

**LUCAS RAIMUNDO RAUBER**

**ESTRUTURA DO SOLO EM CONDIÇÕES DE PASTEJO BOVINO EM PASTAGEM  
NATURAL DE ALTITUDE**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Dra. Letícia Sequinatto  
Coorientador: Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

**Lages, SC  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Rauber, Lucas Raimundo

Estrutura do solo em condições de pastejo bovino em pastagem natural de altitude / Lucas Raimundo Rauber. -- 2020.  
85 p.

Orientador: Letícia Sequinatto

Coorientador: Douglas Rodrigo Kaiser

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2020.

1. Bovinos de corte. 2. Compactação do solo. 3. Atividade de raízes. 4. Funcionalidade do solo. 5. *Andropogon lateralis* Nees. I. Sequinatto, Letícia. II. Kaiser, Douglas Rodrigo. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

**LUCAS RAIMUNDO RAUBER**

**ESTRUTURA DO SOLO EM CONDIÇÕES DE PASTEJO BOVINO EM  
PASTAGEM NATURAL DE ALTITUDE**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

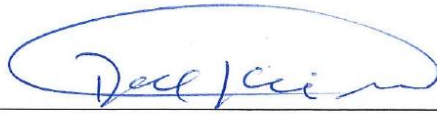
**Banca examinadora**

Orientador(a):



Prof(a). Dra. Leticia Sequinatto  
Universidade do Estado de Santa Catarina


Membros:



Prof. Dr. Dalvan José Reinert  
Universidade Federal de Santa Maria



Prof. Dr. Hdegardis Bertol  
Universidade do Estado de Santa Catarina



Prof. Dr. Jackson Adriano Albuquerque  
Universidade do Estado de Santa Catarina

**Lages, SC, 12 de fevereiro de 2020**



## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela saúde e dom da vida. Aos meus pais Eugênio e Ivanir, pela ajuda e apoio durante mais esta fase de minha vida. À professora Letícia Sequinatto, pela orientação durante o período de Mestrado e de condução deste trabalho, bem como por todos os ensinamentos e experiência profissional e pessoal repassada. Ao professor Douglas Rodrigo Kaiser, pela coorientação neste trabalho. À FAPESC (Fundação de amparo à pesquisa e inovação do estado de Santa Catarina), pela concessão da bolsa. Ao programa de pós-graduação em Ciência do Solo do CAV/UEDESC, por oportunizar este período de estudo. Aos professores do programa, por todos os ensinamentos e experiência profissional repassada. Aos colegas de pós-graduação e colaboradores da graduação do curso de Agronomia e de Engenharia Florestal do CAV/UEDESC, pela ajuda e experiência convivida durante este trabalho e período de Mestrado. À Epagri e seus pesquisadores e colaboradores de campo, pela oportunidade de realização deste trabalho e ajuda na condução da pesquisa. Ao projeto NEXUS II, MCTI/CNPq n: 441396/2017-8, no qual está incluso este trabalho. A todos que de uma maneira ou de outra colaboraram na realização deste trabalho. Obrigado!



## RESUMO

A altura do pasto regula a intensidade dos efeitos do pastejo sobre o solo, e deve ser utilizada para explorar o sinergismo entre solo-planta-animal. O objetivo foi avaliar o efeito do pastejo bovino, sob diferentes alturas de pasto de uma pastagem natural de altitude, na estrutura de um Cambissolo Húmico Alumínico típico. O estudo foi realizado no ano de 2018, em um experimento iniciado em 2015, na estação experimental da Epagri em Lages/SC. Os tratamentos foram alturas de pré pastejo da pastagem natural: 12, 20, 28 e 36 cm, tendo o capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees) como espécie de referência. O sistema de pastejo utilizado foi o intermitente, com 40% de desfolha da altura inicial. Ao lado do experimento foi mantida uma área de referência com exclusão ao pastejo. A estrutura do solo foi avaliada na área de exclusão e nos tratamentos, nos estratos de touceira e entre touceiras do *A. lateralis*, em dois momentos: imediatamente após cessarem os pastejos na temporada de 2017/2018, no mês de junho, e após o período hibernar de inverno da pastagem, no mês de outubro (4 meses após cessarem os pastejos). Os parâmetros de solo avaliados foram: Densidade do solo (Ds), distribuição de poros, estabilidade de agregados, resistência à penetração, conteúdo de carbono e nitrogênio e infiltração de água. Após o pastejo, entre as alturas do pasto não houve alteração da Ds e da estabilidade de agregados nas regiões de entre touceiras do *A. lateralis*. O tratamento 12 cm aumentou em 66% a bioporosidade na camada 0-5 cm de profundidade em comparação ao tratamento 36 cm, bem como aumentou a taxa de infiltração básica de água (TIB) para 51 mm h<sup>-1</sup> em comparação ao tratamento 28 cm (TIB=16 mm h<sup>-1</sup>). Comparativamente à área de exclusão, as alturas de pasto elevaram em média 8% a Ds na camada 0-5 cm no estrato entre touceiras, e incrementaram a macroporosidade, bioporosidade e infiltração de água. Após o inverno, houve diminuição geral da TIB, que não diferiu entre os tratamentos, porém o tratamento 12 cm permaneceu com maior infiltração do que a área de exclusão. Independentemente da altura do pasto, o pastejo não degradou a estrutura do solo e inclusive melhorou a funcionalidade do sistema poroso comparativamente a área de exclusão, o que indica que a diminuição da altura do pasto de 36 cm até 12 cm pode ser utilizada para aumento da produção de carne neste ecossistema, sem degradar o solo.

**Palavras-chave:** Bovinos de corte. Compactação do solo. Atividade de raízes. Funcionalidade do solo. *Andropogon lateralis* Nees.





## ABSTRACT

The sward height regulates the intensity of the effects of the grazing on the soil, and should be used to exploit the synergism between soil-plant-animal. The objective was to evaluate the effect of cattle grazing, under different sward heights of a highland natural grassland, in the structure of a Cambissolo Húmico Alumínico típico (Inceptisol). The study was conducted in 2018, in an experiment started in 2015, at Epagri experimental station in Lages/SC. The treatments were different sward heights of a natural grassland: 12, 20, 28 and 36 cm, with the capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees) as the reference specie. The grazing system used was the intermittent, with 40% defoliation of initial sward height. Next to the experiment was kept a reference area with exclusion to grazing. The soil structure was evaluated in the exclusion area and treatments, in the strata of clump and between clumps of the *A. lateralis*, in two moments: immediately after cease the grazing in the 2017/2018 season, in June, and after the hibernal period of the grassland in winter, in October (4 months after grazing). The evaluated soil parameters were: Soil bulk density (Bd), pore distribution, aggregate stability, penetration resistance, carbon a nitrogen content and water infiltration. After grazing, between the sward heights there was no change in Bd and aggregate stability in the regions of between clumps of *A. lateralis*. The treatment 12 cm increased the bioporosity in the 0-5 cm deep layer by 66% compared to the 36 cm treatment, as well as increased the basic water infiltration rate (BIR) to 51 mm h<sup>-1</sup> compared to the 28 cm treatment (BIR=16 mm h<sup>-1</sup>). Compared to the exclusion area, the sward heights increased on average 8% the Bd in the 0-5 cm deep layer in the strata between clumps, and increased the macroporosity, bioporosity and water infiltration. After winter, there was a general decrease in the BIR, which did not differ between the treatments, but the 12 cm treatment remained with greater infiltration than the exclusion area. Regardless of the sward height, grazing did not degrade the soil structure and even improved the functionality of the porous system compared to the exclusion area, which indicates that the decrease of the sward height from 36 cm to 12 cm can be used to increase meat production in this ecosystem, without degrade the soil.

**Keywords:** Beef cattle. Soil compaction. Root activity. Soil functionality. *Andropogon lateralis* Nees.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Ilustração dos efeitos do pastejo bovino sobre o solo.....20
- Figura 2 - Vista do delineamento experimental, em blocos ao acaso com quatro tratamentos e quatro repetições, iniciado no ano de 2015. Os tratamentos são diferentes alturas do pasto para início de pastejo (12, 20, 28 e 36 cm), em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees). Ao lado do delineamento foi mantida uma área de exclusão ao pastejo. ....36
- Figura 3 - Valores médios da altura de pré e pós pastejo do pasto no estrato superior (A) e inferior (B) da comunidade de plantas, e massa e resíduo de forragem (C), sob diferentes alturas de pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees). AE: Área de exclusão ao pastejo; MF: Massa de forragem; RF: Resíduo de forragem. ....37
- Figura 4 - Vista de bovinos em pastejo sob diferentes alturas do pasto (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), em sistema de pastejo rotacionado com 40% de severidade de desfolha...38
- Figura 5 - Curva de densidade do solo (Ds) em função da umidade gravimétrica (Ug) de um Cambissolo Húmico Alumínico típico na camada de 0-20 cm de profundidade, realizada pelo ensaio de Proctor Normal. Ds max: Densidade do solo máxima. UOC: Umidade ótima para compactação máxima. ....42
- Figura 6 - Amplitude de variação da densidade do solo (Ds) entre os locais de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas em diferentes alturas de pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), após o período de pastejo de 2017/2018, no mês de junho (A), e após o período de inverno (B), 4 meses após o pastejo (mês de outubro). \*: significativo ao teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). ns: Não significativo. ....52
- Figura 7 - Estabilidade de agregados no solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), nos períodos de pós pastejo e pós inverno, e porcentagem de carbono orgânico e nitrogênio totais no solo. Para cada camada de solo, médias com letras distintas diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), e médias com asterisco diferem da área de exclusão (AE) pelo teste t Student ( $p < 0,05$ ). DMP: Diâmetro médio ponderado. ....54
- Figura 8 - Densidade e grau de compactação (GC) do solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), após o pastejo e após o período de inverno (4 meses após o pastejo). AE: Área de exclusão ao pastejo. As linhas traçadas entre 80 e 90% do GC, expressam a faixa mais favorável ao crescimento das plantas.....57
- Figura 9 - Resistência do solo à penetração (RP) e umidade gravimétrica do solo (Ug) durante o período de retomada de crescimento da pastagem natural, após o período de inverno de 2018, sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon*

*lateralis* Nees), nas datas de 12/10/2018 e 12/11/2018.\*: Significativo ao teste de Tukey ( $p < 0,05$ ); ns: não significativo. DMS: Diferença mínima significativa..... 59

