

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

Jordano Vaz Ambus

**CONDIÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO EM
SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

Santa Maria, RS, Brasil
2016

Jordano Vaz Ambus

**CONDIÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO EM SISTEMA
INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

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

Orientador: Prof. Dr. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

VAZ AMBUS, JORDANO
CONDIÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO EM
SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA / JORDANO VAZ
AMBUS.- 2016.
56 p.; 30 cm

Orientador: JOSÉ MIGUEL REICHERT
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2016

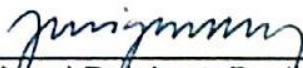
1. Sistema Integrado 2. Pisoteio animal 3. Estrutura
do solo 4. Compactação 5. Raízes I. REICHERT, JOSÉ MIGUEL
II. Título.

Jordano Vaz Ambus

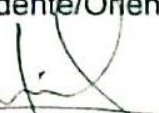
**CONDIÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO EM SISTEMA
INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Ciência do Solo
da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para a obtenção do título de
Mestre em Ciência do Solo.

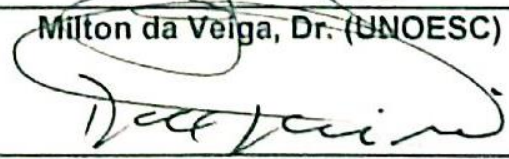
Aprovado em 26 de julho de 2016:



José Miguel Reichert, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Milton da Veiga, Dr. (UNOESC)



Dalvan José Reinert, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS, Brasil
2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela oportunidade de cursar o mestrado.

Agradeço ao Professor-orientador José Miguel Reichert pela orientação e ensinamentos valiosos durante estes dois anos, ao Professor Paulo Ivonir Gubiani pela ajuda nos momentos cruciais do desenvolvimento desse trabalho, e aos demais mestres do PPGCS pelo compartilhamento de vosso conhecimento nas disciplinas cursadas.

Agradeço aos Departamentos de Solos e de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela disponibilidade na área experimental onde foi desenvolvido este estudo. Em especial, ao Professor Ibanor Anghinoni por dividir seu conhecimento de forma a auxiliar neste trabalho.

Agradeço à minha família: Ao meu pai Mariano Hoff Ambus, minha mãe Leci Vaz Ambus e minhas irmãs Gisleila Ambus, Lisiane Ambus, Mariani Ambus e Cleidi Ambus por serem meu exemplo de perseverança e determinação, e meu apoio incondicional.

Agradeço à minha namorada Thaís Antolini Veçozzi, pelo apoio, compreensão e carinho.

Agradeço aos colegas Lucas Contarato Pilon, Alan Carlos Batistão, Fabio José Andres Schneider e Rodrigo Pivoto Mulazzani, pelo auxílio nas coletas a campo, e à colega Patricia Pértile, nas análises mecânicas.

Por fim, agradeço aos demais colegas que de uma forma ou outra tem participação nessa realização.

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

CONDIÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

AUTOR: Jordano Vaz Ambus
ORIENTADOR: José Miguel Reichert

Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) são uma alternativa importante à diversificação da produção, aumentando a eficiência e a autonomia dos sistemas de produção. Porém, o manejo inadequado da lotação animal nesse sistema promove inúmeras consequências negativas, sobretudo às propriedades estruturais do solo dependentes do espaço poroso, as quais podem ser limitantes tanto para o desenvolvimento de plantas quanto para a sustentabilidade do sistema. Contudo, existem indícios de que o pastejo animal bem manejado pode gerar benefícios à estruturação do solo, devido à ação do sistema radicular das plantas de cobertura que é estimulado de forma positiva após o pastejo. Dentro desse contexto, a hipótese deste estudo é de que pastejo moderado promove melhorias na qualidade estrutural no solo em SIPA. O objetivo do estudo foi avaliar como diferentes níveis de pastejo afetam as propriedades físicas e mecânicas do solo. O experimento consistiu em um SIPA com 15 anos de condução, manejado com soja (*Glycine max*) no verão e aveia preta (*Avena strigosa*, Schreb) + azevém (*Lolium multiflorum*, Lam.) no inverno destinadas ao pastejo contínuo de bovinos de corte. Os tratamentos consistiram em diferentes intensidades de pastejo, determinados pela altura da pastagem, sendo: 0,10 m (pastejo intenso), 0,30 m (pastejo moderado) e uma área como testemunha (sem pastejo) em um delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições. Foi realizada a coleta de amostras de estrutura preservada (anéis volumétricos), nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m ao término de cada ciclo, soja e pastagem, abril e novembro de 2015, respectivamente. Foram determinados a densidade do solo (D_s), a porosidade total (Pt), a macroporosidade (Ma), a microporosidade (Mi), a permeabilidade ao ar (K_a), a condutividade hidráulica de solo saturado (K_s), a pressão de preconsolidação (σ_p), o índice de compressão (I_c), o coeficiente de descompressão (Cd) e a compressibilidade cíclica do solo. Os resultados indicam que o pastejo aumenta o estado de compactação da superfície do solo, causando efeitos negativos nas propriedades físicas e mecânicas. Todavia, há uma atenuação destes efeitos se avaliados após o cultivo de verão.

Palavras-chave: Sistema integrado, pisoteio animal, estrutura do solo, raízes.

ABSTRACT

PHYSICAL AND MECHANICAL CONDITIONS OF A OXISOL IN INTEGRATED CROP LIVESTOCK SYSTEM

AUTHOR: Jordano Vaz Ambus
ADVISOR: José Miguel Reichert

The integrated crop livestock systems are an important alternative to diversify production, increasing efficiency and autonomy of production systems. However, inadequate management of this stocking system promotes numerous negative consequences, especially on structural properties dependent on soil pore space, which can be limiting for both the development of plants and for system sustainability. However, there are indications that well-managed grazing systems can generate benefits to soil structure, due to the action of the plant root system that is positively stimulated after grazing. The hypothesis of this study is that moderate grazing promotes improvements in soil structural quality in this system. The objective of the study was to evaluate how different grazing levels affect selected soil physical and mechanical properties. The experiment consists of a 15-years old integrated crop livestock system, managed with (Glycine max) in the summer and (*Avena strigosa*, Schreb) + (*Lolium multiflorum* Lam.) in winter intended for continuous grazing of beef cattle. The treatments consisted of different grazing intensities, determined by sward height, namely: 0.10 m (heavy grazing), 0.30 m (moderate grazing) and an area as control (without grazing) in an experimental design of randomized blocks with three replications. Preserved-structure samples (volumetric rings) were collected in the 0-0.05, 0.05-0.10, and 0.10-0.20 m layers at the end of each cycle, soybeans and pasture, April and November 2015, respectively. Soil bulk density (Ds), total porosity (Pt), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), air permeability (Ka), saturated hydraulic conductivity soil (Ks), preconsolidation pressure (σ_p), compression ratio (Ic), decompression coefficient (Cd) and soil cyclic loading test were determined. The results indicate that grazing increases the state of compaction of the soil surface, causing negative effects of the physical and mechanical properties. However, there is a mitigation of the effects if evaluated after the summer crop.

Keywords: Integrated system, animal trampling, soil structure, roots.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	10
3.	METODOLOGIA	17
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	17
3.2.	DELINEAMENTO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	17
3.3.	ANÁLISES REALIZADAS	19
3.3.1.	Permeabilidade do solo ao ar (K_a)	20
3.3.2.	Condutividade hidráulica de solo saturado (K_s).....	21
3.3.3.	Densidade do solo (D_s)	22
3.3.4.	Porosidade total (P_t)	22
3.3.5.	Microporosidade (M_i).....	22
3.3.6.	Macroporosidade (M_a).....	22
3.3.7.	Pressão de preconsolidação (σ_p), Índice de compressão (I_c) e compressibilidade cíclica.....	22
3.3.8.	Conteúdo volumétrico de água (θ) (Ψ_m -10 kPa).....	24
3.3.9.	Elasticidade do solo (C_d).....	24
3.3.10.	Índice de compressibilidade cíclica (C_n)	25
4.	TESTES ESTATÍSTICOS.....	26
5.	RESULTADOS	27
5.1.	PROPRIEDADES DE CAPACIDADE	27
5.2.	PROPRIEDADES DE INTENSIDADE	30
5.2.1.	Propriedades mecânicas	30
5.2.2.	Propriedades de fluxo	38
6.	DISCUSSÃO.....	41
6.1.	PROPRIEDADES DE CAPACIDADE	41
6.2.	PROPRIEDADES DE INTENSIDADE	42
6.2.1.	Propriedades mecânicas	42
6.2.2.	Propriedades de fluxo	47
7.	CONCLUSÕES	49
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul é um dos principais estados do Brasil na produção de grãos e também um dos pioneiros no manejo conservacionista do solo. As áreas de cultivo, em sua grande maioria, são utilizadas para a produção de grãos durante a safra de verão, entrando em pousio no período de entressafra ou em alguns casos, cultivadas com cereais de inverno, porém em área incipiente se comparado com a extensão cultivada no verão. A necessidade de diversificação da produção, aliado a uma forte vocação pecuarista, influenciaram os agricultores a adotarem os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA's), identificados pela produção de grãos de forma associada com a produção animal (de corte ou de leite) ocupando o mesmo espaço, porém em épocas diferentes. No RS os SIPA's caracterizam-se em sua maioria pela produção de grãos no verão, como soja e milho, e a implantação de pastagens com gramíneas anuais para o pastejo durante o período de inverno; posteriormente, as áreas são dessecadas para a semeadura direta da soja.

Os SIPA's são utilizados associados ao Sistema Plantio Direto (SPD) que já é bastante difundido no estado, e este por si só já possui suas peculiaridades e suas dificuldades quanto ao manejo do solo, o que causa forte discussão no meio científico. Ao inserirmos o componente animal neste meio, o sistema torna-se ainda mais complexo. Deve-se compreender a participação de cada componente, para que se mantenha um equilíbrio, onde a entrada de um elemento não altere ou mesmo prejudique a participação de outro.

É sabido que o pastejo nos SIPA's pode causar uma série de problemas se mal manejado, como a diminuição acentuada da cobertura e a compactação do solo gerada pelo pisoteio animal, ocasionando alterações nas propriedades físicas e mecânicas do solo, como a diminuição dos fluxos de água e ar e a restrição ao crescimento das plantas. Porém, o pastejo, se bem manejado, pode trazer inúmeros benefícios para o sistema, melhorando a qualidade do solo tanto em termos físicos com químicos e microbiológicos.

O presente estudo está focado nas alterações que o pisoteio animal pode causar nas propriedades físicas e mecânicas do solo e nas consequências dessas mudanças no sistema de produção.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O Rio Grande de Sul possui uma participação significativa na produção de grão do Brasil, com cerca de 8,5 milhões de hectares plantadas na safra de verão 2014/15 (CONAB, 2015). No entanto, apenas cerca de 1,2 milhão de hectares foram cultivadas com cereais de inverno no período de entressafra (CONAB, 2015). Por esse motivo, tem-se um excedente muito expressivo de áreas agricultáveis, que normalmente permanecem em pousio durante o período de inverno ou é realizada a implantação de plantas de cobertura para manter o solo coberto para a realização da semeadura direta na estação seguinte.

As áreas cultivadas com espécies anuais de verão são quase que em sua totalidade manejadas sob semeadura direta ou Sistema de Plantio Direto (SPD). Contudo, a prática do pousio na entressafra habitualmente praticada no estado do RS, vai contra os preceitos do SPD no que se refere ao aporte de matéria seca ao solo, à consorciação e/ou rotação de culturas e, principalmente, à manutenção da cobertura permanente viva ou morta do solo (DENARDIN et al., 2001). Além disso, em termos de conservação do solo, essa prática também é considerada inadequada, pois o solo descoberto torna-se vulnerável ao impacto das gotas da chuva e aumento do escoamento superficial, tornando-o mais propenso à degradação pela erosão e transporte de partículas de solo (ALBUQUERQUE et al., 2002; CARDOZO et al., 2012).

Essas áreas menos produtivas no inverno, além de serem insustentáveis do ponto de vista agrícola e ambiental, tornam-se um obstáculo ao desenvolvimento das regiões onde se situam. Assim, SPD o agricultor assume um papel de responsável pela sustentabilidade, garantindo o suprimento das necessidades das gerações futuras, preocupando-se com a manutenção dos recursos e qualidade de vida (MELLO & BRUM, 2013).

Dentro desse contexto, uma alternativa para a questão do pousio invernal é a introdução de pastagens no período de inverno destinadas à produção animal, de maneira que, além de contribuir para a conservação do solo e recursos naturais, seja uma forma de diversificação das atividades a partir da produção de recursos de origem animal. A diversificação aumenta as opções e as fontes de renda, fazendo com que os riscos sejam diluídos nas diversas atividades. Dessa forma, as oscilações dos mercados serão sentidas de modo menos intenso pelos produtores

que possuem outras fontes de renda, tornando-os menos vulneráveis às crises no meio rural (TERNOSKI, 2014).

Devido à sua forte vocação pecuarista e à percepção por parte dos agricultores da importância da diversificação, o estado do RS vem ao longo dos anos realizando a integração da atividade agrícola com a produção animal. São os chamados Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA's), ou também conhecido como Integração Lavoura-pecuária (ILP). Macedo (2009) apresenta uma definição consensual de ILP proposta por pesquisadores da Embrapa de diversos polos no Brasil, sendo a seguinte:

Integração lavoura-pecuária são sistemas produtivos de grãos, fibras, carne, leite, lã, e outros, realizados na mesma área, em plantio simultâneo, sequencial ou rotacionado, onde se objetiva maximizar a utilização dos ciclos biológicos das plantas, animais, e seus respectivos resíduos, aproveitar efeitos residuais de corretivos e fertilizantes, minimizar e otimizar a utilização de agroquímicos, aumentar a eficiência no uso de máquinas, equipamentos e mão-de-obra, gerar emprego e renda, melhorar as condições sociais no meio rural, diminuir impactos ao meio ambiente, visando a sustentabilidade.

Os SIPA's estão em ascensão nos últimos anos, embora não sejam sistemas jovens em sua concepção, e vêm tomando proporções maiores devido ao incentivo tanto no âmbito federal quanto mundial. Com a criação do plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), com linhas crédito destinadas aos produtores que adotarem sistemas de produção que vislumbrem maior sustentabilidade e menor emissão de CO₂, o Brasil dá um passo importante rumo à produção sustentável e eficiente (MAPA/ACS 2012). A Organização de Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) incentiva a produção de alimentos por meio de sistemas integrados, sugerindo que a única forma de atender as necessidades alimentares da população em 2050 será a intensificação da produção, ou seja, aumento de produção por unidade de área (FAO 2015).

Analisando o solo como um sistema aberto, com livre entrada e saída dos fatores, o nível de organização tende ao desequilíbrio com variação sempre positiva da entropia (dissipação de energia), e a intensidade da energia dissipada pelo sistema depende diretamente da energia que é imposta a ele, ou seja, quanto maior o estímulo recebido pelo sistema, maior será a resposta e mais distante do equilíbrio ele estará (PRIGOGINE, 2002). Dessa forma, o sistema solo irá responder aos

estímulos que a ele forem conferidos, e quanto maior a complexidade do manejo do solo, mais estimulado ele será. Portanto, em SIPA's existe uma gama de estímulos que diferenciam esse sistema das demais formas de produção, pois existe uma maior quantidade de fatores que são integrados. Nesses sistemas, além das diferentes espécies vegetais que são rotacionadas ao longo dos anos, pode haver inserção do fator animal, que altera ainda mais o estado de equilíbrio do meio, tornando-o mais complexo, dinâmico e capaz de se autorregular.

