	10 - 14	70	30
2	Vegetação Espontânea	10 - 14	87	30
3	Vegetação Espontânea	10 - 14	84	36
4	Vegetação Espontânea	10 - 14	80	41