- Figura 10 - Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração (RP) na comunidade de plantas e umidade do solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), na data de 12/10/2018, período de retomada do crescimento da pastagem após o período de inverno. AE: área de exclusão ao pastejo. DMS: Diferença mínima significativa. .... 60
- Figura 11 - Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração na comunidade de plantas e umidade do solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), na data de 12/11/2018, período de retomada do crescimento da pastagem após o período de inverno. AE: área de exclusão ao pastejo. DMS: Diferença mínima significativa. .... 61
- Figura 12 - Ajuste do modelo de Horton à infiltração de água no solo ao longo do tempo, em diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), no período de pós pastejo (A) e pós inverno (B) (quatro meses após o pastejo), e taxa de infiltração básica de água no solo (TIB) (C) e umidade gravimétrica do solo (Ug)(D). Para cada período de avaliação, médias maiúsculas distintas diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e médias com asterisco diferem da área de exclusão (AE) pelo teste de t Student ( $p < 0,05$ ). .... 63
- Figura 13 - Relação da bioporosidade (Bio) e macroporosidade (Mac) média na camada de 0-20 cm de profundidade com a taxa de infiltração básica de água no solo (TIB), após o período de pastejo e após o período de inverno (quatro meses após o pastejo) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees) sob pastejo bovino. .... 65

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Valores médios de frequência de pastejo, intervalo entre pastejos, período de ocupação e de taxa de lotação animal sob as diferentes alturas de pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees). UA: Unidade animal (450 kg de peso vivo).  
.....36
- Tabela 2 - Esquematização das avaliações realizadas no solo em cada época e local de avaliação, bem como o número de repetições realizadas. O experimento é sob pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees). O delineamento é de blocos ao acaso com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos são alturas do pasto para início do pastejo (12, 20, 28 e 36 cm). UE: Unidade experimental; Touc: Touceira; E.touc: Entre touceiras..... 39
- Tabela 3 - Equações de ajuste resultantes da relação entre infiltração de água no solo e tempo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), em diferentes períodos de avaliação (pós pastejo e pós inverno), segundo modelo de Horton (1940). AE: área de exclusão ao pastejo. Ti: taxa de infiltração ( $\text{mm h}^{-1}$ ).  
..... 41
- Tabela 4 - Densidade e distribuição de diâmetro de poros no solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), nas regiões de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas após o período de pastejo de 2017/2018 (mês de junho). .....46
- Tabela 5 - Densidade e distribuição de diâmetro de poros no solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), nas regiões de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas após o período de inverno de 2017/2018, 4 meses após o pastejo (mês de outubro). .....50



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1	PASTAGENS NATURAIS DE ALTITUDE NO SUL DO BRASIL: CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	19
2.2	EFEITOS DO PASTEJO BOVINO NA ESTRUTURA DO SOLO .....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Efeitos diretos</b> .....	20
<b>2.2.2</b>	<b>Efeitos indiretos</b> .....	22
2.3	ALTURA DO PASTO COMO “REGULADORA” DOS EFEITOS DO PASTEJO SOBRE O SOLO .....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Importância do manejo da pastagem natural em ambiente de altitude</b> .....	26
2.4	DEGRADAÇÃO DA ESTRUTURA SOLO SOB PASTEJO E INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA .....	27
<b>3</b>	<b>HIPÓTESE</b> .....	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>33</b>
4.1	OBJETIVO GERAL .....	33
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	33
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
5.1	PROTOCOLO EXPERIMENTAL .....	35
5.2	AVALIAÇÕES REALIZADAS NO SOLO .....	38
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>45</b>
6.1	DENSIDADE, DISTRIBUIÇÃO DE POROS POR TAMANHO E ESTABILIDADE DE AGREGADOS .....	45
6.2	A ESTRUTURA DO SOLO E AS PLANTAS NATIVAS .....	55
6.3	INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	62
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>73</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>83</b>





## 1 INTRODUÇÃO

As pastagens naturais de altitude no sul do Brasil apresentam aptidão de uso para a pecuária, utilizada de maneira extensiva como principal atividade econômica neste ambiente, introduzida pelos colonizadores há cerca de 350 anos e mantida até os dias atuais. O solo neste ambiente mantém elevada diversidade de espécies de plantas e processos ecossistêmicos, resiste ao manejo e catalisa as transformações que ocorrem nas relações solo-planta-animal (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013).

As pastagens naturais são naturalmente adaptadas ao pastejo devido a sua co-evolução com herbívoros, que são importantes para manutenção da biodiversidade (ANDRADE et al., 2016). No entanto, devido à crescente demanda por carne bovina, a intensificação de uso das pastagens vem crescendo no sul do Brasil (KOCH et al., 2016), o que gera preocupação com a qualidade do solo e seus serviços ecossistêmicos (MODERNELO et al., 2016), que foram pouco estudados e quantificados sob efeito do pastejo e intensificação de uso das pastagens naturais.

Os efeitos do pastejo bovino sobre o solo são complexos e influenciam simultaneamente a fertilidade física, química e biológica do sistema. Estes efeitos são diretos quando relacionados ao pisoteio que pode gerar rearranjo na estrutura do solo, e indiretos quando o pastejo estimula mudanças na dinâmica da vegetação e de organismos do solo, que apresentam alta capacidade em alterar a estrutura do solo.

A altura do pasto regula a intensidade com que os efeitos diretos e indiretos do pastejo atuam sobre o solo. É uma ferramenta de manejo utilizada para equilibrar a produção animal com o pasto e com a conservação do solo, bem como para explorar o aparecimento de propriedades emergentes por meio da interação entre os componentes do sistema. A degradação deste ecossistema ocorre quando a altura do pasto ou oferta de forragem fica abaixo do equilíbrio (CONTE et al., 2011), em que há rompimento do sinergismo entre solo-planta-animal. Nessa situação, os efeitos danosos do pisoteio superam os benefícios do pastejo na estimulação do crescimento de raízes e atividade de organismos no solo, o que gera compactação e compromete a qualidade do solo.

Em pastagens naturais do Bioma Pampa no Rio Grande do Sul, alguns estudos já foram realizados e demonstram que em situações onde a oferta de forragem permanece entre 8 a 12 %, há benefícios ao sistema, enquanto a oferta de 4% é danosa aos processos do solo (BERTOL et al., 1998; SALTON et al., 2008; CONTE et al., 2011; MARTINS; DENARDIN, 2019). Os efeitos do pastejo, com a diminuição da altura ou oferta de forragem da pastagem natural, podem não ser os mesmos em ambientes de altitude, em função de diferentes características do

solo, principalmente relacionadas a capacidade de resistência a degradação devido aos altos teores de carbono. Assim, ainda não é conhecida a altura, ou faixa de altura, ideal do pasto, o que intensifica o processo de subutilização ou sobreutilização deste ecossistema, que, em consequência, vem sendo crescentemente substituído por lavouras e florestas plantadas. Além disso, há carência de estudos que avaliem a variabilidade temporal de propriedades e processos do solo nos períodos de repouso da pastagem natural, que podem servir para recuperação do solo em condições de sobrepastejo em sistemas mais intensivos, através da manifestação da capacidade de resiliência do solo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 PASTAGENS NATURAIS DE ALTITUDE NO SUL DO BRASIL: CONSIDERAÇÕES GERAIS

As pastagens naturais de altitude no sul do Brasil estão situadas em encaves da Mata Atlântica no nordeste do Rio Grande do Sul, sudeste de Santa Catarina e em algumas regiões do norte de Santa Catarina e também do Paraná, em altitudes de 800 a 1800 m, com vegetação campestre entremeada com matas de araucária. A formação destas pastagens dentro do bioma Mata Atlântica se deve a um período de clima seco e frio ocorrido entre 18 e 24 mil anos atrás, que favoreceu a emergência de vegetação campestre sem avanço das florestas, que ficaram restritas a locais do relevo com maior umidade, formando os capões de mata (BEHLING et al., 2004). Nos últimos 1500 anos, em que houve a estabilização de um clima mais úmido, ocorreram condições ideais para o avanço das florestas sobre a vegetação campestre. No entanto, isto foi comprometido em função da colonização estabelecida nestes locais, com início da pecuária e da prática de queimadas sobre a vegetação natural, que impedem o aparecimento e crescimento de espécies arbóreas (BEHLING et al., 2004; BEHLING et al., 2007; ALMEIDA, 2009).

As pastagens naturais de altitude apresentam elevada diversidade de espécies, com cerca de 1116 táxons e prevalência das famílias Asteraceae (276 espécies), seguidas das Poaceae (231 espécies) e das Fabaceae (102 espécies), com elevada quantidade de gramíneas C3 e C4 de potencial forrageiro (BOLDRINI et al., 2009). No planalto Sul Catarinense, existem diversos típicos fisionômicos de composição do campo nativo, desde o tipo palha fina ao tipo palha grossa. Na fisionomia tipo palha grossa, a espécie predominante é o capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), uma gramínea com hábito cespitoso de crescimento e formação de touceiras, a qual, juntamente com as demais espécies, em grande maioria, são estivais e tem o crescimento interrompido durante o período de inverno devido as baixas temperaturas e formação de geadas.

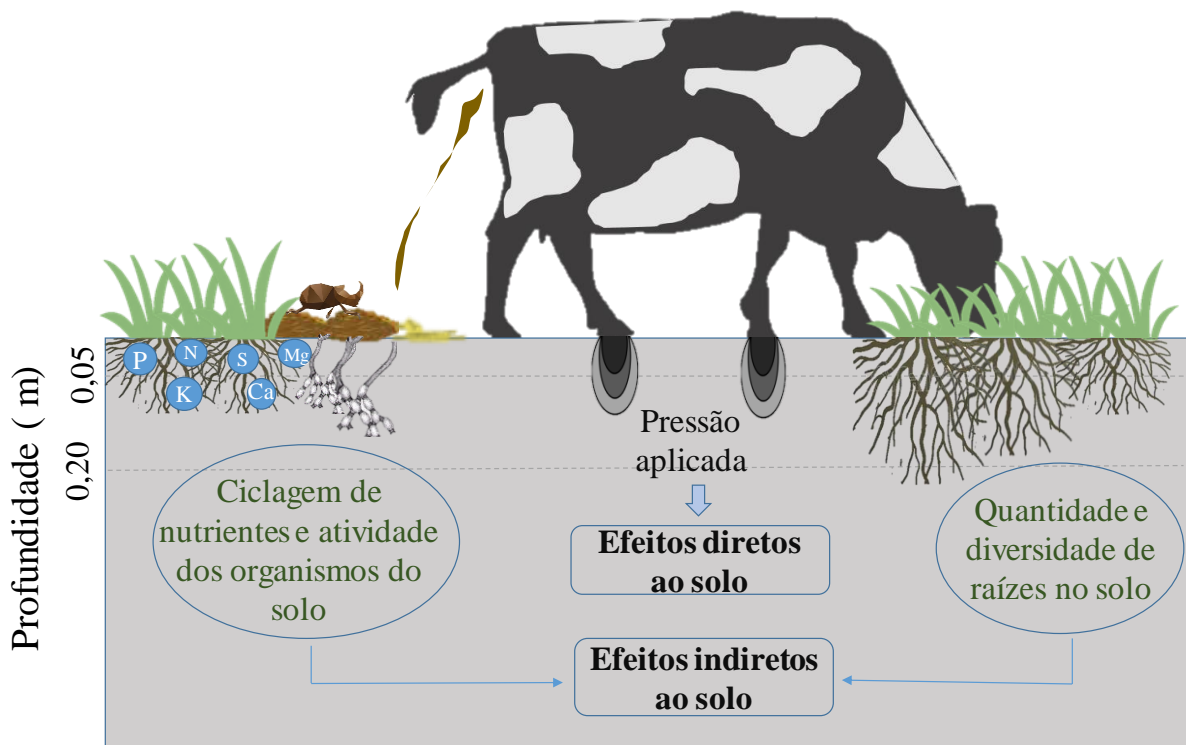
As pastagens naturais de altitude são apropriadas ao pastejo bovino (PINTO et al., 2016) e utilizadas de maneira extensiva pelos pecuaristas com o intuito de geração de renda. O solo no ecossistema pastoril apresenta diversas funções devido a reserva de água, ar e nutrientes e disponibilidade às plantas estabelecidas. Assim, sequestra e estoca carbono, participa do ciclo hidrológico e dos ciclos biogeoquímicos, recicla nutrientes, serve de habitat e mantém elevada diversidade de plantas e organismos e, na presença animal, atua como catalizador das interações