Os SIPA's do Subtrópico Brasileiro, de maneira geral, são caracterizados pela produção de culturas de verão produtoras de grãos, como soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e arroz (*Oryza sativa*), seguido da implantação de pastagens com gramíneas no inverno, como aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium Multiflorum*), destinadas ao pastejo animal (MORAES et al., 2014). Esse sistema, se bem manejado, pode gerar diversos benefícios ao solo, como a melhor ciclagem de nutrientes, manutenção de matéria orgânica do solo (MOS) e atividade dos microrganismos, e principalmente melhorias na estrutura do solo, aumentando a agregação, infiltração e retenção de água, tornando o sistema mais eficiente e produtivo (CARVALHO et al., 2015). O benefício inicial para o solo é a proteção que a cobertura vegetal da pastagem oferece ao mesmo, evitando que permaneça exposto à degradação pelos diversos fatores, como a chuva, sol, vento, entre outros. Dessa forma, preserva a integridade do sistema solo, fornecendo ambiente propício para o desenvolvimento e interação dos elementos que o compõe, quais sejam minerais, plantas e biota edáfica.

A melhoria da qualidade do solo nos SIPA's está muito relacionada à heterogeneidade do sistema em questão, pois, como mencionado anteriormente, um sistema com várias entradas e saídas reflete positivamente no seu nível de energia. Em termos práticos, a inserção das gramíneas promove aumento na taxa de adição de matéria seca ao solo pela parte aérea, enquanto as raízes das plantas, além da matéria seca, contribuem com a liberação de exsudatos radiculares. A contribuição da matéria seca e dos exsudatos das raízes para os compostos orgânicos do sistema solo pode exceder a contribuição da parte aérea em 1,5 vezes (BALESDENT & BALABANE, 1996). Assim, a maior produção de biomassa estimula a biota edáfica e esta, por sua vez, promove melhorias químicas e estruturais ao solo.

O componente animal altera a dinâmica do sistema no que se refere à ciclagem de nutrientes, devido à produção de dejetos (fezes e urina), que configura a adição de um material orgânico proveniente também das plantas, porém com características diferentes, fazendo com que todo o sistema se comporte de forma distinta. Além disso, o pastejo também altera a dinâmica de crescimento das plantas, que influencia na produção de raízes, ou seja, a entrada de um componente altera o meio como um todo.

As melhorias da qualidade física do solo nos SIPA's podem ser atribuídas à utilização das gramíneas na entressafra, cujo sistema radicular é agressivo atuando na estruturação do solo, sendo que o seu crescimento é estimulado com a presença dos animais (ANGHINONI et al., 2013). Quando a pastagem é submetida a um sistema adequado de lotação, após o pastejo ocorre o desenvolvimento de novos perfilhos e novas raízes serão emitidas (EMBRAPA, 2014). As gramíneas atuam de forma intensa em processos de grande importância dentro do solo, dentre os principais destacam-se a formação e estabilização dos agregados. Conte et al. (2011a) demonstram que o aumento da densidade radicular das gramíneas promove o aumento da agregação, e que há relação linear entre a massa de raízes e a pressão de pastejo até valores intermediários de oferta de forragem. O aporte de C ao solo, especialmente via raízes, é fundamental para existência de macroagregados, o que é evidenciado pelos sistemas com pastagem em rotação com soja, que possuem DMP (diâmetro médio ponderado) maior que sistema apenas com lavouras (WOLEMBERG et al., 2004; SALTON et al., 2008). Além de aumentar o aporte de carbono ao solo, incluindo a liberação de exsudatos, a ação mecânica das raízes é o principal fator de estabilização dos macroagregados do solo.

Para propriedades como a densidade e porosidade do solo, sistemas de pastejo com baixa lotação animal por unidade de área não danificam a estrutura do solo, e possuem valores similares para essas variáveis em sistemas com ou sem pastejo (VEIGA et al., 2012), demonstrando que um manejo adequado de lotação não gera efeito negativo à estrutura do solo.

O pastejo pode trazer todos os benefícios já citados, mas também causa danos à estrutura do solo. Quando de forma excessiva, o pisoteio dos animais exerce efeito direto no aumento da densidade do solo, pois a massa do animal e a

pressão do casco pode deformar a estrutura do solo pelo efeito repetido da compressão e descompressão, podendo aumentar o estado de compactação do solo. Como resultado, pode ocorrer impedimento ao desenvolvimento das raízes, que são um dos principais fatores de benefício que há nesse sistema de produção, e esses efeitos são observados de forma mais intensa nas camadas superficiais (MOREIRA et al., 2012).

O aumento do estado de compactação do solo exerce efeito direto no seu espaço poroso, representado pela macroporosidade (MA) e microporosidade (MI), sendo a MA mais afetada pelo aumento da densidade do solo, e diretamente responsável pela dinâmica dos fluxos de água e ar na matriz do solo, sendo estes atributos os mais sensíveis e primeiramente afetados pelo manejo inadequado da pressão de pastejo. Desse modo, a compactação gerada pelo pisoteio do gado nos SIPA's pode gerar alterações negativas nas propriedades de fluxo do solo, como a condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade ao ar (KRÜMMELBEIN et al., 2008; COLLARES et al., 2011).

Por outro lado, quando o manejo dos animais é feito de forma equilibrada, com níveis moderados de pisoteio, prevalece o fato do pastejo induzir o perfilhamento das gramíneas, devido ao constante corte dos meristemas, aumentando o enraizamento das plantas. Dessa forma, pode haver maior densidade de raízes e, conseqüentemente, maior biomassa radicular nas áreas com pastejo (LARREGUY et al., 2014). As raízes morrem ao fim do ciclo da pastagem e são decompostas, deixando poros contínuos, podendo, influenciar positivamente a funcionalidade do solo como condutor de água e gases, devido à melhor estruturação da porosidade influenciada pelas raízes, aumentando a MA (ZÚÑIGA et al., 2015).

A capacidade de suporte de carga e a susceptibilidade de solos sob sistemas integrados dependerá de uma série de fatores, como o tipo de solo, estado inicial de compactação (D_s) e conteúdo de água que o mesmo possui no momento da aplicação da carga (AN et al., 2015). Porém, sistemas integrados possuem boa capacidade de resistir ao pisoteio animal pelo fato do solo possuir uma boa cobertura permanente e intensa atividade do sistema radicular, principalmente nos níveis intermediários de pressão de pastejo e com altas taxas de adição de material

orgânico ao solo, pois resíduos na superfície atenuam o efeito no solo da pressão aplicada (BRAIDA et al., 2006).

Contudo, para se avaliar o efeito do pisoteio nas propriedades mecânicas do solo, deve-se levar em consideração o dinamismo com que esse processo ocorre no campo, pois os animais se deslocam sobre a pastagem de diferentes formas e intensidades de acordo com uma série de fatores, especialmente a oferta de forragem e a lotação. Quanto menor a oferta de forragem, mais os animais se deslocam dentro das áreas de pastejo em busca de alimento (BAGGIO, 2007). Por outro lado, quanto maior o número de animais que pastejam o mesmo local, maior será o efeito do pisoteio. Esses dois casos normalmente ocorrem de forma simultânea, ou seja, quando a lotação for alta haverá baixa oferta de forragem.

O processo de deformação do solo no campo está, de certa forma, distante dos métodos testados em laboratório, pois em condições naturais o solo é submetido a diferentes cargas em diferentes intervalos de tempo e, normalmente, são ciclos rápidos de carregamento e descarregamento, seja pela passagem de uma máquina agrícola ou pela pisada de um animal, tornando a relação pressão-deformação bastante dinâmica (MORDHORST et al., 2012). Portanto, a avaliação da deformação do solo por meio de ensaios dinâmicos de compressibilidade é importante, pois é uma forma de se obter resultados mais próximos da realidade do campo, podendo ser avaliada a elasticidade do solo e como este se comporta frente às tensões sofridas (PETH et al., 2010). Ainda que distantes da real dinâmica dos processos que ocorrem em condições naturais, a avaliação por ensaios dinâmicos denota um avanço na pesquisa em deformação na estrutura do solo.

Os SIPA's são sistemas emergentes no cenário nacional, porém ainda existe resistência por parte dos produtores rurais para a adoção desse sistema. Essa resistência está ligada à desconfiança dos reais benefícios que o sistema pode proporcionar e a dificuldade que existe em adotar um novo sistema de manejo onde o agricultor torna-se pecuarista em determinado período do ano, e vice-versa. Dentro desse contexto, a pesquisa tem papel fundamental em testar, provar e difundir os benefícios que esta forma de produzir proporciona para o meio rural, no aspecto agrícola, social, econômico e ambiental.

O solo, como grande regulador do sistema, é a chave da sustentabilidade em Sistemas Integrados. Assim, faz-se necessária a avaliação de diferentes

propriedades de solo, de forma a contribuir para o melhor entendimento de suas possíveis participações para a melhoria da qualidade do solo e, assim, maior desenvolvimento e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

A hipótese formulada para este estudo é de que o pastejo moderado em SIPA's promove melhorias na qualidade estrutural no solo, expressas pelo aumento dos fluxos de água e ar, maior suporte de carga, menor deformação e maior elasticidade, em ensaios de carregamento dinâmico simulando o pisoteio animal.

O objetivo deste trabalho é investigar como os diferentes níveis de pastejo, em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária, influenciam as propriedades físicas relacionadas ao espaço poroso e estrutura do solo, como densidade, macroporosidade, microporosidade e condutividade de água e ar, além de propriedades mecânicas que estimam a compactação e suporte de carga do solo, como pressão de preconsolidação, índice de compressão e avaliação do comportamento elástico do solo submetido a ciclos de carregamento dinâmico. O intuito é contribuir para o entendimento da complexidade desse sistema de produção.

3. METODOLOGIA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento constitui uma parceria entre os Departamentos de Solos e de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A pesquisa vem sendo conduzida desde maio de 2001, em área localizada na Fazenda do Espinilho, pertencente à Cabanha Cerro Coroadó. A sede está localizada no município de São Miguel das Missões, ocupando também área dos municípios de Jóia e Tupanciretã, na região fisiográfica do Planalto Médio – RS (29°03'10" S latitude, 53°50'44" O longitude). A altitude do local é de 465 m e o clima caracteriza-se como subtropical úmido e quente (Cfa), segundo a classificação de Köppen (KOTTEK et al., 2006), com temperatura média anual de 19°C e precipitação média anual de 1.850 mm (CEMETRS, 2015). O relevo é ondulado a suavemente ondulado e a localização na paisagem é de topo de colina, com declividade entre 0,02 a 0,10 m m⁻¹.

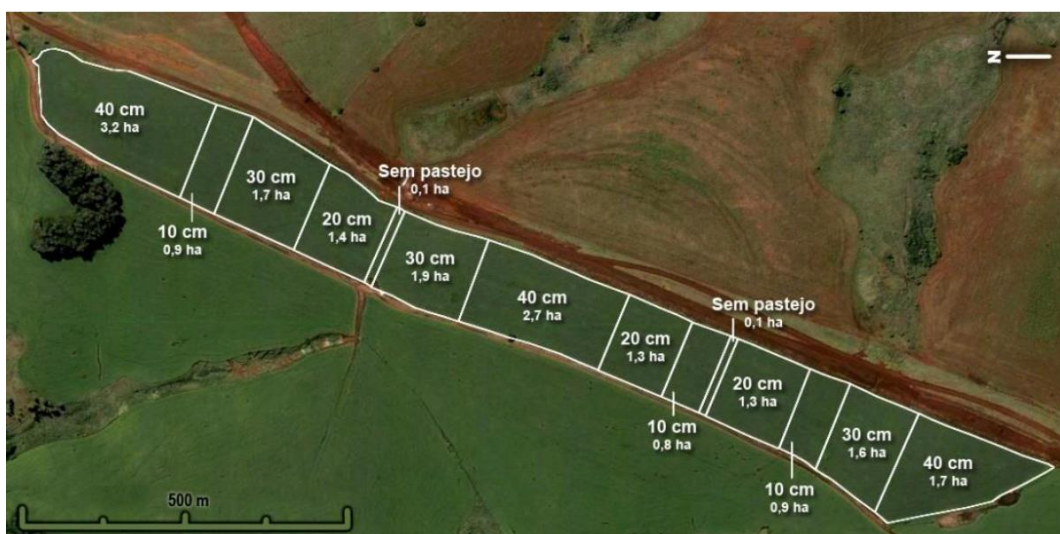
O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (EMBRAPA, 2006) da unidade de mapeamento Santo Ângelo (STRECK et al., 2008), profundo, bem drenado, com coloração vermelho-escura e textura muito argilosa (540, 190 e 270 g kg⁻¹, de argila, silte e areia, respectivamente).

A área vinha sendo cultivada em plantio direto desde 1993, com aveia preta (*Avena strigosa*, Schreb) no outono-inverno e soja (*Glycine max*) na primavera-verão. Em junho de 2001, foi inserido o pastejo de animais pela primeira vez, dando início ao SIPA, com aveia-preta + azevém (*Lolium multiflorum*, Lam.), no período outono-inverno e soja, no período primavera -verão. E esse manejo vem sendo realizado já há 15 anos.

3.2. DELINEAMENTO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

A área total do experimento é de aproximadamente 22 hectares, sendo dividida em 12 parcelas com tamanhos que variam de 0,8 a 3,6 hectares (Figura 1), em função dos tratamentos aplicados. As parcelas são separadas por cerca elétrica de dois fios. Ao longo da área experimental há um corredor lateral para manejar os animais.

Figura 1 - Vista geral da área experimental e distribuição dos tratamentos de altura de pastejo. Fazenda do Espinho, São Miguel das Missões - RS



Fonte: (COSTA 2014).

Os tratamentos do experimento consistem em diferentes intensidades de pastejo, determinados pelo manejo de altura da pastagem, sendo: 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m de altura, dispostos em um delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições. Entre os blocos foram estabelecidas áreas que ficam isoladas do pastejo, que representam, portanto, o sistema com vegetação usada apenas como cobertura, tidas como testemunhas (sem pastejo).

Para o presente estudo, foram avaliados apenas os tratamentos de pastejo intenso (0,10 m de altura da pastagem), pastejo moderado (0,30 m de altura da pastagem) e sem pastejo (área testemunha). A altura da pastagem foi acompanhada a cada 15 dias aproximadamente, pelo método do bastão graduado "sward stick" (BIRCHAM, 1981).

A entrada dos animais na área ocorreu quando a pastagem teve acúmulo médio de 1500 kg ha^{-1} de matéria seca (MS), com aproximadamente 0,25 m, que ocorre normalmente entre os meses de junho e julho. Para o pastejo foram utilizados bovinos jovens, machos castrados, com idade ao redor de dez meses (início do pastejo), oriundos do cruzamento entre as raças Angus, Hereford e Nelore, sem grau de sangue definido e com peso vivo médio inicial de 200 kg.