entre planta-animal-atmosfera (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013; SOUSSANA; LEMAIRE, 2014).

## 2.2 EFEITOS DO PASTEJO BOVINO NA ESTRUTURA DO SOLO

Os efeitos do pastejo na estrutura do solo são complexos e sinérgicos, com alteração na fertilidade física, química e biológica do solo. Estes efeitos são diretos quando devidos à pressão aplicada ao solo pelos cascos dos bovinos, capaz de gerar rearranjo estrutural, e indiretos quando relacionados a mudanças na dinâmica de vegetação, atividade de raízes e deposição de urina e fezes dos animais, o que altera a estrutura do solo pelas plantas e organismos do solo (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013) (Figura 1).

Figura 1 - Ilustração dos efeitos do pastejo bovino sobre o solo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

### 2.2.1 Efeitos diretos

A pressão aplicada pelos bovinos é elevada em função da alta massa corporal e baixa área de contato com o solo, e pode variar de 300 a 750 kPa de acordo com o local dos cascos, que não distribuem uniformemente a pressão (VAN DER TOL et al., 2002), e de acordo com a movimentação dos animais, o que altera o número de cascos em contato com o solo e consequentemente a pressão dinâmica. A movimentação dos animais também gera aplicação

de força no momento de contato dos cascos com o solo, o que colabora para um aumento momentâneo de pressão.

A pressão do pisoteio é distribuída num formato radial na camada mais superficial do solo (Figura 1) (GREENWOOD; MCKENZIE, 2001; LANZANOVA et al., 2007; MOREIRA et al., 2014; DE OLIVEIRA et al., 2015), que pode atingir até 5 cm de profundidade quando o solo se encontra friável e até 15 cm quando plástico. A profundidade de distribuição da pressão aplicada é inversamente proporcional a resistência do solo (REICHERT et al., 2016a), a qual diminui com o incremento de umidade, o que gera aprofundamento da superfície de solo em contato com os cascos dos animais sob consistência plástica. Um rearranjo na estrutura do solo ocorre quando a pressão aplicada supera a capacidade de suporte de carga do solo (REICHERT et al., 2016a). Este processo altera na quantidade, distribuição e continuidade de poros e aumenta a densidade do solo (Ds).

A capacidade de suporte de carga do solo é condicionada pela textura, mineralogia, teor de matéria orgânica, estrutura, grau de consolidação, quantidade de raízes e principalmente com a umidade do solo (REICHERT et al., 2016a). Assim, é uma propriedade influenciada por características solo, manejo e dinamicamente pelos ciclos de umedecimento e secagem.

Solos argilosos, em geral, são os mais suscetíveis à mudança no arranjo das partículas por uma pressão externa, visto a elevada porosidade e conseqüentemente facilidade de acomodação de partículas de pequeno tamanho, bem como por apresentarem elevada retenção de água e plasticidade, o que contribui para a maior facilidade com que o rearranjo estrutural ocorre comparativamente a solos de textura média ou arenosa. A matéria orgânica favorece a estruturação devido sua elevada área superficial específica e presença de grupos funcionais que se ligam às cargas dos minerais de argila, principalmente aos óxidos, o que eleva a resistência do solo à compactação e elasticidade (BRAIDA et al., 2008). Quanto maior o grau de consolidação do solo, maior a coesão em função da maior proximidade das partículas e maior será a capacidade de suporte de carga, conseqüentemente necessitando pressões cada vez maiores para que ocorra uma nova mudança no rearranjo das partículas e aumento na Ds (BRAIDA et al., 2008). A umidade do solo interfere na facilidade com que as partículas se rearranjam e atua como lubrificante no processo e na diminuição da coesão entre as partículas (REICHERT et al., 2016a).

As plantas, indiretamente, também apresentam influência nas propriedades mecânicas do solo. As raízes que crescem dentro de poros de maior tamanho elevam a resistência à compressão do solo, pois absorvem parte da energia e a transmitem para poros menores não ocupados por raízes. Ainda, as raízes atuam na estabilização de agregados e de paredes de poros

(REICHERT et al., 2016a), ancoragem dos agregados e aumento da coesão (BARBOSA; DE LIMA, 2013). Já a parte aérea viva ou em decomposição das plantas, com caules e folhas acomodadas na superfície do solo, atua na dissipação das cargas aplicadas sobre o solo (LEÃO et al., 2004; REICHERT et al., 2016b), o que diminui o tempo de contato de cargas dinâmicas com o solo e conseqüentemente as pressões absorvidas pelo solo (BRANDT, 2009).

Quando a pressão exercida pelos cascos dos bovinos é menor que a capacidade de suporte de carga do solo, ocorre leve deformação estrutural, mas sem romper a integridade da estrutura, o que faz com que ocorra um “alívio” mecânico do solo após cessar a pressão, que caracteriza um rearranjo elástico do solo. Já, quando é maior que a capacidade de suporte de carga, a pressão exercida pelos cascos rompe a integridade da estrutura do solo e o rearranjo ocasionado é irreversível e caracterizado como plástico (REICHERT et al., 2016a). O solo quando seco apresenta elevada coesão, o que contribui para as deformações elásticas do solo. Quando plástico, a adesão predomina sobre a coesão no solo e o rearranjo ocorre com maior facilidade, o que favorece deformações permanentes. Solos friáveis apresentam comportamento intermediário, e por isso é importante o monitoramento da umidade do solo para liberação dos animais para pastejo, com o intuito de evitar períodos em que o solo apresenta consistência plástica.

### **2.2.2 Efeitos indiretos**

A renovação de tecidos da parte aérea e de raízes das plantas forrageiras é um processo natural ao longo do ciclo produtivo, mas que pode ser intensificado pelo processo de pastejo. A remoção de parte do dossel vegetativo das plantas forrageiras, com redução do índice de área foliar (IAF), desencadeia processos de renovação foliar com consumo de fotoassimilados gerados no IAF residual, o que concomitantemente estimula a emissão de novas raízes no solo para manutenção e promoção do crescimento da parte aérea (FRANK; KUNS; GUIDO, 2002; CONTE et al., 2011; ANGHINONI et al., 2015; LÓPEZ-MÁRSICO et al., 2015). Entretanto, quando o pastejo não mantém IAF residual, ocorre consumo de reservas energéticas presentes em tecidos radiculares para a estimulação da renovação foliar, o que diminui gradativamente a quantidade de raízes no solo, atrasa o rebrote inicial da planta após o pastejo (SBRISSIA et al., 2017) e compromete o desenvolvimento da planta forrageira (SILVA et al., 2014).

Nas pastagens naturais com predomínio de plantas com hábito de crescimento cespitoso, com formação de touceiras, o pastejo modifica a dinâmica da estrutura da comunidade vegetal, e quando bem manejado promove a diversificação de espécies de plantas (DIAS FILHO;

FERREIRA, 2008; ANDRADE et al., 2016; KOCH et al., 2016). As touceiras são aglomerados de perfilhos que formam unidades fisiológicas integradas, onde há compartilhamento dos recursos do meio (água, luz, oxigênio e nutrientes) e fotoassimilados. Os locais de entre touceiras da comunidade de plantas são locais estimulados pelo pastejo devido a maior entrada de luz na base do dossel das plantas em função da remoção de folhas e redução periódica do IAF das plantas superiores. Isso permite o aparecimento e crescimento de outras espécies nestes locais e promove maior agrupamento dos perfilhos no formato de touceiras como também um processo de divisão das touceiras na área com o intuito de otimização na captação de recursos (ZANELLA, 2019), o que altera espacialmente a quantidade e tipologia das raízes.

As raízes apresentam capacidade de alterar a estrutura do solo, pois atuam na estabilização de agregados e formação de macroporos contínuos, que regulam os processos de movimentação de ar e água (RABOT et al., 2018) e conseqüentemente a funcionalidade e fertilidade do solo (COLOMBI et al., 2017). A promoção de maior biomassa radicular e a deposição de fezes e urina no solo favorecem a formação de dois *hotspots* importantes, a rizosfera e a detritosfera, respectivamente, locais com aumento da abundância e diversidade de microrganismos, que conseqüentemente tem suas taxas de processo aumentadas. Isso favorece a ciclagem de nutrientes (AARONS; O'CONNOR; GOURLEY, 2004; BLANK; SVEJCAR; RIEGEL, 2006) e melhorias na fertilidade biológica do solo e conseqüentemente estrutural (KUZYAKOV; BLAGODATSKAYA, 2015), na qual fungos micorrízicos apresentam papel determinante na melhoria da micro e macro estrutura do solo (GRAF; FREI, 2013). Alguns organismos da macrofauna, como minhocas e besouros coprófagos, se beneficiam do material orgânico excretado pelos animais (EVANS et al., 2019), criam galerias no solo e estimulam os processos ligados a aeração e movimentação de água.

Os efeitos diretos e indiretos do pastejo sobre a estrutura do solo são simultâneos e podem apresentar interação. A alteração da estrutura pelas plantas e organismos ocorre nas regiões do perfil abrangidas pelas plantas e ocupadas pelos organismos, o que torna os efeitos indiretos do pastejo tanto superficiais quanto subsuperficiais, e isso pode colaborar para mitigação do efeito direto do pisoteio na superfície do solo através da escarificação biológica pelas raízes (SILVA et al., 2014). Por outro lado, o rearranjo da estrutura pelo pisoteio também pode ocasionar maiores dificuldades para o crescimento radicular na superfície do solo.

### 2.3 ALTURA DO PASTO COMO “REGULADORA” DOS EFEITOS DO PASTEJO SOBRE O SOLO

A altura do pasto equilibra e dita a intensidade dos efeitos do pastejo na qualidade do solo. É uma ferramenta de manejo utilizada para equilibrar o ganho de peso animal com o desempenho das plantas e conservação do solo e que pode servir para exploração de propriedades emergentes e benefícios aos diferentes componentes do sistema (solo-planta-animal) através do sinergismo (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013; CARVALHO et al., 2018). A severidade de desfolha é uma prática de manejo que promove o equilíbrio entre o consumo animal e desempenho da planta forrageira apenas, e indica a proporção de altura da planta removida pelo pastejo em relação à altura inicial. Um valor de 40-50% de severidade é tido como base nos diversos sistemas de produção com pastagens, que pode variar para mais ou para menos dependendo da espécie de planta (DA SILVA; SBRISSIA; PEREIRA, 2015; SBRISSIA et al., 2017). A dificuldade é conhecer a altura inicial de referência para cada espécie forrageira, que apresentam diferentes hábitos de crescimento, porte, distribuição espacial de tecidos, etc. Por isso há necessidade de realização de protocolos experimentais de longo prazo para testes de reposta.

Os benefícios do pastejo à qualidade do solo no ambiente da pastagem ocorrem quando o crescimento de raízes e atividade biológica são intensificados, sem um efeito danoso do pisoteio na superfície do solo. Entretanto, dentro do equilíbrio entre produção de carne e conservação do solo, moderados níveis de alteração no rearranjo da estrutura superficial do solo são toleráveis e por vezes até benéficos às plantas devido ao aumento na retenção e disponibilidade de água (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007), desde que não seja comprometida a continuidade do sistema macroporoso. Solos marginais, de baixa fertilidade natural ou degradados pelo manejo, são os que adquirem as maiores melhorias relativas pelo pastejo quando este é bem conduzido. Já em pastagens naturais de altitude, o elevado conteúdo de carbono (KLUG, 2014) e raízes presentes naturalmente acabam, possivelmente, se sobrepondo a qualquer situação de manejo nas melhorias da qualidade do solo. Nestas condições, o manejo deve apenas evitar a degradação e manter a produção animal equilibrada com manutenção das funções do solo.

Os efeitos negativos do pastejo à estrutura do solo ocorrem quando são mantidas baixas alturas do pasto, que superam a capacidade de suporte das plantas forrageiras e comprometem o rebrote e renovação radicular das plantas (BLANK; SVEJCAR; RIEGEL, 2006; SILVA et al., 2014). A menor oferta de forragem e conseqüente menor quantidade de massa vegetal na



superfície do solo dissipa menos a carga gerada pelo pisoteio (LEÃO et al., 2004; REICHERT et al., 2016b) e aumenta o deslocamento animal na área, a superfície de pisoteio e consequentemente o potencial de compactação do solo (PALHANO et al., 2006), principalmente nas regiões de entre touceiras da comunidade de plantas, locais preferenciais para caminhamento dos bovinos em pastagens com presença de espécies cespitosas.

A altura do pasto age de forma diferente na qualidade estrutural do solo dependendo do sistema de pastejo utilizado, sendo o contínuo e o rotacionado os mais comuns. No sistema de pastejo contínuo ocorre a liberação dos bovinos em área total durante todo o período de crescimento da pastagem, de modo a utilizar determinada carga animal para manutenção de uma respectiva altura do pasto ou oferta de forragem. Sob este sistema os únicos trabalhos no sul do Brasil que avaliaram o efeito do pastejo bovino no solo sob pastagem natural foram realizados, por Bertol et al., (1998), Salton et al., (2008), Conte et al., (2011) e Martins e Denardin (2019).

No sistema de pastejo rotacionado as áreas são divididas em piquetes e os animais submetidos à circulação de um piquete para outro, de modo a estabelecer uma altura da pastagem para entrada animal para pastejo e uma determinada severidade de desfolha. Os piquetes são submetidos à um período de repouso após cada pastejo que é proporcional a taxa de crescimento das plantas, o que pode gerar benefícios em termos da maior homogeneidade de desfolha mas não altera a produção forrageira e animal na área (BRISKE et al., 2008). Devido à maior concentração da carga animal por unidade de área, é mais prejudicial ao solo comparativamente ao sistema contínuo em pastagem plantada (LEÃO et al., 2004). No entanto, ainda não existem trabalhos que demonstram os efeitos em pastagem natural.

De acordo com a altura do pasto ou oferta de forragem são criadas as diferentes intensidades de uso (sobrepastejo, pastejo moderado e subpastejo), sendo na faixa “moderada” esperados benefícios e sinergismo do pastejo com a qualidade do solo (DAI et al., 2019). Em sistemas integrados de produção agropecuária no sul do Brasil o manejo das pastagens de inverno (*Avena sativa* e *Lolium multiflorum*) considerado moderado e benéfico à qualidade do solo estabelece uma altura de 20-30 cm sob sistema de pastejo contínuo (ANGHINONI et al., 2015), e em pastagens naturais no Pampa Sulino uma oferta de forragem entre 8 e 12% (BERTOL et al., 1998; SALTON et al., 2008; CONTE et al., 2011; MARTINS; DENARDIN, 2019). Já uma altura considerada moderada para os campos de altitude ainda não foi estabelecida, o que leva os pecuaristas a manejarem os campos sob baixas alturas com o intuito de aumento de produção animal, o que possivelmente pode levar a degradação da estrutura do solo e inviabilizar a atividade pecuária ao longo do tempo.

### 2.3.1 Importância do manejo da pastagem natural em ambiente de altitude

A carência de informações sobre o correto manejo das pastagens naturais de altitude, tendo em vista a otimização da renda e a conservação do ambiente, promove a subutilização ou sobreutilização do ecossistema e ocasiona substituição das pastagens por lavouras e florestas plantadas. Assim, é necessário o estudo da influência do manejo destas pastagens sobre o pasto, o animal e o solo, para manter a renda dos pecuaristas acima do nível de reprodução social e também a conservação do ambiente.

O dreno e sequestro de carbono é uma função importante que o solo exerce e que pode ser promovido pelo pastejo devido ao aumento da ciclagem de carbono no sistema sob correto manejo da pastagem (CONANT; PAUSTIAN; ELLIOTT, 2001; WATERS et al., 2017; ORGILL et al., 2018). Este é um dos aspectos discutidos quanto a importância da manutenção das pastagens naturais e dos animais neste ecossistema para o equilíbrio e promoção das funções do solo. Assim, o manejo se torna ainda mais importante nas pastagens de altitude devido à elevada quantidade de carbono presente naturalmente no solo (KLUG, 2014) também devido as baixas temperaturas. Nessa condição, a taxa de decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos diminui, o que torna imprescindível a manutenção dessas pastagens em detrimento de substituição por florestas e cultivos de grãos, que comprometem a manutenção do carbono no solo (KLUG, 2014).

O correto manejo da pastagem é importante para a diminuição da utilização das queimadas em pastagens naturais, utilizada culturalmente pelos agricultores com o intuito de eliminar o material morto pelas geadas durante o inverno e promover o rebrote antecipado das forrageiras, como também eliminação de espécies indesejáveis (ZANINI; SBRISSIA, 2012). O uso das queimadas nas pastagens não é uma recomendação técnica e é uma prática contestada cientificamente pelos impactos ambientais na biodiversidade e principalmente por deixar o solo temporariamente exposto, aumentar a suscetibilidade ao processo erosivo pela chuva e enxurrada (BERTOL et al., 2011), promover a perda de carbono do sistema (WATERS et al., 2017) e diminuir da produtividade da pastagem a médio e longo prazo (HERINGER; JACQUES, 2004).

## 2.4 DEGRADAÇÃO DA ESTRUTURA SOLO SOB PASTEJO E INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA

A degradação da estrutura do solo sob pastejo, estimulada por estratégias de manejo que estabelecem alturas do pasto abaixo do mínimo necessário para a conservação do solo (CONTE et al., 2011; CARVALHO et al., 2018), ocorre de maneira gradativa. Inicialmente poros de maior tamanho tem seu volume diminuído e apresentam formato tortuoso. Posteriormente, ocorre a perda de continuidade e conectividade (JÉGOU et al., 2002), o que compromete processos físicos do solo como infiltração de água (LANZANOVA et al., 2007; KUSUMOTA BONINI et al., 2011), fluxo de gases (KUNCORO et al., 2014), estabilidade de agregados (BEUTLER et al., 2005) e atividade biológica do solo e das plantas (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Este processo está relacionado à taxa de lotação animal, condicionada pela altura e crescimento do pasto. O pisoteio gera compactação apenas em pontos isolados, devido o contato dos cascos com o solo. Porém, um elevado número de animais faz estender essa área de contato e comprometer os processos globais do solo na pastagem.

As plantas podem ter seu crescimento e desenvolvimento restringidos pela compactação do solo, que compromete a disponibilidade de água e ar e eleva a resistência à penetração (RP) do solo à níveis críticos (LETEY, 1985). Assim, a compactação afeta uma das principais funções ecossistêmicas do solo, que é a manutenção de elevada diversidade de espécies. Isto prejudica, principalmente, as espécies mais vulneráveis à compactação do solo, pois seleciona as espécies mais adaptadas e conseqüentemente desequilibra a comunidade vegetal.

A RP decorre da resistência da matriz do solo à ruptura, e varia com a umidade e  $D_s$ , sendo variável no espaço e no tempo. O aumento da  $D_s$  aumenta a coesão entre as partículas devido a aproximação física, o que faz a RP aumentar. A umidade apresenta um impacto ainda maior na coesão, e faz aumentar exponencialmente a RP com a diminuição da umidade (CERQUEIRA SILVEIRA et al., 2010).

A RP é importante para detectar camadas impeditivas ao crescimento das plantas. Em condições de campo há dificuldade em relacionar valores críticos ao desempenho das plantas, mas comumente são utilizados valores de 2 a 3 MPa como referências para início de inibição do crescimento. No entanto, as plantas se aproveitam de bioporos e de regiões com menor resistência, visto a capacidade de modulação de seu sistema radicular. A umidade elevada do solo também aumenta a pressão hidrostática nas células da coifa (BENGOUGH et al., 2011), o que faz aumentar a capacidade das plantas em romperem camadas impeditivas com valores elevados de RP.