O método de pastejo adotado foi o contínuo com lotação variável, com três animais permanentes por parcela, e número variável de animais reguladores. Conforme a necessidade de manter as alturas desejadas ao longo da fase de pastagem, retirou-se parte dos animais das parcelas quando a altura real era menor que a pretendida, e vice-versa. De maneira geral, os animais iniciaram o pastejo na primeira quinzena de julho, estendendo-se até a primeira quinzena de novembro, totalizando 120 dias de pastejo em média.

Após a retirada dos animais, a pastagem foi dessecada para que fosse realizada a semeadura da soja, a qual ocorreu no período de novembro a dezembro, e sua colheita ocorreu entre os meses de abril e maio do ano seguinte.

3.3. ANÁLISES REALIZADAS

Para o melhor entendimento das relações do sistema sobre as propriedades do solo, julgou-se adequada a discriminação das análises do solo, em propriedades de capacidade e propriedades de intensidade. De acordo com Horn & Kutilek (2009), as propriedades de capacidade estão relacionadas com a composição de um volume de solo, não considerando a organização interna; portanto, ignora a estrutura e a distribuição de partículas minerais e orgânicas no espaço. Por outro lado, uma propriedade de intensidade considera as propriedades dinâmicas que expressam a organização interna e a funcionalidade do solo, e tem maior variação no tempo e no espaço. Assim, as propriedades de capacidade possuem uma menor sensibilidade ao manejo do que as propriedades de intensidade, as quais dão maior inferência sobre a qualidade estrutural do solo (REICHERT et al., 2016).

As propriedades de capacidade do solo avaliadas foram densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), macroporosidade (M_a) e microporosidade (M_i). Enquanto as propriedades de intensidade foram permeabilidade ao ar (K_a), condutividade hidráulica de solo saturado (K_s), pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (I_c), índice de compressibilidade cíclica (C_n) e coeficiente de descompressão (C_d).

Foram realizadas coletas de amostras de solo com estrutura preservada (anéis volumétricos), ao término de cada ciclo da soja e da pastagem, nos meses de abril e novembro de 2015, respectivamente. Foram coletados três anéis por camada, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m nos tratamentos de pastejo intenso

(0,10 m), moderado (0,30 m) e sem pastejo (testemunha), totalizando 81 amostras destinadas a análise das propriedades de capacidade e 81 destinadas a análise das propriedades de intensidade, para cada época de coleta. Para as análises das propriedades de capacidade e de intensidade que correspondem a fluxos de água e ar, utilizaram-se anéis de 0,057 m de diâmetro e 0,04 m de altura e, para as propriedades de intensidade que dizem respeito à mecânica do solo, utilizaram-se anéis de 0,10 m de diâmetro e 0,03 m de altura.

Após sua coleta, as amostras de solo foram encaminhadas para o laboratório de análises físicas do solo do Centro de Ciências Rurais (CCR) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). No laboratório, as amostras foram preparadas (ajuste do solo ao volume do anel e fixação de pano permeável na base do anel com atilho de borracha), saturadas por elevação capilar e levadas à coluna de areia para aplicação dos potenciais matriciais (Ψ_m) de -6 e -10 kPa (REINERT; REICHERT, 2006).

A retenção de água no Ψ_m de -100 kPa foi determinada em câmaras de Richards (Klute, 1986). Nas amostras destinadas às análises de permeabilidade ao ar foram aplicados os Ψ_m de -6, -10 e -100 kPa e, ao final de cada potencial, foi determinada a massa e realizada a medição do fluxo de ar; posteriormente, equilibradas no Ψ_m subsequente. Ao final do último potencial (-100 kPa), as amostras foram novamente saturadas para a determinação do fluxo de água em solo saturado. Finalmente, as amostras foram levadas a estufa a 105°C por 48h, e determinada a massa para o cálculo da densidade do solo.

Para as análises mecânicas, as amostras foram submetidas apenas ao Ψ_m de -10 kPa e, após atingirem este potencial, foram enroladas em filme plástico, para evitar a perda de umidade e acondicionadas em geladeira, para que todas as amostras estivessem com o mesmo Ψ_m durante os ensaios de compressibilidade. Após os ensaios, as amostras também foram secas em estufa a 105°C por 48h.

3.3.1. Permeabilidade do solo ao ar (K_a)

A K_a (cm²) foi determinada com o auxílio de um permeâmetro de carga constante. O princípio da metodologia foi baseado na quantificação do fluxo de ar que passa pela amostra de solo, mantendo-se um gradiente de pressão constante. A

metodologia e equipamento foram adaptados de Vossbrink (2005). O ar foi aplicado a pressão constante e baixa (0,1 kPa) para evitar o fluxo turbulento.

A condutividade do ar no solo (K_l) foi calculada usando a equação 1:

$$K_l = \rho_l g \frac{\Delta V l}{\Delta t \Delta p A} \quad (1)$$

Em que K_l é condutividade ao ar (cm s^{-1}); ρ_l densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3}), g aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}), ΔV volume de ar que passa na amostra no Δt (cm^3), Δt variação de tempo (s), l altura da amostra (cm), Δp pressão do ar que passa pela amostra (1 cm de coluna de água = $1000 \text{ dinas cm}^{-2}$, dinas g cm s^{-2}), e A área da amostra (cm^2).

A densidade do ar foi calculada com a equação 2:

$$\rho_l = \rho_n \left(\frac{T_n p}{p_n T} \right) \quad (2)$$

Em que ρ_l é a densidade do ar (kg m^{-3}), ρ_n densidade padrão do ar ($1,293 \text{ kg m}^{-3}$), T_n temperatura padrão ($273,15 \text{ K}$), p pressão atmosférica durante a medida (mbar), p_n pressão atmosférica padrão (1013 mbar), e T temperatura do ar durante a medida (K).

A partir da condutividade ao ar foi calculada a permeabilidade do solo ao ar (K_a) utilizando a equação 3.

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad (3)$$

Em que K_a é a permeabilidade ao ar (cm^2), 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}), e g aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}).

3.3.2. Condutividade hidráulica de solo saturado (K_s)

A determinação da K_s (mm h^{-1}) foi realizada com base no fluxo medido em um permeâmetro de carga decrescente, em que as amostras saturadas são submetidas a cargas hidráulicas decrescentes. Esse procedimento consiste em medir o tempo gasto para a passagem pela amostra de solo de um determinado volume de água, contido em um tubo graduado, enquanto a carga hidráulica considerada é a altura da água no ponto 1 (H_1) e ponto 2 (H_2) do tubo.

Para determinação da condutividade saturada foi utilizada a equação 4:

$$K_s = \frac{(2,3).a.L}{A.(t_2 - t_1).(H_1 + H_2)} \quad (4)$$

Em que K_s (mm h^{-1}) é a condutividade hidráulica saturada, a (mm^2) área do tubo, L altura da amostra (mm), A área da amostra (mm^2), e t_1 e t_2 o tempo (h) que a água passa pela altura H_1 e H_2 (mm), que são as respectivas cargas hidráulicas.

3.3.3. Densidade do solo (D_s)

Para a determinação da D_s (g cm^{-3}), as amostras de solo foram secas em estufa a 105°C por 48 horas, e após determinação da massa do solo seco. Conhecendo-se o volume do anel, calculou-se a D_s por meio da equação 5:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (5)$$

Em que M_s é a massa de solo seco (g) e V volume da amostra de solo (cm^3).

3.3.4. Porosidade total (P_t)

A P_t ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi obtida pela relação entre a fração do volume de solo ocupada por sólidos. Sabendo-se que a P_t é definida como a fração do volume do solo que não é ocupada por sólidos, tem-se a equação 6:

$$P_t = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (6)$$

Em que D_s (g cm^{-3}) é a densidade do solo e D_p (g cm^{-3}) é a densidade de partículas determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

3.3.5. Microporosidade (M_i)

A M_i ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi determinada como sendo o conteúdo volumétrico de água no ψ_m de -6 kPa .

3.3.6. Macroporosidade (M_a)

A M_a ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi calculada pela diferença entre P_t e M_i .

3.3.7. Pressão de preconsolidação (σ_p), Índice de compressão (I_c) e compressibilidade cíclica

Para a determinação da σ_p , I_c e compressibilidade cíclica, foi utilizada uma prensa de compressão automática equipada com pistão pneumático (Multistep – Soil

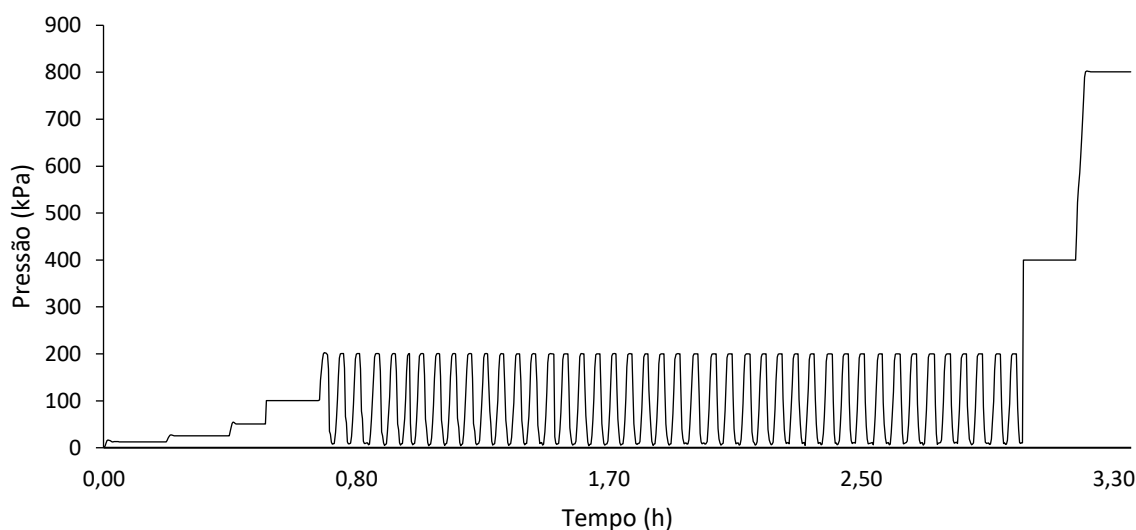
Shear Strength, marca Wazau). Durante os ensaios com as amostras confinadas, a drenagem livre de água foi assegurada por placas porosas colocadas abaixo e acima da amostra. As amostras foram submetidas à compressão uniaxial nas pressões de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.

O teste foi realizado em três etapas: (a) as pressões de 12,5 a 100 kPa seguiram o padrão normal de carregamento estático, permanecendo 0,17 h ($\cong 10$ min) em cada carga de forma a promover a máxima deformação da amostra para cada pressão aplicada; (b) na pressão de 200 kPa na tentativa de simular o pisoteio animal, o qual se situa no intervalo de 130 a 250 kPa (SCHOLEFIELD & HALL 1986), foram realizados cinquenta ciclos de carregamento dinâmico com carga de descompressão de 10 kPa, com duração de 0,01h de carregamento e 0,01h de descarregamento para cada ciclo, contados a partir do momento em que as cargas desejadas são alcançadas, 200 e 10 kPa respectivamente ; (c) após o carregamento dinâmico, as amostras foram submetidas às pressões de 400 e 800 kPa, durante 0,17 h em cada carga, para se obter a curva de compressão para cada amostra. Na figura 2 é possível observar como que se deram as três etapas da compressão das amostras de solo.

Durante os ensaios foram armazenados automaticamente os dados de pressão normal aplicada (carga) e deformação do solo em função do tempo, bem como os de ψ_m na amostra, monitorada por meio de um microtenciometro localizado na parte inferior da mesma. Ao término do ensaio de compressibilidade as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 horas para obtenção da massa do solo seco.

A σ_p e o I_c foram determinados graficamente segundo o método de Casagrande (1936) a partir de um suplemento Excel desenvolvido pelo professor pesquisador Paulo Ivonir Gubiani, disponível em: <http://gubianisolos.blogspot.com.br/2015/01/suplemento-excel-para-modelar-curva-de.html> (GUBIANI et al., 2014). As pressões utilizadas para o cálculo dos parâmetros da curva de compressão do solo, foram 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, sendo que a deformação usada na pressão de 200 kPa foi a referente a último ciclo de carregamento dinâmico.

Figura 2 - Relação entre a pressão aplicada na amostra com o tempo de teste no de ensaio de compressão das amostras de solo.



Fonte: Autor

3.3.8. Conteúdo volumétrico de água (θ) (Ψ_m -10 kPa)

Nas amostras de solo que foram determinados os parâmetros mecânicos do solo, foi determinado o conteúdo volumétrico de água no momento do início do teste. O conteúdo volumétrico de água (θ) em ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) é a relação entre o volume de água numa amostra do solo, e o volume total da amostra: Conforme a equação 7.

$$\theta = \frac{V_a}{V} \quad (7)$$

Em que V_a é o volume de água na amostra (cm^3) e V é o volume da amostra de solo (cm^3).

3.3.9. Elasticidade do solo (Cd)

Com a avaliação da compressibilidade cíclica foi possível calcular a elasticidade do solo ao passar dos ciclos de carga e descarga, por meio da relação entre a deformação que o solo sofre no momento da aplicação da carga e a recuperação que o mesmo tem após o descarregamento. A elasticidade foi expressa pelo coeficiente de descompressão (Cd), que corresponde à declividade da reta de descarregamento/rearregamento. Para cada ciclo de compressão/descompressão

foi gerado um valor de C_d e a média desses valores foi utilizada para o teste de comparação.

3.3.10. Índice de compressibilidade cíclica (C_n)

Ao passar dos ciclos de carregamento e descarregamento o solo vai se deformando e diminuindo o seu índice de vazios (I_v). Dessa forma, ao avaliarmos graficamente a variação do I_v final de cada ciclo, em função do logaritmo do número de ciclos aos quais o solo foi submetido, tem-se a reta que descreve a compressão cíclica do solo, da qual se extrai o C_n que nada mais é que a declividade dessa reta, parâmetro que indica a susceptibilidade do solo à deformação ao passar dos ciclos.

4. TESTES ESTATÍSTICOS

Inicialmente, os dados obtidos foram submetidos à análise de distribuição normal (Shapiro Wilk) e análise de homogeneidade de variância (Bartlett Test).