O equilíbrio entre disponibilidade de ar e água no solo é regulado pela umidade e pela estrutura. A porosidade de aeração é uma propriedade relacionada à capacidade do solo em disponibilizar oxigênio às plantas e representa o volume de poros livres de água. Comumente é considerado um valor crítico de 10% de espaço aéreo no solo, visto que abaixo disso a renovação de gases no solo é comprometida devido à perda de continuidade e isolamento dos poros de maior tamanho (XU; NIEBER; GUPTA, 1992), o que diminui o oxigênio às plantas e aumenta os gases tóxicos. A diminuição do volume de água no solo favorece a aeração, porém pode comprometer a disponibilidade de água às plantas quando a umidade ficar próxima ou abaixo do ponto de murcha permanente. Por outro lado, a umidade elevada, acima da capacidade de campo, compromete a aeração. A estrutura do solo com equilibrada distribuição de poros (macro, meso e microporos) apresenta papel determinante na manutenção dos processos e pode minimizar o efeito de condições críticas de umidade, de forma a ampliar a faixa de umidade em que há equilíbrio dos processos de aeração e disponibilidade de água no solo. Macroporosidade mínima de 10%, por exemplo, garante que mesmo em condição de elevada umidade do solo há volume suficiente de poros para manter a movimentação de ar.

A capacidade das restrições físicas do solo está relacionada aos fatores físicos que atuam diretamente no crescimento e desenvolvimento das plantas, porém a intensidade com que estes fatores afetam as plantas depende da rusticidade das espécies e da umidade do solo (KAISER et al., 2013). A água no solo regula os fatores (água, ar, RP) de forma dinâmica diante dos ciclos de umedecimento e secagem e afeta as plantas de acordo com o tempo de permanência e fase do ciclo que as plantas são submetidas às restrições físicas (KAISER, 2010). Plantas submetidas à elevados níveis de compactação do solo podem não ter seu desempenho afetado quando a distribuição pluviométrica durante o ciclo produtivo se manter equilibrada, bem como quando a funcionalidade do sistema macroporoso não for comprometida (CAVALIERI et al., 2009). Isso é comum em pastagens perenes devido ao não revolvimento do solo e elevada atividade de organismos e raízes, que mesmo com a consolidação do solo, a integridade e a continuidade do sistema macroporoso não é comprometida (COLOMBI et al., 2017).

Em pastagens perenes espera-se menor efeito da intensidade das limitações físicas comparativamente a ambientes com culturas anuais. As plantas perenes apresentam vasto sistema radicular e aproveitam a variabilidade espacial das condições físicas (KLEIN et al., 2016) e os períodos de maior umidade para renovação radicular. As plantas apresentam capacidade de modulagem das raízes nas regiões de crescimento e lubrificação das partículas de solo por substâncias mucilaginosas nas regiões de crescimento (BENGOUGH; KIRBY, 1999). Isto diminui a coesão, favorece a passagem por camadas impeditivas e faz as raízes

abrangerem regiões externas e internas dos agregados quando os fatores físicos de crescimento e desenvolvimento são críticos apenas por curto período (KAISER et al., 2013).

A  $D_s$  é uma das propriedades mais utilizadas para indicar a qualidade física do solo. Valores de 1,3 a 1,4  $\text{Mg m}^{-3}$  para solos argilosos e 1,4 a 1,5  $\text{Mg m}^{-3}$  para solos franco argilosos são considerados críticos para a funcionalidade do solo e o crescimento e desenvolvimento das plantas (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). No entanto, estes valores devem servir apenas como indicativo geral das condições físicas do solo, uma vez que as plantas respondem aos processos do solo relacionados à disponibilidade de água e ar, que podem não ser comprometidos mesmo sob elevados valores de densidade.

A estabilidade de agregados é uma propriedade que remete à qualidade de integridade das unidades estruturais do solo e representa a resistência dos agregados à desagregação por uma força externa. A microestrutura do solo está relacionada as ligações entre argilominerais e matéria orgânica, já a macroestrutura à atividade de raízes, fungos e demais organismos do solo. A compactação do solo também cria unidades estruturais resistentes à desagregação (KLEIN, 2006) e pode causar conclusões equivocadas sobre a qualidade do solo quando apenas esta propriedade é avaliada. Assim, é necessário relacionar o estudo da distribuição de tamanho de poros no solo com as demais propriedades que contemplem um máximo equilíbrio dos processos físicos do solo.

O grau de compactação (GC) é um indicador de qualidade física do solo comumente utilizado para relacionar a estrutura do solo com as plantas (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; SUZUKI; REICHERT; REINERT, 2013), que representa a relação entre a  $D_s$  avaliada em campo com a densidade máxima do solo. Dessa relação, valores entre 80 e 90% são considerados ótimos para as plantas, onde existe um máximo equilíbrio entre disponibilidade de água e aeração no solo. No entanto, o GC com seus limites estabelecidos principalmente para culturas agrícolas anuais, pode não representar a qualidade do solo sob pastejo nos campos de altitude, visto o longo período de adaptação das espécies às condições naturais do solo. Entretanto, quando associado a outros indicadores, pode ser importante na avaliação da compactação do solo e quantificação do adensamento nas camadas mais superficiais. Sem a mobilização mecânica ou revolvimento, o solo passa por processos de aumento da consolidação do solo e diminuição da porosidade, seja por tensões internas entre as diferentes camadas, seja por dispersão natural da argila com migração e acomodação das partículas de menor tamanho nos espaços entre as demais partículas, especialmente em solos de textura média com proporção de areia, silte e argila semelhante (FORSYTHE, 1975).

A infiltração de água no solo pode ser considerada como a principal indicadora da qualidade física do solo, pois é um processo dependente da quantidade, continuidade, estabilidade e extensão da rede de macroporos no solo, e que por meio da interação destes fatores aparece como uma característica emergente do sistema (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Em áreas sob pastejo, a compactação pelos bovinos pode diminuir a infiltração de água no solo (AMBUS et al., 2018) e conseqüentemente promover o escoamento superficial e o potencial de erosão do solo.

Para avaliação dos efeitos do pastejo na qualidade do solo e no estado de degradação é importante considerar e avaliar a resistência e principalmente a resiliência do solo, as quais são características de cada solo e sistema de manejo. A resistência do solo se refere a sua capacidade de resistir à um distúrbio, já a resiliência a capacidade do solo em se recuperar de um distúrbio, seja voltando ao estado inicial ou a um novo estado de equilíbrio funcional. Um solo sob determinado sistema de manejo somente é considerado degradado quando perde totalmente sua capacidade de resiliência e conseqüentemente suas funções dentro de cada ecossistema.

A resistência e resiliência do solo são naturalmente maiores em pastagens perenes comparativamente a pastagens plantadas devido ao não revolvimento e mobilização do solo (SHAHAB et al., 2013), visto que estas práticas mecânicas tornam o solo mais suscetível à degradação pelo pastejo. Em pastagens naturais de altitude outro fator que influencia ainda mais estas características do solo é o alto teor de carbono (KLUG, 2014), devido sua ação cimentante e propriedades elásticas (BRAIDA et al., 2008), que atuam na integridade da estrutura do solo e conseqüentemente condicionam a resistência e resiliência do sistema.

Para avaliação da manifestação da resiliência do solo é imprescindível a avaliação de indicadores de qualidade do solo no tempo. Como o pisoteio afeta a camada mais superficial do solo, os ciclos de contração e expansão devido aos ciclos de umedecimento e secagem do solo e elasticidade da matéria orgânica podem atuar na reorganização das partículas do solo e conseqüentemente recuperação física (DE ANDRADE BONETTI et al., 2017). Ito é mais intenso na superfície do solo, e faz com que o pastejo animal, quando ocorre período de descanso ou hibernar da pastagem, compacte apenas temporariamente a superfície do solo (AMBUS et al., 2018), sem comprometer as funções ao longo do tempo.

### 3 HIPÓTESE

Nas pastagens naturais de altitude com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), o pastejo bovino não degrada a estrutura de um Cambissolo Húmico quando a altura do pasto para início de pastejo for entre 20 e 36 cm. Estas alturas do pasto mantêm a funcionalidade da rede de macroporos do solo semelhante as áreas de exclusão ao pastejo. Já uma altura de pasto de 12 cm rompe a capacidade de resistência do sistema e afeta maleficamente a funcionalidade da estrutura do solo logo após o pastejo no estrato entre touceiras da comunidade de plantas, local preferencial de caminhamento dos bovinos em pastejo. A altura de pasto de 12 cm fica abaixo do mínimo necessário para equilibrar a produção animal com a conservação do solo. Entretanto, o período de repouso de inverno da pastagem, de aproximadamente quatro meses, é suficiente para manifestar a capacidade de resiliência do solo e mitigar os efeitos danosos da altura de pasto de 12 cm na estrutura do solo.





## 4 OBJETIVOS

### 4.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito do pastejo bovino na estrutura de um Cambissolo Húmico, sob diferentes alturas do pasto de uma pastagem natural de altitude com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees).

### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Avaliar o efeito das alturas do pasto na estrutura do solo comparativamente a uma área de exclusão ao pastejo.
- ii. Avaliar o efeito da altura do pasto na variabilidade espacial da estrutura do solo nos estratos de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas;
- iii. Avaliar o efeito do período hibernal de inverno da pastagem, de aproximadamente quatro meses, na manifestação da capacidade de resiliência do solo.



## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

O presente estudo foi realizado no ano de 2018 em protocolo experimental iniciado no ano de 2015, junto a uma área experimental da EPAGRI (Empresa de pesquisa agropecuária e extensão rural de Santa Catarina), no município de Lages/SC. As coordenadas do experimento são 27°47'55'' S e 50°19'25'' O, com altitude média de 922 m. O protocolo experimental é conduzido para estudos dos diferentes componentes do ecossistema (solo-planta-animal). O clima da região é Cfb segundo a classificação de Köppen, e o solo é classificado como Cambissolo Húmico Alumínico típico (EMBRAPA, 2018), de textura franco argilosa (ANEXO A).

O delineamento experimental é de blocos ao acaso com quatro tratamentos e quatro repetições (Figura 2). Os tratamentos são diferentes alturas do pasto para início de pastejo: 12, 20, 28 e 36 cm. O sistema de pastejo é rotacionado com 40% de severidade de desfolha da altura inicial, tendo o capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees) como forrageira predominante e de referência na área do experimento. A área total do protocolo tem 14.000 m<sup>2</sup>, e cada unidade experimental 875 m<sup>2</sup>. Além dos tratamentos com diferentes alturas do pasto foi mantida uma área de exclusão ao pastejo, para manter a evolução natural da dinâmica da vegetação neste local ao longo do tempo, sem qualquer intervenção antrópica, e que serve como referência para avaliar o impacto do pastejo sobre a qualidade estrutural do solo.