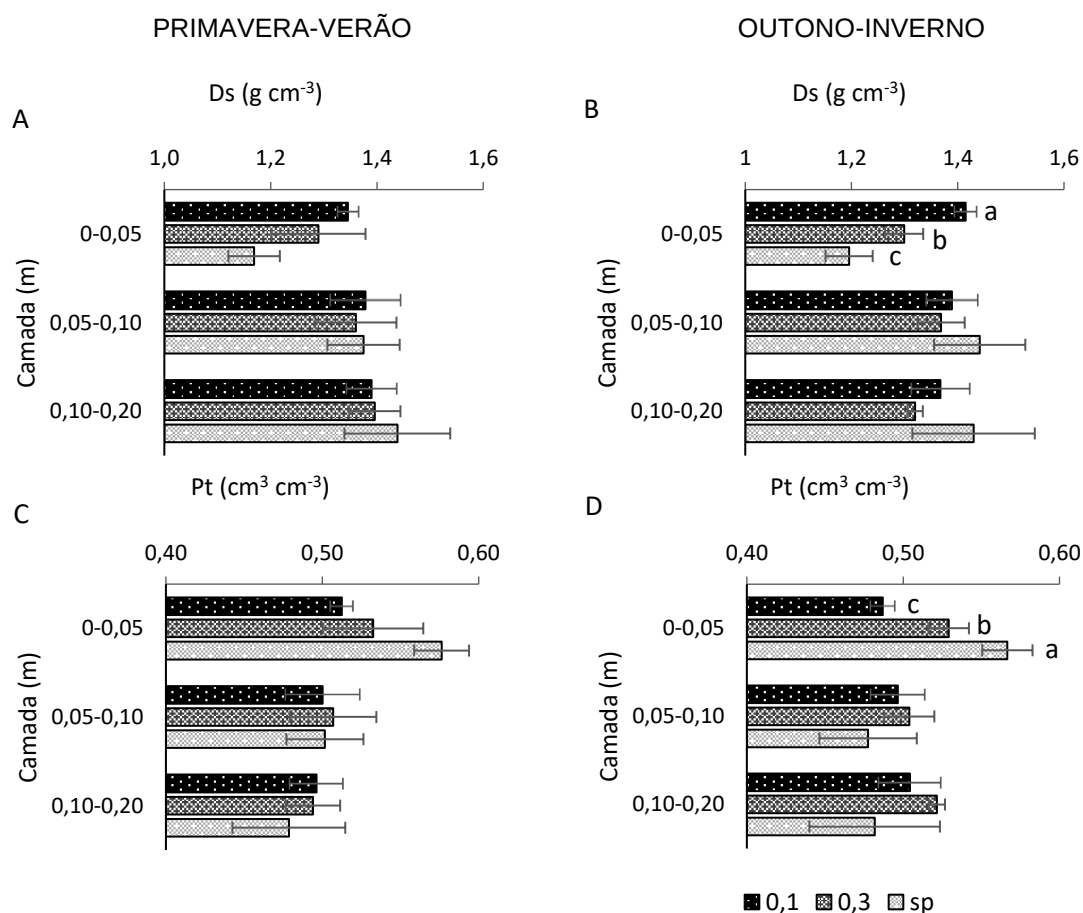
O efeito das diferentes pressões de pastejo sobre as propriedades de capacidade e intensidade solo foi avaliado por meio da análise de variância e, quando o teste F foi significativo, realizou-se a comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, utilizando o ambiente estatístico R. Foi realizada a média das três sub-amostras de cada repetição e as camadas do solo foram avaliadas separadamente como tratamentos. Nos casos em que a homogeneidade de variâncias e normalidade não foram atendidas, os dados foram transformados e utilizando o logaritmo dos valores observados para realização dos testes estatísticos, todavia os dados apresentados neste trabalho correspondem aos valores não transformados. Os conjuntos de dados em que se fez necessária a transformação foram os correspondentes aos fluxos de água e ar devido à sua alta variabilidade.

5. RESULTADOS

5.1. PROPRIEDADES DE CAPACIDADE

Para as propriedades de capacidade do solo Ds e Pt no período primavera-verão, não foi observado efeito significativo dos diferentes tratamentos de pastejo e em nenhuma das camadas de solo amostradas (Figuras 3A e 3C)

Figura 3 - Valores de densidade do solo (g cm^{-3}) e porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para os períodos primavera-verão e outono-inverno.



Densidade do solo (g cm^{-3}) para o período primavera-verão (A) e outono-inverno (B) e porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para o período primavera-verão (C) e outono-inverno (D), para as diferentes camadas do solo, nos diferentes níveis de pastejo, 0,10 m (preto), 0,30 m (cinza escuro), sem pastejo (cinza claro).

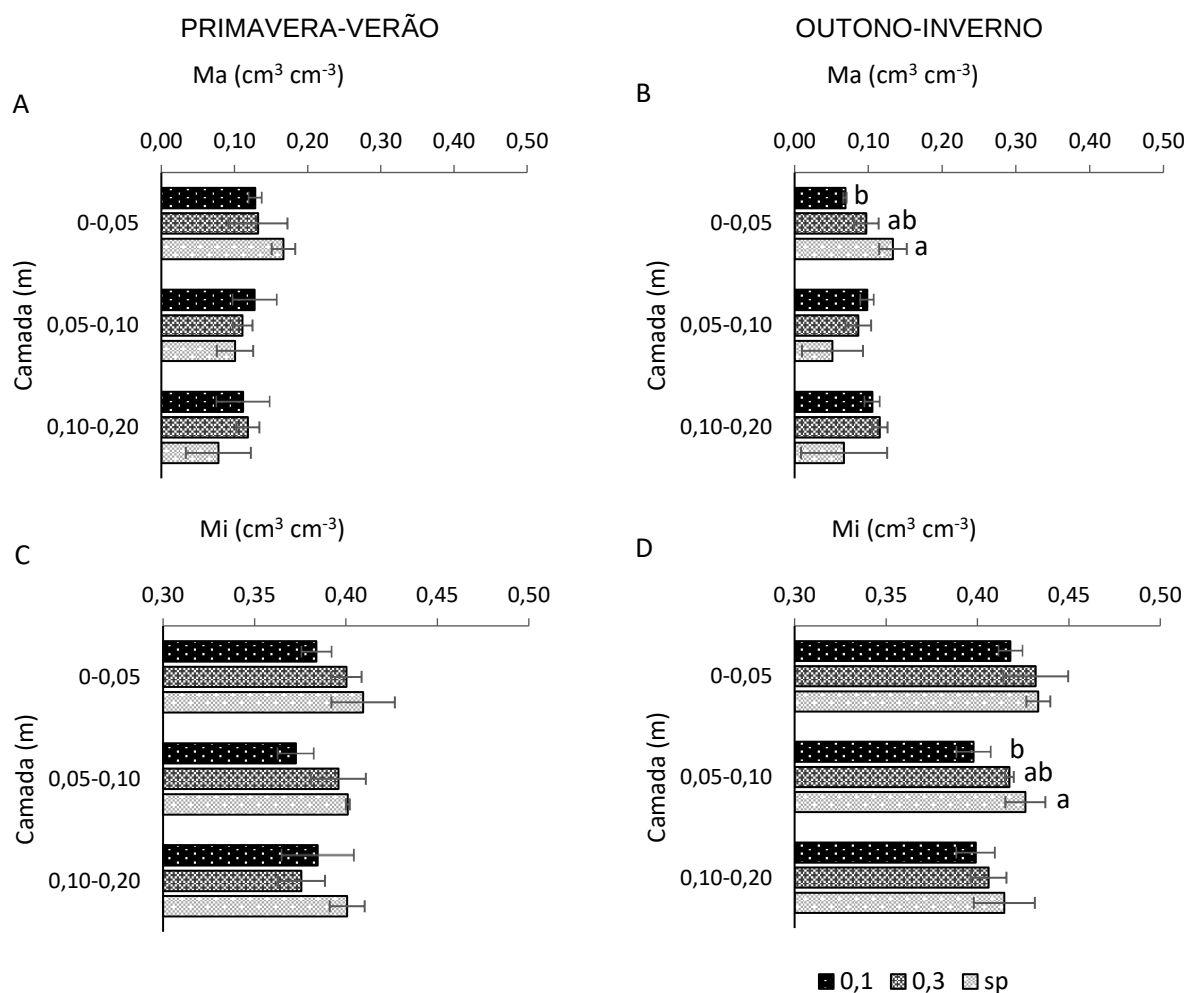
Letras minúsculas representam diferença estatística em teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; as barras de erros correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Autor.

Na avaliação das propriedades de capacidade do solo no período outono-inverno, foram observadas algumas diferenças estatísticas entre os tratamentos. Todos os tratamentos diferiram na D_s , porém apenas na camada superior do solo (0-0,05 m), onde o pastejo intenso (0,10 m) teve o maior valor de D_s , seguido do pastejo moderado e, após, pelo sem pastejo (0,30 m e sp) (Figura 3 B). Assim como a D_s , para a P_t houve efeito do pastejo apenas na camada superior, com diminuição desta com o aumento da intensidade de pastejo, i.e., o tratamento sem pastejo apresentou o maior valor, seguido dos tratamentos de pastejo moderado e intenso (0,30 e 0,10 m, respectivamente) (Figura 3 D).

A M_a e M_i , no período primavera-verão, foram similares entre os tratamentos em todas as profundidades avaliadas (Figura 4 A e 4 C). No período pós-pastejo, houve diferença para a M_a apenas na camada superficial do solo, sendo o maior valor no tratamento sem pastejo, enquanto o menor valor corresponde ao pastejo intenso; enquanto o pastejo moderado não diferiu dos demais tratamentos (Figura 4 B). Na M_i a diferença ocorreu apenas na camada de (0,05-0,10 m), onde o pastejo intenso apresentou o menor valor, o maior no sem pastejo enquanto o pastejo moderado não diferiu dos demais tratamentos (Figura 4 D).

Figura 4 - Valores de macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e de microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para os períodos primavera-verão e outono-inverno.



Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para o período primavera-verão (A) e outono-inverno (B) e de microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para o período primavera-verão (C) e outono-inverno (D); para as diferentes camadas do solo, nos diferentes níveis de pastejo, 0,10 m (preto), 0,30 m (cinza escuro), sem pastejo (cinza claro).

Letras minúsculas representam diferença estatística em teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; as barras de erros correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Autor.

5.2. PROPRIEDADES DE INTENSIDADE

5.2.1. Propriedades mecânicas

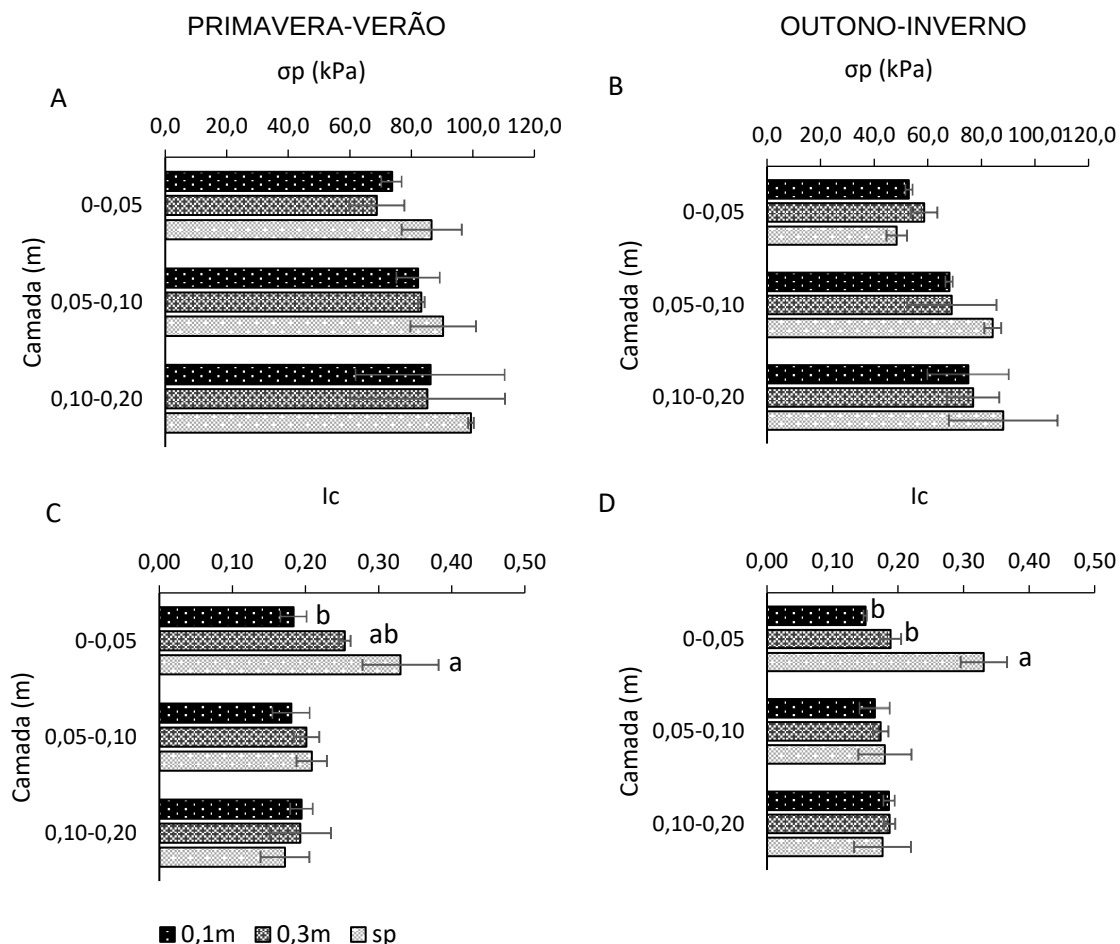
A σ_p do solo foi similar nos distintos tratamentos de pastejo em todas as camadas avaliadas para ambas as épocas de amostragem (Figura 5 A).

No período primavera-verão, houve diferença significativa entre os tratamentos para o I_c apenas na camada superficial do solo, onde a maior intensidade de pastejo acarretou no menor valor de I_c , o sem pastejo apresentou ao maior valor e o pastejo moderado não diferiu dos demais (Figura 5 C). No período outono-inverno não foi observado efeito do pastejo para a propriedade σ_p (Figura 5 B). Para o I_c , houve diferença entre os tratamentos, apenas na camada superficial do solo, onde o maior valor ocorreu no tratamento sem pastejo, enquanto os demais níveis de intensidade de pastejo não diferiram entre si (Figura 5 D).

O C_d foi diferente entre os tratamentos nas duas primeiras camadas do solo (0-0,05 e 0,05-0,10 m) no período outono-inverno. Na camada superficial do solo, os dois níveis de pastejo (0,10 e 0,30 m) apresentaram redução do C_d , sendo considerados estatisticamente iguais entre si, e maior valor de C_d corresponde ao tratamento sem pastejo. Na camada intermediária também houve redução de C_d com o pisoteio animal, com o menor valor de C_d no tratamento com pastejo intenso e o maior valor na testemunha sem pastejo; o tratamento pastejo moderado (0,30 m) não diferiu dos demais (Figura 6 B).

O C_n diferiu significativamente entre os tratamentos apenas na camada superficial do solo, e somente para o período primavera-verão. O menor valor correspondeu ao tratamento pastejo intenso que diferiu das demais alturas de pastejo, e essas não diferiram entre si sendo consideradas estatisticamente iguais (Figura 6 C)

Figura 5 - Valores médios de pressão de preconsolidação (kPa) e índice de compressão para os períodos primavera-verão e outono-inverno.

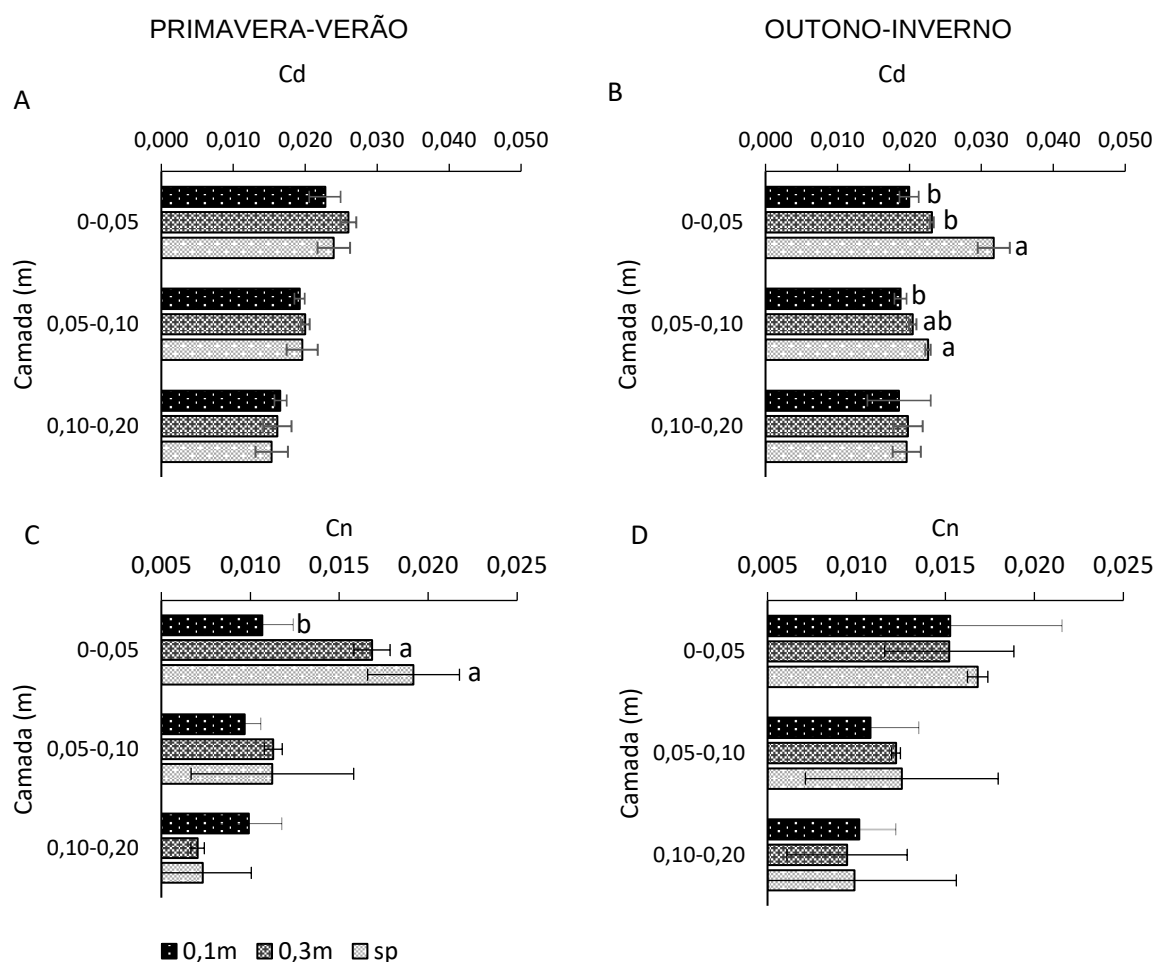


Pressão de preconsolidação (kPa) para o período primavera-verão (A) e outono-inverno (B) e índice de compressão para o período primavera-verão (C) e outono-inverno (D) para as diferentes camadas do solo e níveis de pastejo, 0,10 m (preto), 0,30 m (cinza escuro), sem pastejo (cinza claro).

Letras minúsculas representam diferença estatística em teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; as barras de erros mostram o desvio padrão.

Fonte: Autor.

Figura 6 - Coeficiente de descompressão e índice de compressibilidade cíclica, para os períodos primavera-verão e outono-inverno.



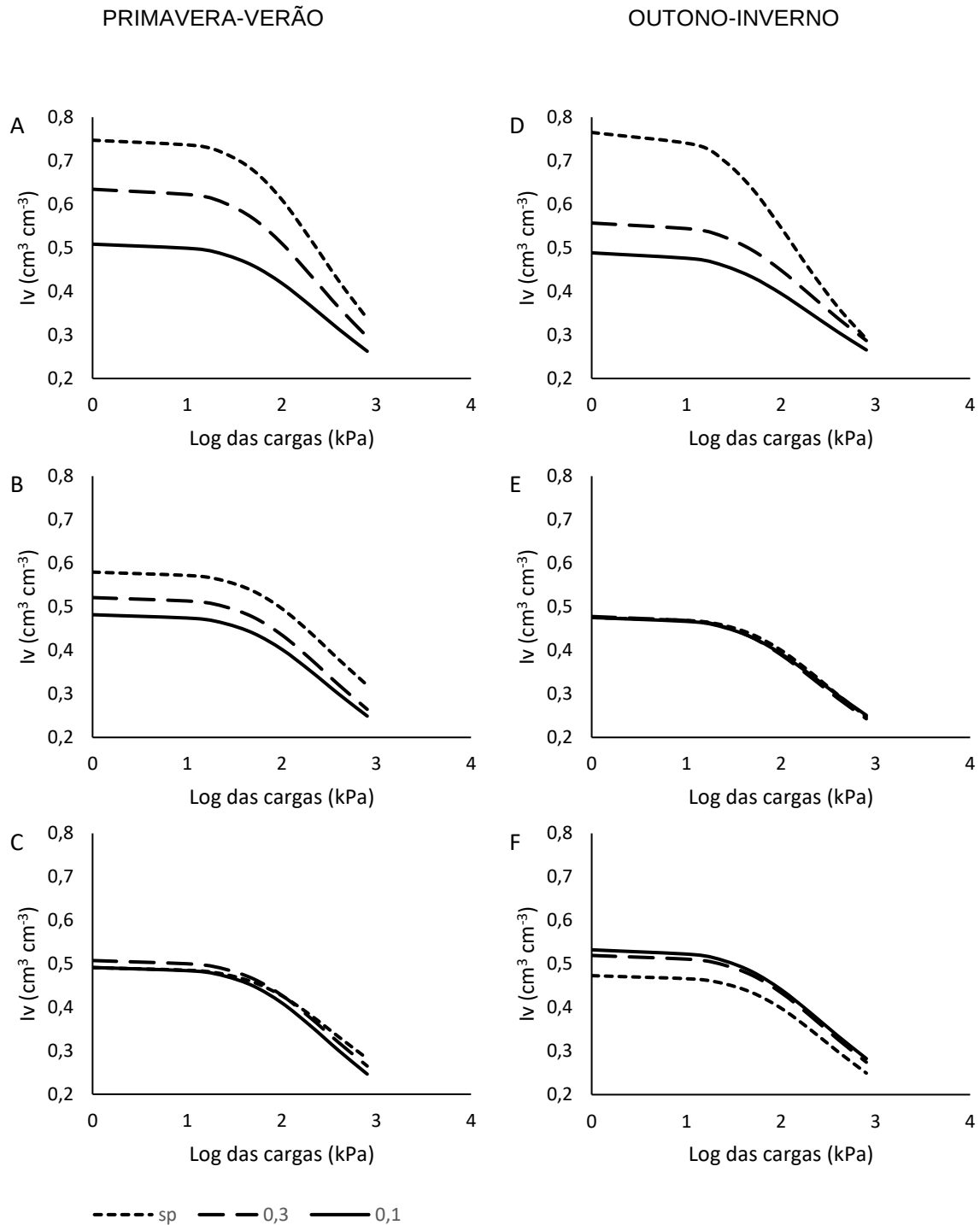
Coeficiente de descompressão em aproximadamente 50 ciclos de carga/descarga, para o período primavera-verão (A) e outono-inverno (B) e índice de compressibilidade cíclica, para o período primavera-verão (C) e outono-inverno (D) para as diferentes camadas do solo e níveis de pastejo, 0,10 m (preto), 0,30 m (cinza escuro), sem pastejo (cinza claro).

Letras minúsculas representam diferença estatística em teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; as barras de erros mostram o desvio padrão.

Fonte: Autor.

Para todos os tratamentos e nas três camadas, as curvas de compressão do solo (Figura 7) para as coletas primavera-verão e outono-inverno não diferiram significativamente quanto à pressão de preconsolidação.

Figura 7 - Curvas de compressão do solo para os períodos primavera-verão e outono-inverno.



Curvas de compressão determinada a partir do índice de vazios (I_v) em função do log das cargas (kPa), para o período primavera-verão nas camadas de A 0-0,05 m, B 0,05-0,10 m e C 0,10-0,20 m e para o período outono-inverno as camadas de D 0-0,05 m, E 0,05-0,10 m e F 0,10-0,20 m; para os diferentes níveis de pastejo: Sem pastejo, 0,30 m e 0,10 m.

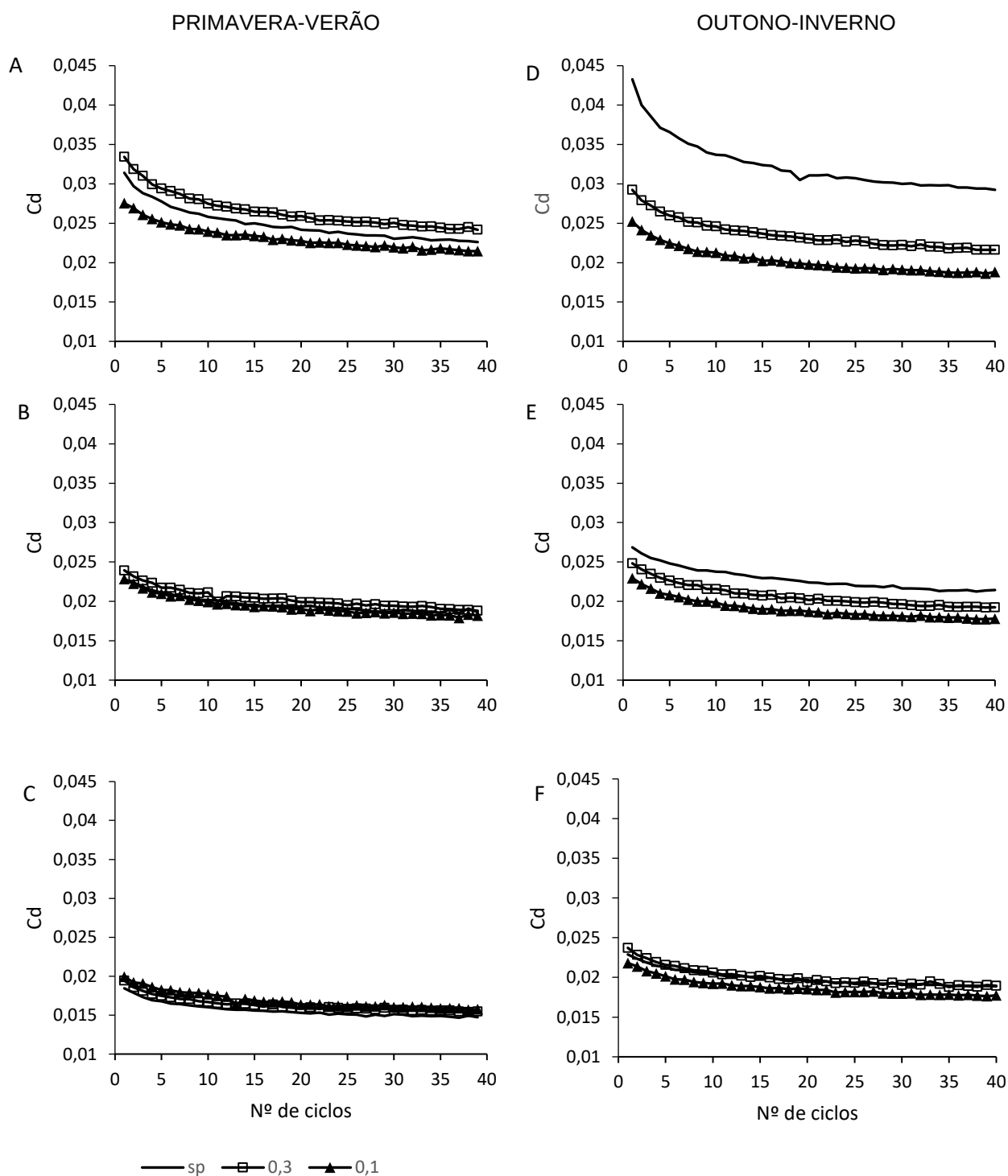
Fonte: Autor.

Porém, na camada superficial as curvas diferem quanto ao ψ_m inicial, onde o tratamento sem pastejo possui o valor mais alto, seguido do pastejo moderado e intenso. A declividade da reta de compressão virgem foi maior no tratamento sem pastejo em relação aos tratamentos pastejados (Figura 7 A e 7 D).

A elasticidade do solo ao passar dos ciclos de carregamento/descarregamento para ambas as épocas de coleta pode ser observada na (Figura 8). Nos primeiros ciclos houve uma redução acentuada do Cd e, posteriormente, o mesmo seguiu reduzindo a taxas inferiores ao início do ensaio. Na camada superficial, no período outono-inverno, o tratamento sem pastejo possuiu um Cd maior em relação aos tratamentos pastejados. Contudo, a redução após os primeiros ciclos foi maior no tratamento sem pastejo. Nas demais camadas do solo para o mesmo período e todas as camadas no período primavera-verão, as curvas mantiveram-se semelhantes quanto aos valores e comportamento.

A variação do ψ_m no solo durante os ciclos de carregamento/descarregamento, para as épocas de coleta, pode ser observada na (Figura 9). O ψ_m aumentou após os primeiros ciclos e, posteriormente, passou a reduzir gradativamente, mas não no tratamento sem pastejo na camada de 0,10-0,20 m. De maneira geral, o ψ_m diminuiu da superfície às camadas mais profundas. As curvas para o período primavera-verão tiveram comportamento e valores semelhantes para cada camada. No período outono-inverno, os valores de ψ_m foram maiores em relação ao período primavera-verão, com destaque para o tratamento pastejo intenso com os maiores valores de ψ_m , seguido do pastejo moderado e sem pastejo.