Os pastejos durante o ano ocorrem de outubro a maio aproximadamente, visto que o *A. lateralis* tem seu crescimento cessado no período de inverno devido às baixas temperaturas e formação de geada. Os bovinos que são utilizados para rebaixamento do pasto são liberados em cada unidade experimental quando é atingida a altura de pré pastejo e retirados quando é atingida a altura residual, o que ocorre cerca de 4 a 5 dias após iniciado o pastejo em cada parcela. É utilizada uma carga animal instantânea de quatro animais com massa média de 600 kg em cada parcela, o que equivale a 5,3 UA (unidade animal como massa de 450 kg). O intervalo entre períodos de pastejo dentro de cada temporada é calculado pelo tempo médio necessário para que, após a saída dos animais, a pastagem atinja novamente a altura de pré pastejo e se inicie o pastejo sucessivo, o que gera diferentes frequências ou número de pastejo por ano em cada altura do pasto. O período de ocupação é referente ao tempo entre a entrada dos animais para pastejo, no primeiro pastejo da temporada, e a saída dos animais de pastejo do último pastejo da temporada, em cada altura do pasto. A taxa de lotação animal no período de

ocupação é calculada pela divisão da carga instantânea pelo período de ocupação (dias), o qual variou para cada altura do pasto. A carga anual é a divisão da carga instantânea para um período de 365 dias, em todas as alturas do pasto (Tabela 1).

Figura 2 - Vista do delineamento experimental, em blocos ao acaso com quatro tratamentos e quatro repetições, iniciado no ano de 2015. Os tratamentos são diferentes alturas do pasto para início de pastejo (12, 20, 28 e 36 cm), em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees). Ao lado do delineamento foi mantida uma área de exclusão ao pastejo.



Fonte: Júnior, 2017

Tabela 1 - Valores médios de frequência de pastejo, intervalo entre pastejos, período de ocupação e de taxa de lotação animal sob as diferentes alturas de pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees). UA: Unidade animal (450 kg de peso vivo).

Altura do pasto (cm)	12	20	28	36
Pastejo na temporada/Frequência (pastejo ano <sup>-1</sup> )	5,75	3,75	2,75	1,75
Intervalo entre pastejos (dia)	34	50	66	79
Período de ocupação (dia)	191	143	121	87
Taxa de lotação pelo tempo de ocupação (U.A ha <sup>-1</sup> )	8,6	6,9	6,0	7,4
Taxa de lotação anual (U.A ha <sup>-1</sup> )	4,5	2,7	2,0	1,8

Antes e após cada pastejo é avaliada a altura média das touceiras do *A. lateralis* (predominante no estrato superior da comunidade de plantas), em 40 pontos divididos em quatro transectas de 10 pontos. A altura das espécies presentes no estrato entre touceiras (estrato inferior da comunidade de plantas) é medida aleatoriamente em 20 pontos dentro de cada parcela. Antes e após cada pastejo também é avaliada a massa de forragem total, representada pelo somatório do *A. lateralis* e das demais espécies, com a utilização de quadros delimitadores de 0,25 m<sup>2</sup>. Esses quadros são arremessados em 20 pontos em cada parcela para realização de estimativas visuais. Em quatro pontos são realizados cortes para determinação da massa seca total em estufa a 55°C por 72 horas, que são usados para geração de regressões de ajuste para as estimativas visuais. Também foi realizada a quantificação da massa de forragem total presente na área de exclusão ao pastejo ao final dos ciclos de pastejo da temporada 2017/2018, com cortes da massa vegetal rente ao solo em diferentes locais da área. Os valores médios da altura dos diferentes estratos da comunidade de plantas e massa e resíduo de forragem seguem na Figura 3. Na Figura 4 segue imagens dos bovinos em pastejo nas diferentes estruturas da comunidade plantas condicionadas pela altura do pasto.

Figura 3 - Valores médios da altura de pré e pós pastejo do pasto no estrato superior (A) e inferior (B) da comunidade de plantas, e massa e resíduo de forragem (C), sob diferentes alturas de pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees). AE: Área de exclusão ao pastejo; MF: Massa de forragem; RF: Resíduo de forragem.

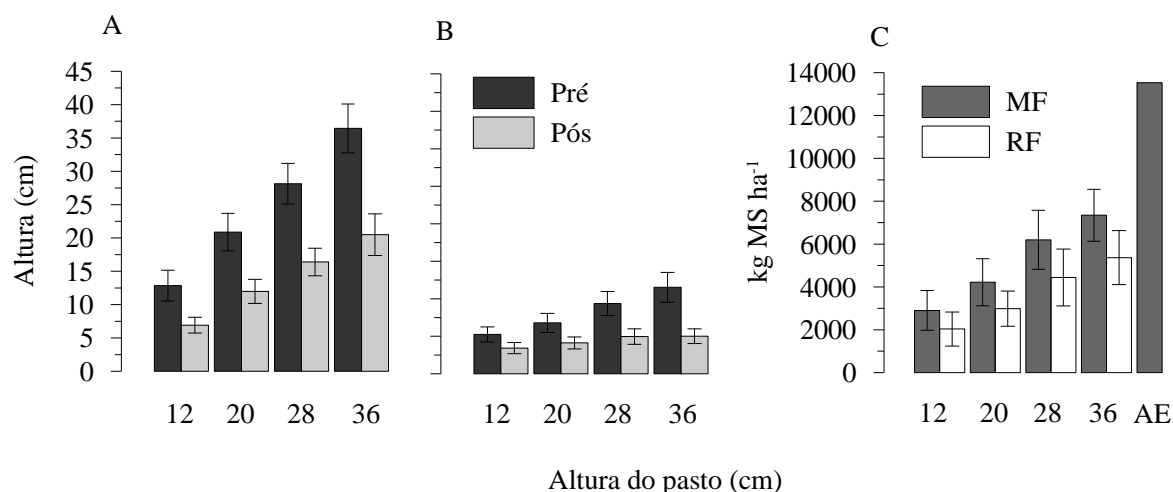




Figura 4 - Vista de bovinos em pastejo sob diferentes alturas do pasto (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), em sistema de pastejo rotacionado com 40% de severidade de desfolha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

## 5.2 AVALIAÇÕES REALIZADAS NO SOLO

Avaliou-se a qualidade estrutural do solo em dois momentos: o primeiro, logo após cessarem os pastejos da temporada de 2017 a 2018 (pós pastejo), no mês de junho; e o segundo após o período de inverno (pós inverno), no mês de outubro. Após o pastejo foram avaliados parâmetros físicos do solo nas regiões de touceira e de entre touceiras da comunidade de plantas. Na touceira foi avaliada a densidade e distribuição de poros e na entre touceiras avaliada a densidade e distribuição de poros, estabilidade de agregados, infiltração de água e conteúdo de carbono e nitrogênio. Na região da entre touceiras foram realizadas avaliações de todos os parâmetros pelo fato de ser o local preferencial de caminhamento dos animais. No período de pós inverno estas avaliações foram realizadas novamente, com exceção do conteúdo de carbono e nitrogênio do solo. Com o intuito de relacionar a qualidade da estrutura do solo com as plantas, também foi realizado o ensaio de Proctor Normal para obtenção da densidade máxima do solo

e grau de compactação, e avaliou-se a resistência do solo a penetração após o período de inverno, no início da retomada do crescimento das plantas. Um esquema com os parâmetros avaliados em cada época e local de avaliação, bem como número de pontos amostrados, segue na Tabela 2.

Tabela 2 - Esquemática das avaliações realizadas no solo em cada época e local de avaliação, bem como o número de repetições realizadas. O experimento é sob pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees). O delineamento é de blocos ao acaso com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos são alturas do pasto para início do pastejo (12, 20, 28 e 36 cm). UE: Unidade experimental; Touc: Touceira; E.touc: Entre touceiras.

Época	Avaliação	Local	Camada (cm)	Pontos em cada UE	Amostra/leitura em cada ponto/camada
Pós pastejo (06/2018)	Densidade e porosidade	Touc	0-5, 5-10,	3	1
		E.touc	10-15 e 15-20	3	1
	Agregados	E.touc	0-10 e 10-20	2	1
	Carbono e Nitrogênio	E.touc	0-10 e 10-20	2	1
	Infiltração de água	E.touc	-	3	-
Pós inverno (10/2018)	Densidade e porosidade	Touc	0-5, 5-10,	3	1
		E.touc	10-15 e 15-20	3	1
	Agregados	E.touc	0-10 e 10-20	2	1
	Infiltração de água	E.touc	-	3	-
	Resistência à penetração	Touc	0-30	1	2
E.touc		0-30	1	4	

O último pastejo dos animais na temporada de 2017/2018 ocorreu na primeira quinzena do mês de junho. Logo em seguida, foram iniciadas as coletas e avaliações. As amostragens e avaliações foram realizadas em cada bloco no mesmo dia. As avaliações de pós inverno ocorreram entre final de outubro e início de novembro, e neste período também foram respeitados os blocos para amostragem e procedimentos laboratoriais.

**Densidade do solo e distribuição de diâmetro dos poros:** Em cada período de avaliação foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada com anéis de aço inox de 5 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro nas camadas 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm e em três pontos por parcela, nas regiões de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas. Os dois locais da comunidade de plantas foram amostrados lado a lado em cada ponto. Num total foram coletados seis anéis em cada camada dentro de cada unidade experimental. Na área de exclusão foram coletados o mesmo número de amostras que em cada unidade experimental, porém sem divisão de estrato de touceira e entre touceiras, que não existe na área sem pastejo. Contabilizando os dois períodos de avaliação, foram coletadas um total de 816 amostras. A densidade do solo e a distribuição de poros por diâmetro (bioporosidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total) foram determinadas de acordo com metodologia descrita em Embrapa (2017). A porosidade total calculada utilizando-se a densidade média das partículas do solo ( $2,63 \text{ Mg m}^{-3}$ ), com a equação 1, e a bioporosidade e macroporosidade por meio de tensões de 10 e 60 cm, respectivamente, em mesa de tensão de areia.

$$Pt = 1 - \frac{Ds}{Dp} \quad (1) \text{ onde,}$$

Pt : Porosidade total ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )

Ds: Densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ )

Dp: Densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ )

**Estabilidade de agregados:** Foram coletados monólitos de solo em dois pontos por parcela nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade nas regiões de entre touceiras da comunidade de plantas. Estes monólitos foram mobilizados manualmente para separação dos agregados com diâmetro entre 4,75 e 8 mm. Os agregados selecionados foram utilizados para a avaliação da estabilidade via agitação e peneiramento em água, com utilização de peneiras de 4,75, 2, 1 e 0,25 mm de malha, de acordo com método de Kemper e Chepil (1965). Para análise dos dados foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP).