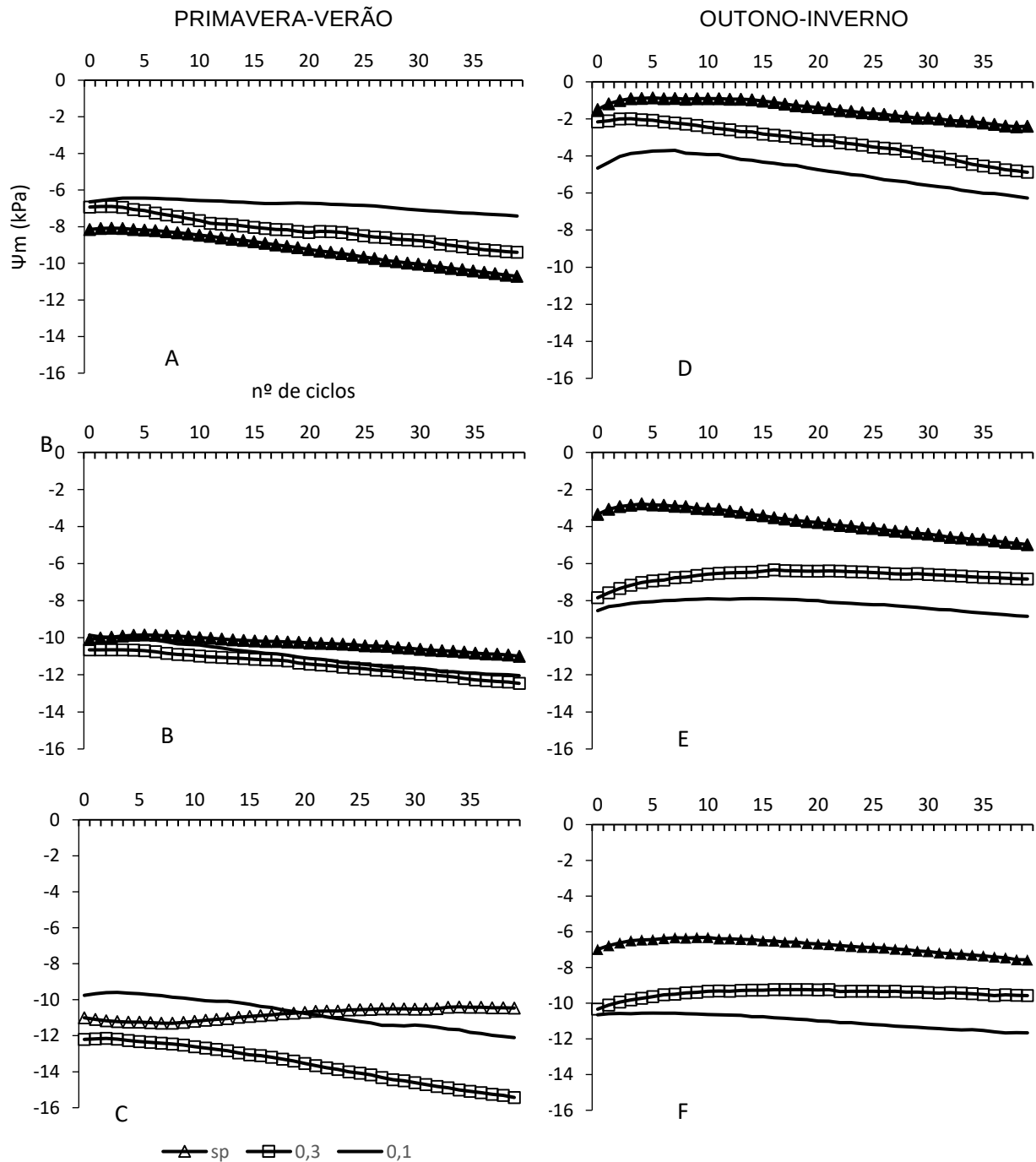
Figura 8 - Variação do coeficiente de descompressão (C_d) em função dos ciclos de carregamento/descarregamento, para os períodos primavera-verão e outono-inverno.



Variação do coeficiente de descompressão (C_d) em função dos ciclos de carregamento/descarregamento, para o período primavera-verão nas camadas de A 0-0,05 m, B 0,05-0,10 m e C 0,10-0,20 m e para o período outono-inverno as camadas de D 0-0,05 m, E 0,05-0,10 m e F 0,10-0,20 m, para os diferentes níveis de pastejo: sem pastejo, 0,30 m e 0,10 m.

Fonte: Autor.

Figura 9 - Variação do potencial matricial (Ψ_m) em função dos ciclos de carregamento/descarregamento, para os períodos primavera-verão e outono-inverno as camadas



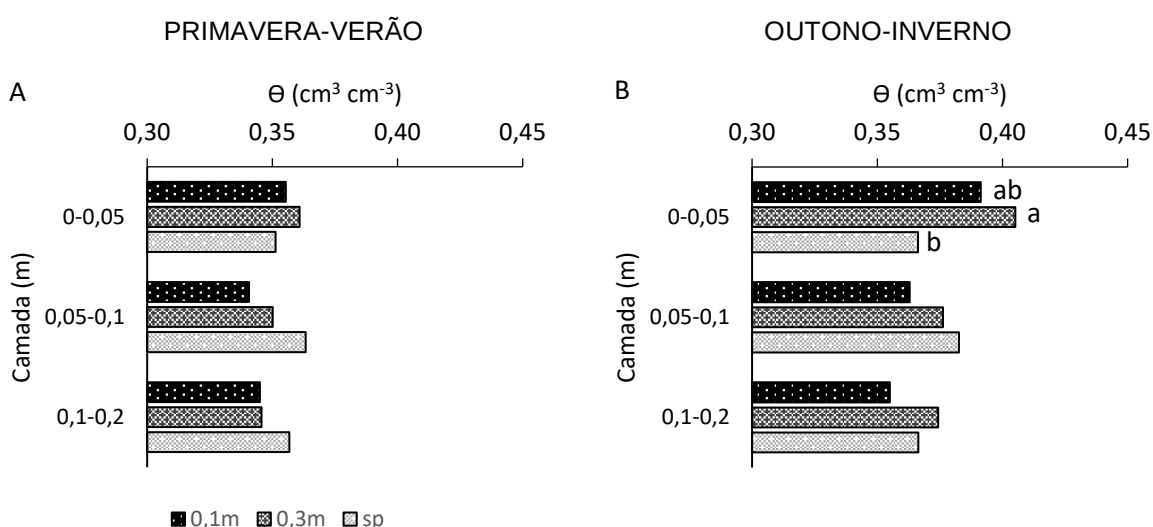
Variação do potencial matricial (Ψ_m) de água (kPa) no centro das amostras, em função dos ciclos de carregamento/descarregamento, para o período primavera-verão nas camadas de A 0-0,05 m, B 0,05-0,10 m e C 0,10-0,20 m e para o período outono-inverno as camadas de D 0-0,05 m, E 0,05-0,10 m e F 0,10-0,20 m; para os diferentes níveis de pastejo: Sem pastejo, 0,30 m e 0,10 m.

Fonte: Autor.

O conteúdo volumétrico de água do solo (θ) das amostras equilibradas a ψ_m de -10 kPa destinadas ao ensaio de compressibilidade, para os diferentes tratamentos e profundidades, é apresentada na (Figura 10). No período primavera-verão, os valores foram iguais para todos os tratamentos e profundidades (Figura 10 A). Para as amostras coletadas no outono-inverno, houve diferença significativa apenas na camada superficial do solo, onde o tratamento pastejo moderado possui o maior valor de θ diferindo do tratamento sem pastejo, e o tratamento pastejo intenso não diferiu dos demais. Para as demais camadas não houve diferença entre os tratamentos (Figura 10 B).

Os valores de θ tem um ligeiro aumento de uma estação para outra, ou seja, as amostras coletadas o outono-inverno tem maior θ que as coletadas no período primavera-verão (Figura 10 A B).

Figura 10 – Conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para os períodos primavera-verão e outono-inverno.



Valores médios de conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) das amostras submetidas a ψ_m de -10 kPa, para o período primavera-verão (A) e outono-inverno (B), para as diferentes camadas do solo, nos diferentes níveis de pastejo, 0,10 m (preto), 0,30 m (cinza escuro), sem pastejo (cinza claro). Letras minúsculas representam diferença estatística em teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

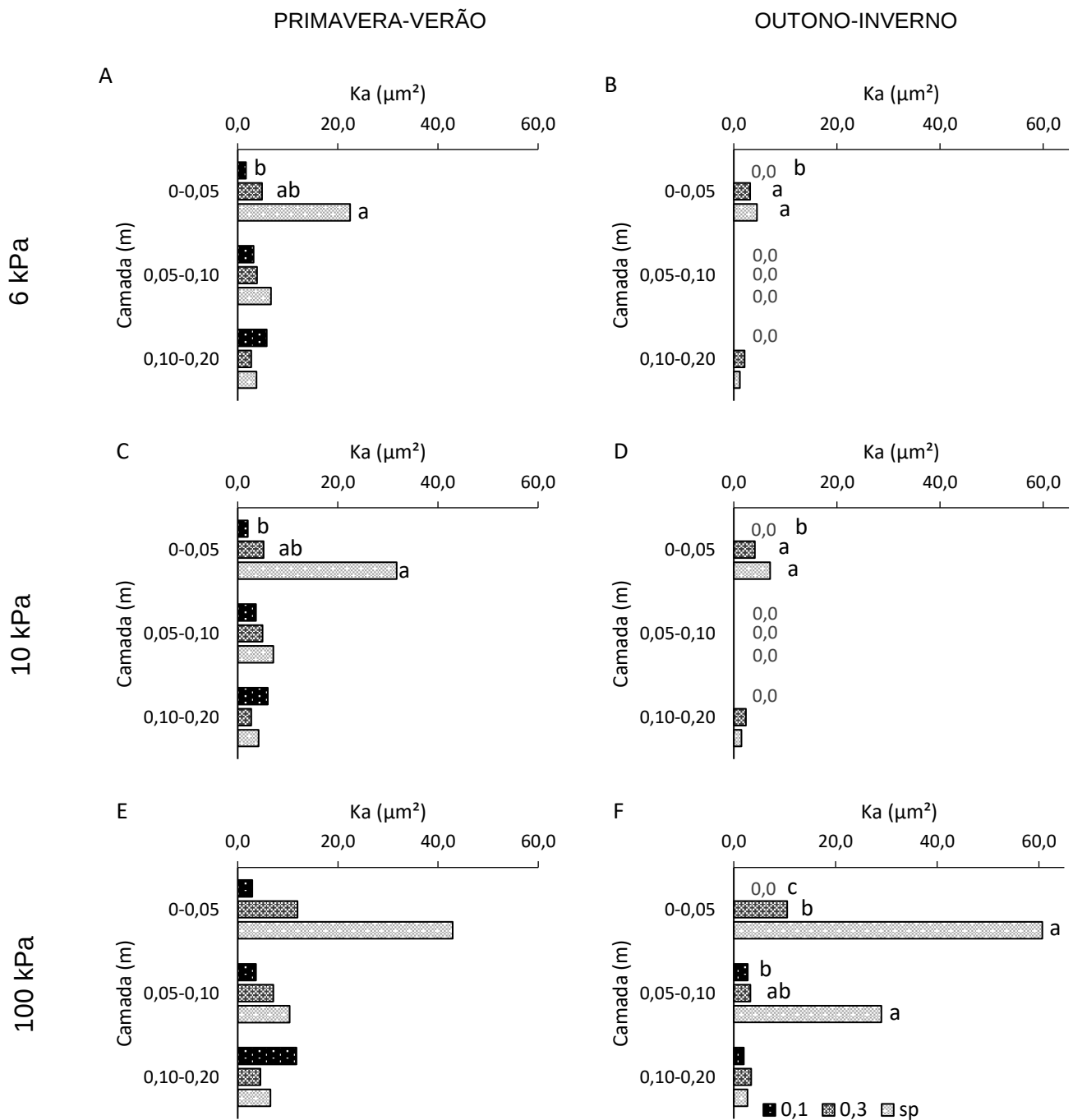
5.2.2. Propriedades de fluxo

A permeabilidade ao ar (K_a), no período primavera-verão, foi distinta entre os tratamentos de diferentes níveis de pressão de pastejo, em solo com -6 kPa (Figura 11 A) e -10 kPa de ψ_m (Figura 11 C). A K_a foi reduzida pelo pastejo, onde os tratamentos sem pastejo tiveram valores mais altos que o pastejo intenso (0,10 m), e o pastejo moderado (0,30 m) não diferiu dos demais. Para as amostras equilibradas a -100 kPa não houve diferença dos tratamentos em nenhuma camada (Figura 11 E).

No período pós pastejo, houve diferença da K_a em solo com ψ_m de -6 kPa (Figura 11 B) e de -10 kPa (Figura 11 D) na camada de 0-0,05 m. A K_a do tratamento pastejo moderado e sem pastejo foi estatisticamente igual, mas estes diferiram do pastejo intenso com valor nulo para ambas tensões de água. Na camada de 0,05-0,10 m para estas tensões, todos os tratamentos tiveram valores de K_a igual a zero. O mesmo correu para o tratamento pastejo intenso na camada de 0,10-0,20 m.

E solo com ψ_m -100 kPa, houve diferença para os tratamentos nas duas primeiras camadas avaliadas. Na camada superficial o maior valor corresponde ao tratamento sem pastejo, seguido do pastejo moderado e do pastejo intenso. Este último, assim como nas demais tensões, teve valor nulo. O efeito do pastejo para a subsuperfície foi expresso pelo menor valor de K_a para o pastejo intenso e o maior valor corresponde ao tratamento sem pastejo, enquanto o pastejo moderado não diferiu dos demais tratamentos (Figura 11 F).

Figura 11 - Permeabilidade do solo ao ar (μm^2) em amostras equilibradas a -6, -10, -100 kPa para os períodos primavera-verão e outono-inverno.



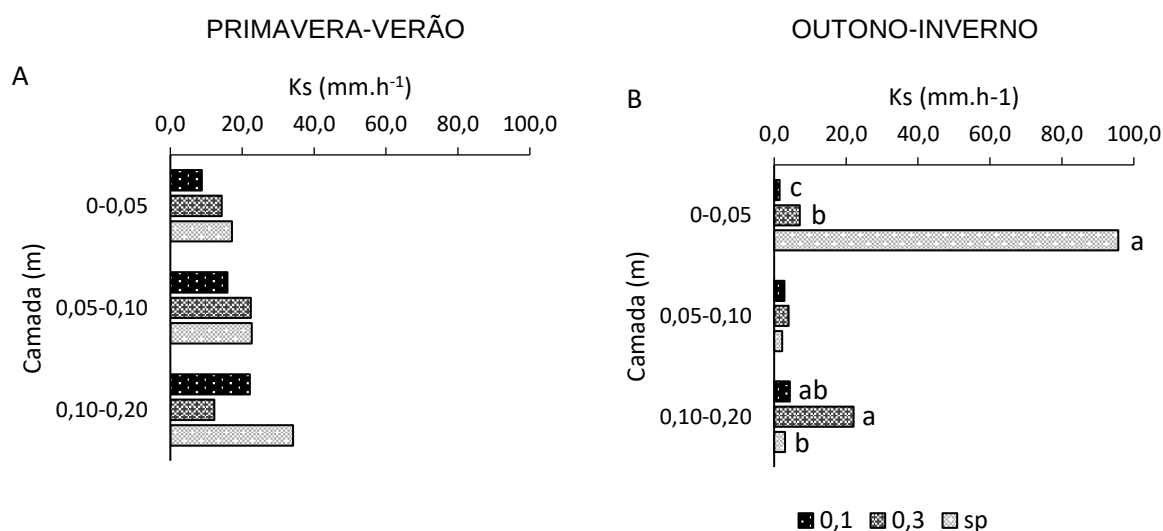
Valores médios de permeabilidade do solo ao ar (μm^2) em amostras equilibradas a -6 kPa para o período primavera-verão (A) e outono-inverno (B); amostras equilibradas a -10 kPa para o período primavera-verão (C) e outono-inverno (D); amostras equilibradas a -100 kPa para o período primavera-verão (E) e outono-inverno (F); para as diferentes camadas do solo, nos diferentes níveis de pastejo, 0,10 m (preto), 0,30 m (cinza escuro), sem pastejo (cinza claro).

Letras minúsculas representam diferença estatística entre tratamentos em teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor.

A condutividade hidráulica de solo saturado (K_s) não foi afetada pelo pastejo no período primavera-verão, não havendo diferença significativa para nenhum dos tratamentos em nenhuma das camadas do solo avaliadas (Figura 12 A). No período outono-inverno houve diferença na K_s para os tratamentos na camada superficial (0-0,05 m) e na camada mais profunda avaliada (0,10-0,20 m). O aumento da intensidade do pastejo diminuiu a K_s na primeira camada. A ordem decrescente dos valores corresponde aos tratamentos sem pastejo, pastejo moderado e pastejo intenso, enquanto na camada mais profunda o maior valor de K_s corresponde ao pastejo moderado e o menor o tratamento sem pastejo enquanto o pastejo intenso não diferiu dos demais tratamentos (Figura 12 B).

Figura 12 - Condutividade hidráulica de solo saturado (mm h^{-1}) para o período primavera-verão e outono-inverno.



Valores médios de condutividade hidráulica de solo saturado (mm h^{-1}) para o período primavera-verão (A) e outono-inverno (B); para as diferentes camadas do solo e níveis de pastejo, 0,10 m (preto), 0,30 m (cinza escuro), sem pastejo (cinza claro).

Letras minúsculas representam diferença estatística entre tratamentos em teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro

Fonte: Autor.

6. DISCUSSÃO

6.1. PROPRIEDADES DE CAPACIDADE

No período pós-pastejo, as propriedades de capacidade do solo indicam que houve efeitos negativos do pastejo com alta lotação, com aumento da compactação gerado pelo pisoteio. A pressão dos cascos dos animais resulta no aumento da densidade do solo, reduzindo o espaço poroso, sobretudo a macroporosidade (MOREIRA et al., 2014). Todavia, esses efeitos negativos tornam-se pronunciados apenas nas camadas mais superficiais do solo, onde geralmente se concentram as maiores alterações das propriedades físicas do solo em sistemas integrados de produção agropecuária (BELL et al., 2011). Evidencia-se, portanto, a baixa capacidade que o pisoteio animal tem de transmitir, em profundidade, as cargas aplicadas em superfície nesse tipo de sistema, o que possivelmente seja reflexo do menor diâmetro e largura do casco dos animais se comparados com o rodado de uma máquina, o que confere menor capacidade de transmissão das cargas em profundidade, para uma mesma pressão quanto menor a área de contato, menor a transmissão das cargas em profundidade (LAMANDE & SCHJØNNING, 2011). Além disso, a cobertura vegetal e da biomassa de raízes que formam um bloqueio que amortece o impacto do casco dos animais, restringindo as alterações à superfície (FRANZLUEBBERS & STUEDEMANN, 2008).

Contudo, na avaliação das mesmas propriedades do solo para o período primavera-verão, não se nota nenhum tipo de alteração nas mesmas. Esse resultado indica que o efeito negativo nas propriedades de capacidade do solo em sistemas integrados é de baixa persistência, ou seja, as alterações nas propriedades físicas do solo não se mantêm de um ciclo para o outro (FERNÁNDEZ et al., 2015; VEIGA et al., 2016).

O solo tende a se regenerar rapidamente, tornando a um estado anterior onde não há efeito danoso dos níveis de lotação animal, com uma regeneração natural (DREWRY, 2006). Nesse sentido, ao avaliar a evolução das propriedades físicas do solo em SIPA ao longo de vários anos, Conte et al. (2011b) demonstram que não há efeito negativo do pastejo para essas variáveis, demonstrando que o solo nesse sistema é capaz de se regenerar.

A regeneração do sistema solo depende de uma série de fatores, entre os principais destacam-se o tipo de solo, os fatores antrópicos (manejo) e biológicos do solo. Para solos argilosos, como há um maior contato entre as partículas minerais e orgânicas, tem-se uma maior comunicação e dissipação de energia no sistema e, assim, maior capacidade auto regulatória (VEZZANI & MIELNICZUK 2011). Além disso, maiores conteúdos de argila aumentam a sensibilidade aos ciclos de umedecimento e secagem e a capacidade do solo de elevar os estoques de carbono orgânico (TABOADA et al., 2004).

Um sistema integrado bem manejado proporciona uma adequada interação entre os elementos que o compõe, estimulando o sistema como um todo, pois o pastejo estimula o desenvolvimento radicular das plantas com a indução de novos perfilhos (ANGHINONI et al., 2013). Esses estímulos aumentam a capacidade de regeneração do solo, tanto pela ação mecânica das raízes quanto pelo estímulo que elas proporcionam aos organismos da rizosfera e a dinâmica da decomposição de resíduos, estabelecendo uma relação estreita entre os fatores biológicos e antrópicos.

Dessa forma, o observado nas propriedades de capacidade para este estudo corrobora com os estudos já realizados nos SIPA's no sul do Brasil. Os efeitos negativos do pisoteio do gado são observados apenas nos meses finais do ciclo de pastejo, que corresponde ao momento da máxima interação solo-planta-animal e somente na superfície do solo. A regeneração dessas propriedades ocorre de forma rápida, fazendo com que o sistema retorne a um nível baixo de perturbação, denotando a grande autonomia que um sistema de integração possui, onde a entrada dos animais na entressafra não prejudica o solo para cultivo de verão.

6.2. PROPRIEDADES DE INTENSIDADE

6.2.1. Propriedades mecânicas

As propriedades de intensidade estão ligadas ao manejo de forma mais estreita, onde suas respostas estão mais atreladas ao sistema de produção do que as propriedades de capacidade. As variáveis mecânicas do solo, como a pressão de preconsoidação, índice de compressão e elasticidade do solo, expressam a forma com que solo recebe as cargas que a ele são impostas durante os ciclos de

produção, como o tráfego de máquinas agrícolas e o pisoteio animal e como ele reage a elas indicando sua resistência à compactação (SUZUKI et al., 2008; BRAIDA et al., 2010).

A pressão de preconsolidação (σ_p) é um parâmetro que indica a capacidade que o solo tem de resistir às cargas aplicadas sem se deformar irreversivelmente, indicando o suporte de carga e varia tanto com o estado de compactação que o solo se encontra e sua resistência estrutural e conteúdo de água (SILVA et al., 2002). Portanto, sendo um parâmetro de dupla interpretação, faz-se necessária a avaliação não só dos valores de σ_p , mas sim da curva de compressão do solo que descreve o comportamento deste durante a aplicação das cargas no teste de compressibilidade, onde se observa a variação do índice de vazios (I_v) ou a densidade do solo (D_s) em função do logaritmo das cargas (KELLER et al., 2011).

Para a camada superficial do solo, nota-se que o comportamento das curvas de compressão é semelhante, contudo, diferem quanto ao I_v inicial, indicando que o estado de compactação não é o mesmo. Como a σ_p é um parâmetro que não expressa apenas o estado de compactação do solo, entende-se que onde não há pastejo a σ_p indica uma boa qualidade estrutural do solo, pois não há compactação adicional, observado pelo maior I_v . Este fato deve-se à alta adição de material orgânico nesses sítios, principalmente de parte aérea, melhorando a estrutura do solo nas camadas mais superficiais e reduzindo o impacto das cargas (BRAIDA et al. 2006).

Por outro lado, nos sítios com pastejo o I_v é menor, o que logicamente é resultado do pisoteio animal que reduz o espaço poroso do solo, e este maior estado de compactação faz com que a σ_p dos tratamentos se iguale. Portanto, mesmo sendo os valores iguais de σ_p para ambas as coletas, o comportamento do solo não é igual, sendo essa diferença observada apenas na camada superficial.

Um fato importante a se destacar é a diferença entre os valores de σ_p na camada de 0-5 cm para os tratamentos nas duas épocas de coleta. Os menores valores para os tratamentos no período pós-pastejo em relação ao período pós-soja contrariam a lógica de que os solos pós-pastejo encontram-se em um estado de compactação mais elevado e, dessa forma, possuem valores elevados de σ_p . Essa diferença, provavelmente, está ligada ao conteúdo de água presente na amostra durante o ensaio de compressibilidade, pois o mesmo não foi padronizado e sim o

ψ_m que esteve próximo a -10 kPa no início dos ensaios, o que pode ser visto ao analisar os valores de θ das amostras coletadas na camada superficial do solo, os valores são maiores para o período outono-inverno se comparados com o primavera-verão; esse fato aliado à maior D_s das amostras onde há o pastejo torna as amostras mais susceptíveis à compactação. Isso indica que o solo sob pisoteio do gado, das raízes das gramíneas, bem como os materiais orgânicos e exsudatos radiculares dessas plantas, possui maior capacidade reter água, diminuindo, assim, a coesão entre as partículas e reduzindo o suporte de carga expresso pela menor σ_p .

O índice de compressão (I_c) indica a intensidade com que o solo se deforma após atingir a pressão de preconsolidação e normalmente varia com o estado de compactação do solo e sua resistência estrutural (VOGELMANN et al., 2012). No presente estudo, as áreas sem pastejo possuem maior I_c pelo fato de terem maior porosidade, o que influencia diretamente na capacidade do solo em se deformar com aplicação de cargas. Havendo espaço poroso livre para a deformação, a resposta às cargas tende a ser mais intensa. Dessa forma, como os sítios que recebem o pisoteio dos animais anteriormente já foram submetidos a processos de deformação, reduzindo a sua porosidade, esperava-se que o I_c fosse menor, como de fato observado com base nas curvas de compressão do solo. O aumento das cargas causa uma maior redução no I_v dos sítios sem pastejo quando comparados com os sítios pastejados. Todavia, esse comportamento só é observado nas camadas superficiais.

A elasticidade do solo, medida pelo coeficiente de descompressão (C_d), indica a capacidade que o solo tem de se recompor após um evento de compressão e descompressão, neste caso causado pelo pisoteio de bovinos. O C_d é um parâmetro que, assim como as demais propriedades mecânicas do solo, está atrelado ao manejo, pois os principais fatores que alteram a C_d estão associados ao nível de carbono orgânico, estado de compactação e conteúdo de água do solo (BRAIDA et al., 2008).

Não foram observados efeitos do pastejo na C_d em nenhuma das épocas avaliadas, indicando que, independente dos níveis de pastejo, o solo mantém a sua elasticidade. O que se percebe é um aumento significativo da elasticidade dos sítios sem pastejo após o período outono-inverno. Portanto, a diferença observada entre

os tratamentos após o pastejo não se deve à redução de Cd após o pisoteio dos animais e sim ao aumento desse valor para a testemunha. O aumento da Cd para os sítios sem pastejo decorre da alta quantidade de biomassa em superfície nesse período e melhor estruturação do solo pelos organismos, pois não há perturbação ao sistema nessas áreas (SOUZA et al., 2010).

A similaridade na elasticidade entre os sítios pastejados, tanto após o cultivo de verão quanto após o pastejo de inverno, se deve a fatores diferentes. Para a avaliação pós-soja, um Cd similar para todos os tratamentos denota a regeneração do sistema solo após o pastejo, pela maior atividade dos microrganismos na incorporação do material orgânico adicionado pelas gramíneas e recomposição do espaço aéreo, como já observado por Fernández et al. (2015). Todavia, para o período pós-pastejo, mesmo estando em um estado de compactação mais elevado como é observado pelas propriedades de capacidade, o que poderia diminuir a Cd, o solo possui uma quantidade de biomassa de raízes superior ao período primavera-verão, devido ao maior aporte de raízes proporcionado pelas gramíneas de inverno (SOUZA et al., 2008). Portanto, este maior aporte de raízes no período outono-inverno impede que a sua elasticidade diminua, podendo inclusive aumentá-la, pois o maior conteúdo de material orgânico pode conferir maior elasticidade a solo (CAPURRO et al., 2014). Contudo, como já mencionado, os solos sob pastejo podem ter maior retenção de água. De acordo com Braida et al. (2008), o maior conteúdo de água no solo aumenta a elasticidade devido ao aprisionamento de ar no solo durante a compressão. Porém, o que se observa neste estudo é a relação inversa entre conteúdo de água e elasticidade, pois o maior conteúdo de água diminui a coesão e aumenta adesão entre as partículas, fazendo com que o solo se deforme mais a cada ciclo de compressão e retorne menos após a descompressão.

De acordo com os resultados, a relação do Cd com o Ψ_m no início dos ciclos é inversa, ou seja, quando o solo passa a ser comprimido há uma diminuição no Cd e um aumento no Ψ_m . Esse comportamento é ocasionado pela rápida expulsão da água que está nos poros da amostra e pela redução do volume de solo, fazendo com que o conteúdo volumétrico de água na amostra aumente e cause uma redução brusca no Cd, por conta do menor atrito e maior adesão entre as partículas do solo.

Porém, ao passar dos ciclos a relação entre estas variáveis passa a ser direta. Quando o solo é carregado e descarregado a água que antes havia sido

expulsa passa a se realocar dentro do espaço poroso da amostra e, como a cada ciclo a amostra se deforma reduzindo o diâmetro dos poros, aumenta a energia com que a água fica retida naquele volume de solo, fazendo com que o potencial matricial da amostra diminua. Nesse ponto, o menor potencial matricial não representa menor conteúdo de água, e sim maior energia com que a água está retida. Portanto, o C_d segue reduzindo a uma taxa menos brusca que no início dos ciclos, de acordo com a taxa de deformação da amostra.

Com a avaliação do comportamento do solo frente aos ciclos rápidos de compressão/descompressão, o que de certa forma simula o pisoteio dos animais, pode-se dizer que o principal dano na estrutura do solo ocorre nos primeiros ciclos e que, posteriormente a esse dano inicial, o solo segue se deformando, porém a taxas muito inferiores. Contudo, entende-se que o processo de deformação no campo segue padrões muito mais dinâmicos que os testados neste estudo.

Para o C_n que indica a susceptibilidade da amostra à deformação com o passar dos ciclos de carga e descarga, podendo assim realizar inferências a respeito da capacidade do solo em resistir ao pisoteio repetido dos animais, ou mesmo passadas de máquinas (PETH, S.; HORN, R. 2006). Os resultados indicaram que a susceptibilidade do solo decresce em profundidade, sobretudo nas áreas sem pastejo e pastejo moderado, fato que está ligado ao decréscimo do I_v em profundidade, um fator que tem relação direta com a capacidade de deformação do solo, pois quanto maior essa variável, maior o espaço disponível à deformação.

Contudo, entre os tratamentos foi observada diferença significativa apenas na camada superficial do solo, para o período primavera-verão. O tratamento pastejo intenso apresentou menor susceptibilidade que os demais tratamentos, fato que provavelmente tenha relação com a maior D_s e menor I_v nesse tratamento para essa camada. Porém essa diferença não se repete no período outono-inverno, mesmo a D_s do solo sendo maior para esse período, podendo ser explicado pelo maior conteúdo volumétrico das amostras nesse período, o que aumenta a capacidade de deformação do solo.

Portanto, nota-se que o C_n assim como as demais propriedades mecânicas de solo, possui uma relação estreita com o I_v , D_s e θ do solo, podendo ter interpretações erradas caso não seja analisado tomando como base esses outros parâmetros.

6.2.2. Propriedades de fluxo

As propriedades de intensidade do solo que dizem respeito à dinâmica dos fluxos são ainda mais sensíveis ao manejo, pois estão diretamente ligadas não só ao espaço poroso, mas também ao arranjo desse espaço e a continuidade e tortuosidade dos poros. Assim, representa o alto nível estrutural do solo, dando indícios da complexa conformação da estrutura física (SILVEIRA JÚNIOR. et al. 2012).

Entre a condutividade hidráulica de solo saturado (K_s) e a permeabilidade do solo ao ar (K_a), esta é mais sensível por se tratar de uma propriedade mais dependente da macroprosidade do solo, a qual, por sua vez, é a mais afetada pelo aumento da densidade nos sítios com pastejo, e sua reconstituição é mais lenta tratando-se de solos argilosos como o utilizado neste estudo. Além disso, a permeabilidade ao ar está muito ligada ao conteúdo de água no solo, pois este determina o espaço poroso ocupado por ar e aquele livre para a condução de gases (RODRIGUES et al., 2011).