**Conteúdo de carbono orgânico e nitrogênio totais:** Foram utilizadas as amostras de agregados remanescentes da análise de estabilidade de agregados, coletadas em dois pontos em cada parcela nas regiões de entre touceiras da comunidade vegetal. As amostras foram moídas e secas ao ar. Foi utilizado um analisador COT modelo multi/NC 2100, equipado com módulo para sólidos, fabricado pela Analytik Jena AG. Para cada amostra de solo, foi pesado entre 10 e 15 mg em balança analítica com precisão de pesagem de 0,0001g. Após a pesagem, as amostras acondicionadas em cápsulas de quartzo foram inseridas no analisador COT e



aquecidas a temperatura de aproximadamente 900°C por dois minutos. Após a combustão, um sensor de infravermelho detectou a quantidade de dióxido de carbono e óxido nitroso gerado durante a combustão e relacionou estes gases com a quantidade de carbono e nitrogênio elementares existente na amostra.

**Infiltração de água no solo:** Foi utilizado o método dos anéis concêntricos (BOUWER, 1986), em três pontos dentro de cada unidade experimental nas regiões de entre touceiras da comunidade de plantas. Os anéis concêntricos (interno e externo) foram inseridos no solo a uma profundidade de 10 cm, preenchidos com água e então iniciado o teste de infiltração, com manutenção do nível da água variável e acima do nível do solo e realização de leituras em uma régua graduada disposta no interior do anel interno ao longo de um período de 90 minutos, até chegar a uma taxa de infiltração constante. Na área de exclusão a infiltração de água foi avaliada em quatro pontos, em ambos os períodos de avaliação. Num total, no período de pós pastejo e pós inverno, foram avaliados 103 pontos de infiltração de água. Foi utilizado o modelo de Horton (1940) (equação 2) para ajustar-se aos dados. As equações finais ajustadas seguem na Tabela 3.

$$T_i = I_f + (I_i - I_f) e^{-kt} \quad (2) \quad \text{onde,}$$

$T_i$  = taxa de infiltração de água ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$I_f$ : Infiltração final de água ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$I_i$ : Infiltração inicial ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$t$ : Tempo (hora)

$k$ : Parâmetro do modelo

Tabela 3 - Equações de ajuste resultantes da relação entre infiltração de água no solo e tempo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), em diferentes períodos de avaliação (pós pastejo e pós inverno), segundo modelo de Horton (1940). AE: área de exclusão ao pastejo.  $T_i$ : taxa de infiltração ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

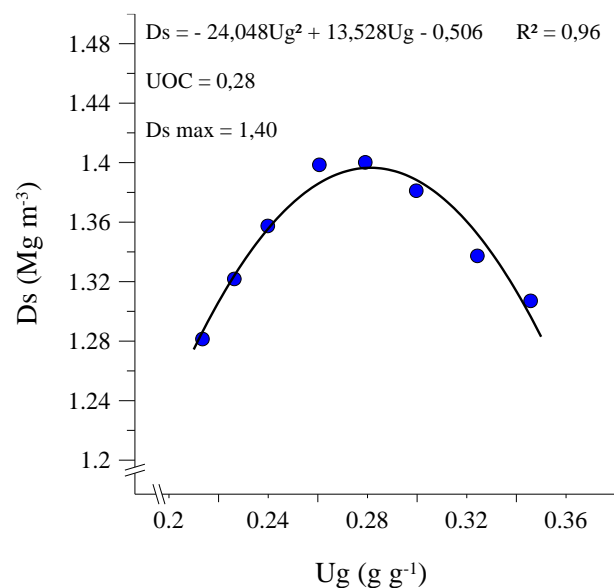
Altura do pasto (cm)	Pós pastejo		Pós inverno	
	equação de ajuste	R <sup>2</sup>	equação de ajuste	R <sup>2</sup>
12	$T_i = 51,3 + (163,8 - 51,3) e^{-11,15t}$	0,90	$T_i = 18,3 + (189,8 - 18,3) e^{-20,06t}$	0,90
20	$T_i = 23,2 + (173 - 23,2) e^{-15,12t}$	0,91	$T_i = 5,5 + (108,3 - 5,5) e^{-20,49t}$	0,91
28	$T_i = 15,2 + (99,5 - 15,2) e^{-13,52t}$	0,94	$T_i = 12,8 + (131,5 - 12,8) e^{-17,52t}$	0,92
36	$T_i = 17,5 + (330,6 - 17,5) e^{-12,56t}$	0,95	$T_i = 7,5 + (160,8 - 7,5) e^{-21,5t}$	0,89
AE	$T_i = 3,2 + (90 - 3,2) e^{-20,47t}$	0,88	$T_i = 4,6 + (98 - 4,6) e^{-19,28t}$	0,90

Conjuntamente com as avaliações de infiltração de água, também foi avaliada a umidade gravimétrica do solo na camada de 0-20 cm no início de cada teste em cada parcela. Foram

coletadas amostras de solo com estrutura deformada com trado holandês na camada de 0-20 cm e secas em estufa a 105°C por um período de 48 horas (EMBRAPA, 2017).

**Densidade máxima do solo e grau de compactação:** Foram realizadas coletas de solo na camada de 0-20 cm em todas as unidades experimentais, o que totalizou aproximadamente 20 kg de solo, que então foi desagregado parcialmente e peneirado em peneira de 4,75 mm. O solo peneirado foi separado em seis a oito sub amostras de 2 kg cada, nas quais foram adicionadas diferentes quantidades de água para estipular uma variação de 2% de umidade entre as amostras, desde o estado de friabilidade do solo até a plasticidade. Estas amostras foram então utilizadas para o teste de Proctor Normal, padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86), em compactador de solo, com aplicação de pressão total de 560 kPa. A curva de compactação segue na Figura 5, e possui este comportamento pelo incremento da umidade do solo no início do teste diminuir a coesão entre as partículas e a água atuar como lubrificante e favorecer a compactação do solo com expulsão de ar dos poros, até chegar a uma densidade máxima, a partir da qual o incremento da umidade favorecer pressões neutras, devido a ocupação dos poros pela água, e comprometer o arranjo das partículas e a compactação. O grau de compactação foi gerado para cada camada e tratamento pela divisão da  $D_s$  pela densidade máxima do solo, com o produto da divisão multiplicado por 100, para obter o valor em porcentagem.

Figura 5 - Curva de densidade do solo ( $D_s$ ) em função da umidade gravimétrica ( $U_g$ ) de um Cambissolo Húmico Alumínico típico na camada de 0-20 cm de profundidade, realizada pelo ensaio de Proctor Normal.  $D_s$  max: Densidade do solo máxima. UOC: Umidade ótima para compactação máxima.



**Resistência do solo à penetração:** Foi avaliada em diferentes condições de umidade do solo, com utilização de um penetrômetro portátil que insere uma haste no solo e realiza leituras de RP a cada 1 cm de profundidade. As leituras foram realizadas até a profundidade de 30 cm em

6 pontos por parcela, separados 10 cm entre si, para abranger regiões da touceira e entre touceiras do *A. lateralis*. Conjuntamente, foi avaliada a umidade do solo em um ponto por parcela, por meio de coletas nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade com trado holandês. Foi determinada a umidade gravimétrica do solo de acordo com metodologia descrita Embrapa (2017).

Para fins de caracterização do solo também foi realizada a análise granulométrica e determinação da densidade de partículas:

**Análise granulométrica:** Foram coletadas amostras de solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm em cada parcela e determinadas as frações de areia, silte e argila pelo método da pipeta, com dispersão mecânica seguida de dispersão química com NaOH, como descrito em Embrapa (2017). Em média, as frações de areia, silte e argila, foram de 32, 31 e 37%, respectivamente, na camada de 0-20 cm, enquadrando-se na classe textural franco-argilosa.

**Densidade de partículas:** Parte do solo coletado para análise granulométrica foi moído, seco ao ar e determinada a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico, que quantifica o volume de álcool necessário para completar um balão volumétrico de volume conhecido contendo cerca de 20 g de solo seco (EMBRAPA, 2017). A densidade média de partículas na camada de 0-20 cm foi de  $2,63 \text{ Mg m}^{-3}$ .

Os dados foram submetidos a análise de variância e comparação de médias pelo teste de tukey ( $p < 0,05$ ) para os tratamentos e teste t Student ( $p < 0,05$ ) para comparação de cada tratamento com a área de exclusão. Para a taxa de infiltração básica de água no solo foi necessária a normalização dos dados, com utilização da escala log decimal.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 DENSIDADE, DISTRIBUIÇÃO DE POROS POR TAMANHO E ESTABILIDADE DE AGREGADOS

As regiões de entre touceiras da comunidade de plantas são os caminhos preferenciais para deslocamento dos bovinos em pastejo, mas não houve influência da altura do pasto na Ds logo após a temporada de pastejo de 2017/2018 nestes locais, independentemente da camada de solo (Tabela 4). No entanto, em todos os tratamentos houve incremento na Ds em profundidade, devido ao adensamento que ocorre em função de processos pedogenéticos e pressões internas que as camadas subsuperficiais recebem das camadas superficiais (REICHERT et al., 2016a). Na porosidade total do solo não houve efeito das alturas do pasto até a profundidade de 15 cm. Entretanto, na camada de 15-20 cm, aumentou o volume total de poros no tratamento de 28 cm em comparação ao de 20 cm. Na microporosidade, houve um maior volume desta classe de poros no tratamento de 28 cm, em comparação ao 12 cm na camada de 5-10 cm, bem como em comparação ao tratamento de 20 cm de altura do pasto na camada de 15-20 cm.

No estrato de entre touceiras da comunidade de plantas, o tratamento de 12 cm aumentou a macroporosidade na camada 10-15 cm e a bioporosidade na camada 0-5 cm, comparativamente ao tratamento de 36 cm. Mesmo havendo diferenças em valores absolutos nas demais camadas, não houve diferença estatística em função da elevada variabilidade que estas classes de poros apresentaram (Tabela 4), proporcionada pela elevada quantidade de raízes, as principais responsáveis pela formação destas classes de poros (SILVA et al., 2016). Em comparação a área de exclusão, que representa uma área livre de pastejo, a Ds na região de entre touceiras foi superior até 5 cm de profundidade nos tratamentos 12, 20, 28 e 36 cm e superior até os 10 cm de profundidade no tratamento de 20 cm. Isso diminuiu a porosidade total do solo, inferindo-se que o pastejo por meio do efeito direto do pisoteio, com pressão distribuída na camada superficial do solo até no máximo 15 cm (LANZANOVA et al., 2007; MOREIRA et al., 2014; SUZUKI et al., 2015; DE OLIVEIRA et al., 2015), ocasionou rearranjo na estrutura do solo nestes locais de caminhamento dos animais.