O efeito do potencial matricial (Ψ_m) pode ser observado de forma mais clara na coleta pós-soja onde, com a diminuição do Ψ_m , a K_a aumenta gradativamente, pois os poros que antes eram ocupados por água cedem espaço para a condução de ar. No período pós-pastejo, a resposta ao Ψ_m não é tão intensa, pois não há espaço disponível ao fluxo já que as raízes preenchem espaços, e esta resposta é percebida somente no Ψ_m de -100 kPa (solo mais seco). Contudo, deve-se ter cuidado na interpretação desses resultados, pois esses valores altos de K_a podem ser também devido à contração do solo em maiores Ψ_m , fazendo com que a amostra se afaste da parede do anel e formando rachaduras que facilitam o fluxo do ar.

O principal efeito do aumento da pressão de pastejo é a redução brusca de K_s e K_a em superfície, com a K_a chegando a zero no pastejo intenso em todos os Ψ_m avaliados, o que se deve à pressão dos cascos dos animais reduzir o espaço poroso (FLORES et al., 2007) e também por parte desse espaço estar preenchido pelo sistema radicular das gramíneas, já que seu desenvolvimento é estimulado pelo pastejo que, em altas intensidades eleva a concentração de raízes na superfície do solo (SOUZA et al., 2008). Esse efeito das raízes pode ser mais percebido na camada subsuperficial do, pois a K_s é inferior ao das demais camadas e a K_a é zero

para todos os tratamentos nos Ψ_m de -6 e -10 kPa, próximo à capacidade de campo para este solo. Todavia, esse efeito não é observado na coleta pós-soja, indicando que após a decomposição das raízes o espaço poroso é liberado.

Os maiores valores de K_a no período primavera-verão correspondem aos locais não pastejados. Isso denota que o solo que não sofreu uma compactação adicional se beneficia do espaço poroso liberado após a decomposição das raízes, aumentando assim a M_a . Nos tratamentos com pastejo esse efeito é pouco expressivo, prevalecendo o feito do pastejo na redução dos poros de maior diâmetro.

A K_s não foi afetada pelo pastejo no período primavera-verão em nenhuma camada estudada, o que provavelmente tem relação com a menor sensibilidade dessa variável à redução da macroporosidade. Trata-se, portanto, de uma evidência da maior capacidade de recuperação da permeabilidade do sistema poroso, assim como as propriedades de capacidade que, em sistemas abertos e de manejo complexo, são capazes de se regenerar naturalmente (DREWRY, 2006).

O valor muito alto de K_s na camada superficial do tratamento testemunha na coleta pós-pastejo é provavelmente decorrente da maior quantidade de material orgânico em decomposição e da alta ocorrência de bioporos construídos pelos microrganismos e fauna do solo, influenciado pelo sistema como um todo (ABREU et al., 2004; PORTILHO et al., 2011). Os valores mais altos de K_s na camada mais profunda (0,10-0,20 m) no tratamento com pastejo moderado indica que esse manejo gera uma estruturação mais profunda proporcionada pelas raízes, as quais possuem uma distribuição mais homogênea no perfil nesse nível de lotação animal ou pressão de pastejo.

Por fim, nota-se um dinamismo da resposta das propriedades de fluxo aos níveis de pressão de pastejo, sendo alterados por muitos fatores que vão, além do efeito direto do pisoteio, como o Ψ_m , o desenvolvimento e decomposição das raízes e a ação dos organismos do solo. Esse comportamento deixa evidente a atividade do sistema integrado de produção agropecuária estudado nesta dissertação.

7. CONCLUSÕES

Para as variáveis analisadas neste estudo, não há evidências de que o sistema integrado proporciona uma melhoria nas propriedades físicas e mecânicas do solo quando comparadas ao sistema sem pastejo. O pisoteio animal proporciona redução do espaço poroso em superfície (0-5 cm), danificando a estrutura e funcionalidade do solo.

As áreas sob pastejo são capazes de se regenerar após o um ciclo de cultivo. Todavia, essa recuperação não é completa e o solo nessa condição possui maior estado de compactação, afetando negativamente as propriedades de intensidade.

A hipótese deste estudo é negada, pois o pastejo moderado não promoveu melhorias nas propriedades analisadas se comparado com o tratamento sem pastejo. Entretanto, as alterações foram menores se comparadas com o pastejo intenso.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo mostraram uma resposta negativa às variáveis estudadas nas áreas pastejadas se comparadas com os as áreas onde não houve o pastejo dos animais. Todavia, esses prejuízos são temporários, não permanecendo de um ciclo para o outro. Além disso, deve-se compreender que os resultados dizem respeito às propriedades físicas e mecânicas do solo e que essas não representam todo o sistema, mas apenas uma parte dele. Logo, não podemos concluir que o sistema integrado é prejudicial ao solo em comparação com os sistemas onde não há a entrada do componente animal.

Não há dúvidas quanto aos inúmeros benefícios desse sistema de produção, em termos sociais, econômicos e ambientais (CARVALHO et al., 2015). As áreas com pastejo moderado são semelhantes às áreas não pastejadas em termos de adição de material orgânico (ASSMANN et al., 2014) e atividade microbiana (SOUZA et al., 2010), e superiores às áreas sem pastejo na ciclagem de nutrientes e incorporação de corretivos de acidez (CARVALHO et al., 2015). Portanto, pelo fato desse sistema de produção ser tão dinâmico, ele é capaz de absorver as diferenças observadas neste estudo, e ao final do ciclo o sistema tem sua produtividade pouco afetada. Portanto, nas áreas onde ocorre o pastejo do gado há uma redução pouco significativa a produtividade das culturas de verão, além de possibilitar a diversificação e intensificação de produção com a entrada dos animais, tornando o sistema mais produtivo e sustentável (ANGHINONI et al., 2013).

Na comparação do pastejo moderado com o sem pastejo, o pastejo moderado é inferior para as variáveis deste estudo, porém é bem mais produtivo pelo fato de possibilitar a produção animal e produção de grãos na mesma área, não reduzindo significativamente a biomassa, cobertura morta do solo e atividade microbiana (SOUZA et al., 2008).

Quando comparamos o pastejo moderado com o pastejo intenso, tem-se uma noção ainda maior da importância do manejo adequado dos animais. Em termos de produtividade ambos são muito semelhantes (CARVALHO et al., 2015), mas o pastejo intenso não é um sistema sustentável, pois há alta compactação e redução quase que total da cobertura do solo, gerando degradação e alto consumo de energia do sistema, o que faz com que esse manejo de lotação tenha os piores indicadores de qualidade de solo.

Assim, ao mensurarmos as variáveis deste estudo temos o resultado de uma parte de um grande sistema de entradas e saídas. Reconhecer o quanto esses resultados impactam diretamente o sistema é uma tarefa difícil se não considerarmos o todo. Desse modo, pode-se dizer que o benefício que os SIPA's proporcionam são superiores à redução da qualidade estrutural em superfície causada pelo impacto do casco dos animais, e que o sistema com pastejo moderado possui um balanço positivo entre perdas e ganhos, tornando-o mais produtivo se comparado ao sem pastejo, e menos agressivo ao solo se comparado ao pastejo intenso. Todavia, o impacto existe e a conclusão do estudo deve ter como base a hipótese que é testada e os seus objetivos.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

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**, 28:519-531, 2004.

ALBUQUERQUE, A.W. et al. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **R. Bras. Engenharia Agrícola e Ambiental**. 6:136-141, 2002.

AN J.; ZHANG Y.; YU N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. **Soil & Tillage Research**. 145:216–223, 2015.

ANGHINONI, I.; CARVALHO P.C.F.; COSTA, S.E.V.G.A. **Abordagem Sistêmica do Solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no Subtrópico Brasileiro**. Tópicos Ci. Solo, 8:325-380, 2013.

ASSMANN, J.M et al. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 190:52-59, 2014.

BAGGIO, C. **Comportamento em pastejo de novilhos numa pastagem de inverno submetida a diferentes alturas de manejo**. 2007. 137 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, 28: 1261-1263, 1996.

BELL, L. W. et al. Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. **Soil & Tillage Research**. 113: 19–29, 2011.

BRAIDA, J.A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 30: 605-614, 2006.

BRAIDA, J.A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32: 477-485, 2008.

BRAIDA, J.A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, 14: 131-139, 2010.

CAPURRO, E.P.G. et al. Compressibilidade e elasticidade de um Vertissolo afetado pela intensidade de pastejo bovino. **Ciência Rural**, 44:283-288, 2014.

CARVALHO, P.C.F. et al. **Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. 102p. (Boletim Técnico).

CASAGRANDE, A. **Determination of the preconsolidation load and its practical significance**. In: Proceedings of the International Conference on the Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge: Harvard University, 3:60-64, 1936.

CEMETRS – CONSELHO ESTADUAL DE METEOROLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas Climático do Rio Grande do Sul**. Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <<http://www.r3pb.com.br/AtlasCemetRS>>. Acesso em: 19 out. 2015.

COLLARES, G.L. et al. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura - pecuária de leiteiro noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, 41:246-250, 2011.

CONAB - **Companhia Nacional de Abastecimento**. *Levantamentos de Safra*. Disponível em <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&>. Acesso: em agosto de 2015.

CONTE, O. et al. Densidade, agregação e frações de carbono de um Argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:579-587, 2011a.

CONTE, O. et al. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 10:1301-1309, 2011b.

COSTA, S.E.V.G.A. **Intervalo hídrico ótimo do solo e estado hídrico das plantas em sistema integrado de produção agropecuária no subtropico brasileiro**. Porto Alegre, 2012. 201p. Tese de (Doutorado e patrimônio cultural) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DENARDIN, J.E. et al. **Evolução da área cultivada sob sistema plantio direto no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 32p. (Embrapa Trigo. Documentos, 29)

DREWRY, J.J. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 114:159–169, 2006.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Comunicado Técnico 198. Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo**. ISSN 1679-0472, 2014. Dourados, MS.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPACNPS, 212, 1997.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) **Integrated crop-livestock systems for development** - Sustainable production intensification. 2015.

Disponível em: <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/ic-lsd/en/>. Acesso em setembro de 2015.

FERNÁNDEZ, P.L.; ALVAREZ, C.R.; TABOADA, M.A. Topsoil compaction and recovery in integrated no-tilled crop–livestock systems of Argentina. **Soil & Tillage Research**. 153:86–94, 2015.

FLORES J.P.C. et al. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema de plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 31:771-780, 2007.

FRANZLUEBBERS, A.J.; STUEDEMANN, J.A. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. **Soil Till. Res**. 100:141–153, 2008.

GUBIANI, P.I. et al. Suplemento excel para modelar a curva de compressão do solo. **Anais**: XX Congresso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo, 2014, Cusco. XX Congresso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo, 2014.

HORN, R.; KUTILEK, M. The intensity-capacity concept—how far is it possible to predict intensity values with capacity parameters. **Soil & Tillage Research**. 103:1–3, 2009.

KELLER, T. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, 163:13–23, 2011.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory Methods. In: A. KLUTE, ed. **Methods of soil analysis**: Part I-Physical and mineralogical methods. Madison, 2:635-662, 1986.

KOTTEK, M. et al. **World map of the Köppen-Geiger climate classification updated**. **Meteorologische Zeitschrift**, 15:259-263, 2006.

KRÜMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R. Determination of pre compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. **Soil & Tillage Research**. 99:39–148, 2008.

LARREGUY, C.; CARRERA, A.L.; BERTILLER, M.B. Effects of long-term grazing disturbance on the belowground storage of organic carbon in the Patagonian Monte, Argentina. **Journal of Environmental Management**. 134:47-55, 2014.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 38:133-146, 2009.

MAPA/ACS **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República / Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) Brasília: 2012. 173 p.

MELLO, E.S.; BRUM, A.L. O direito ao desenvolvimento e a produção local: O plantio direto da soja como uma alternativa de desenvolvimento econômico. **Revista Gestão e Desenvolvimento em Contexto**. 1:01, 2013.

MORAES, A. et al. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**. 57:4–9, 2014.

MORDHORST A. et al. Effect of hydraulic and mechanical stresses on cyclic deformation processes of a structured and homogenized silty Luvic Chernozem. **Soil & Tillage Research**. 125:3–13, 2012.

MOREIRA, W. H. et al. Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico em Sistema de Integração Lavoura-Pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 36:389-400, 2012.

MOREIRA, W. H. et al. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 38:1315-1326, 2014.

PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal of Plant Nutrition Soil Science**. 169, 401- 410, 2006.

PETH S. et al. Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. **Soil & Tillage Research**. 106:317–328, 2010.

PORTILHO, I.I.R. et al. Fauna invertebrada e atributos físicos e químicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 46:1310-1320, 2011.

PRIGOGINE, I. **As leis do caos**. São Paulo, Editora UNESP, 2002. 109p.

REICHERT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil & Tillage Research**, 158:123–136, 2016.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo protótipos e testes. **Ciência Rural**. 36:1931-1935, 2006.

RODRIGUES, S. et al. Permeabilidade ao ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 35:105-114, 2011.

SALTON, J.C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32:11-21, 2008.

SCHOLEFIELD, D.; HALL, D. M. A. recording penetrometer to measure the strength of soil in relation to the stresses exerted by a walking cow. **Journal of Soil Science**. 37: 165-176. 1986.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um latossolo vermelho distrófico típico. ii - grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 26:9-15, 2002.

SILVEIRA JUNIOR, S.D. et al. Qualidade física de um latossolo vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 36:1854-1867, 2012.

SOUZA, E.D. et al. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 34:74-88, 2010.

SOUZA, E.D. et al. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistemas de integração agricultura-pecuária submetidos a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32:1273-1282, 2008.

SUZUKI, L.E.A.S. et al. Estimativa da susceptibilidade à 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**, 32:963-973, 2008.

TABOADA, M.A. et al. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. **Geoderma**. 123:233–244, 2004.

TERNOSKI, S. As estratégias de diversificação dos meios de vida e a formação da renda: uma análise empírica sobre os estabelecimentos agrícolas familiares cooperados da Cresol Prudentópolis. **Teoria e Evidência Econômica**. 43:283-312. 2014.

VEIGA, M. et al. Atributos de solo e de plantas afetados pelo manejo da pastagem anual de inverno em sistema de integração lavoura-pecuária. **Ciência Rural**. 42:444-450, 2012.

VEIGA, M. et al. Effects on Soil and Crop Properties of Forms of Sowing, Deferral Intervals and Fertilisation of the Annual Winter Forage in a Crop-Livestock Integration System. **Journal of Agricultural Science**; 8:15-25, 2016.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. **Solo como sistema**. Curitiba; 104p; 2011.

VOGELMANN, E.S. et al. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo tráfegado e escarificado. **Ciência Rural**, 42:291-297, 2012.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und deformationen in waldböden durch ernteverfahren**. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Kiel. 107, 2005.

WOHLENBERG, E. V. et al. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 28:891-900, 2004.

ZÚÑIGA F. et al. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. **Soil & Tillage Research**. 145:233–241, 2015.

LAMANDE, M.; SCHJØNNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. **Soil & Tillage Research**. 114:71–77, 2011.