Tabela 4 - Densidade e distribuição de diâmetro de poros no solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), nas regiões de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas após o período de pastejo de 2017/2018 (mês de junho).

Camada (cm)	Altura do pasto (cm)								Área de exclusão
	Entre touceiras				Touceira				
	12	20	28	36	12	20	28	36	
Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	1,19 A *	1,22 A *	1,17 A *	1,19 A *	1,12 A	1,14 A	1,09 A	1,10 A	1,10
5 - 10	1,27 A	1,31 A *	1,24 A	1,26 A	1,22 A	1,28 A	1,22 A	1,26 A	1,26
10 - 15	1,29 A	1,32 A	1,26 A *	1,29 A	1,25 A *	1,31 A	1,24 A *	1,29 A	1,30
15 - 20	1,30 A	1,34 A	1,28 A *	1,31 A	1,28 A *	1,34 A	1,27 A *	1,31 A	1,32
Porosidade total (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	0,55 A *	0,54 A *	0,56 A *	0,55 A *	0,58 A	0,57 A	0,58 A	0,58 A	0,58
5 - 10	0,52 A	0,50 A *	0,53 A	0,52 A	0,54 A	0,51 A	0,54 A	0,52 A	0,52
10 - 15	0,51 A	0,50 A	0,52 A *	0,51 A	0,52 A *	0,50 A	0,53 A *	0,51 A	0,50
15 - 20	0,51 AB	0,49 B	0,52 A *	0,50 AB	0,51 A *	0,50 A	0,52 A *	0,50 A	0,50
Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	0,45 A *	0,45 A *	0,47 A *	0,48 A	0,47 A *	0,47 A *	0,50 A *	0,47 A *	0,53
5 - 10	0,43 B *	0,44 AB *	0,47 A *	0,45 AB	0,46 A *	0,45 A *	0,48 A	0,46 A *	0,49
10 - 15	0,43 A *	0,43 A *	0,46 A	0,45 A	0,45 A *	0,44 A *	0,46 A	0,45 A *	0,47
15 - 20	0,43 AB *	0,42 B *	0,45 A	0,44 AB	0,45 AB	0,43 B *	0,46 A	0,44 AB *	0,46
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	0,09 A *	0,09 A *	0,08 A *	0,07 A	0,11 A *	0,10 A *	0,09 A *	0,11 A *	0,05
5 - 10	0,09 A *	0,06 A *	0,06 A *	0,07 A *	0,08 A *	0,07 A *	0,06 A *	0,06 A *	0,03
10 - 15	0,08 A *	0,06 AB *	0,06 AB *	0,05 B *	0,08 A *	0,06 A *	0,06 A *	0,06 A *	0,04
15 - 20	0,07 A *	0,07 A *	0,07 A *	0,06 A *	0,07 A *	0,06 A *	0,06 A *	0,06 A *	0,04
Bioporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	0,05 A *	0,04 AB *	0,04 AB *	0,03 B	0,06 A *	0,05 A *	0,04 A *	0,04 A *	0,02
5 - 10	0,04 A *	0,03 A	0,03 A *	0,03 A *	0,04 A *	0,03 A *	0,03 A *	0,03 A *	0,02
10 - 15	0,03 A *	0,03 A *	0,04 A *	0,03 A *	0,04 A *	0,03 A *	0,04 A *	0,03 A *	0,01
15 - 20	0,04 A *	0,04 A *	0,04 A *	0,03 A *	0,03 A *	0,03 A *	0,03 A *	0,04 A *	0,02

Médias com letras distintas, na linha, e para cada local da comunidade de plantas (touceira e entre touceira) diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e médias com asterisco diferem da área de exclusão pelo teste t Student ( $p < 0,05$ ).

Na camada de 10-20 cm no estrato entre touceiras, o tratamento de 28 cm apresentou menor Ds e maior porosidade do solo em comparação a área de exclusão (Tabela 4), o que pode ter ocorrido devido à variabilidade espacial da estrutura do solo ou à maior atividade das raízes do *A. lateralis* em subsuperfície sob influência do pastejo. Os tratamentos pastejados sob 12, 20 e 36 cm na camada de 0-20 cm e o tratamento de 28 cm na camada de 0-10 cm, apresentaram menor microporosidade no estrato de entre touceiras comparativamente a área de exclusão, no entanto, com pequenas variações em valores absolutos, o que não impacta o comportamento funcional do solo relacionado à estas classes de poros.

As alterações na microporosidade estão, possivelmente, relacionadas à promoção da macroporosidade pelo pastejo e consequentemente diminuição da quantidade relativa de microporos. Na camada de 0-5 cm no estrato de entre touceiras, outro fator impactante na microporosidade foi a leve compactação gerada pelo pisoteio, que leva à diminuição do volume de mesoporos, classificados como microporos, e que devem representar um volume relativamente alto da porosidade total devido as características granulométricas deste solo.

O rearranjo do solo pelo pisoteio não comprometeu as classes de macro e bioporos no solo, que inclusive foram promovidas pela diminuição da altura do pasto em algumas camadas e principalmente em relação a área de exclusão. Isso decorreu, possivelmente, devido a intensificação do crescimento e renovação de raízes pelo pastejo (BLANK; SVEJCAR; RIEGEL, 2006; WILSON et al., 2018; DAI et al., 2019), que de acordo com Conte et al. (2011), aumenta linearmente com a diminuição da oferta de forragem em pastagem natural, além da promoção de diversidade de raízes em função do aumento da diversidade de espécies com a diminuição da altura do pasto (ZANELLA, 2019), o que favorece a qualidade do solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). No estrato de entre touceiras do tratamento 36 cm há, possivelmente, baixo número de espécies em função da maior proximidade e sobreposição das touceiras, o que diminui a quantidade de raízes na superfície do solo até 5 cm de profundidade e não altera o sistema poroso do solo comparativamente a área de exclusão nestes locais. Já em profundidade, o aumento da macro e bioporosidade no tratamento de 36 cm pode estar ligado à estimulação do crescimento de raízes laterais do *A. lateralis*.

O suprimento de oxigênio às plantas é um fator diretamente atuante no crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo a macroporosidade um indicador da qualidade estrutural do solo relacionada a esta função (COLOMBI et al 2017). O valor de  $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  de volume de macroporos é comumente utilizado para indicar um limite crítico para a movimentação de gases no solo, em função da perda de continuidade dos poros de maior tamanho no perfil de solo abaixo deste valor crítico de macroporosidade ou aeração (XU; NIEBER; GUPTA, 1992).

Verificamos valores de macroporosidade abaixo de  $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  até a profundidade de 20 cm nas regiões de entre touceiras e na camada de 5-20 cm nas regiões de touceira do *A. lateralis*, independentemente da altura do pasto. Esta baixa presença de macroporos é natural devido as características do solo em estudo, com distribuição de frações de areia, silte e argila semelhantes (32, 31 e 37%, respectivamente), o que gera acomodação destas partículas com baixa presença de poros de maior tamanho, como também verificado por Bortolini et al. (2016) em um Cambissolo Húmico sob pastejo bovino em diferentes ofertas de forragem. No entanto, como não são praticadas operações de mobilização ou revolvimento do solo nestas áreas, a

continuidade de poros formados por raízes se sobrepõe à quantidade absoluta de macroporos para suprimento de oxigênio às plantas (COLOMBI et al., 2017), que são naturalmente adaptadas à esta condição do solo e também se beneficiam do espaço aéreo formado nos poros intermediários (mesoporos) nos períodos de secagem do solo.

Na região de touceira do *A. lateralis* também não houve um efeito da altura do pasto na Ds após o pastejo, visto que não ocorre pisoteio frequente nestes locais, o que mantém a Ds semelhante à área de exclusão até os 10 cm de profundidade. Já nas camadas de 10-15 e 15-20 cm, os tratamentos de 12 e 28 cm apresentaram menor Ds e maior porosidade total em comparação à área de exclusão, o que pode estar relacionado à maior atividade de raízes, que apresentam capacidade de escarificação biológica do solo (SILVA et al., 2014). Entretanto, isso deve ocorrer também nas demais alturas do pasto, mas talvez seja necessário um maior tempo de condução do experimento para estimular a diminuição da Ds em todos os tratamentos pastejados.

A resistência do solo à compactação, que é naturalmente elevada em função dos altos teores de carbono, o qual condiciona aumento na capacidade de suporte de carga e elasticidade do solo (BRAIDA et al., 2008), possivelmente foi promovida pela diminuição da altura do pasto no estrato de entre touceiras, visto a estimulação do crescimento de rizomas e estolões na superfície do solo de espécies como *Paspalum notatum*, *Axonopus compressus* e *Axonopus affinis* (ZANELLA, 2019). As raízes destas plantas ocupam os poros de maior tamanho e impedem o rearranjo dos mesmos pela pressão dos cascos, o que gera apenas diminuição de poros intermediários não ocupados por raízes, não compromete o sistema poroso do solo e permite rápida reagregação após o pastejo (SUZUKI et al., 2015), para a qual o próprio período de intervalo entre os pastejos já pode ser suficiente. Além disso, a massa vegetal destas espécies, com caules e folhas acomodados na superfície do solo, atua na dissipação da carga animal (REICHERT et al., 2016b) e contribuem indiretamente para o aumento da capacidade de suporte de carga do solo (CAPURRO et al., 2014).

A diminuição da altura do pasto, que aumentou a frequência de pastejo e carga animal total, diminuiu a dominância do *A. lateralis*, o que foi observado por Zanella (2019) no mesmo experimento deste estudo. Assim, devido a ampliação do espaço de entre touceiras na comunidade de plantas, pode ter ocorrido maior diluição da carga animal nestes locais nas menores alturas do pasto, como já discutido por Bertol et al., (1998). Além disso, na altura de pasto de 12 cm, devido ao pequeno porte das plantas, pode haver maior frequência de pisoteio nas bases das touceiras, o que contribui ainda mais para a diluição da carga animal. Isso indica capacidade de plasticidade e adaptação da pastagem natural às condições de pastejo, sem



ocorrer comprometimento da funcionalidade do solo. Em um estudo desenvolvido por Capurro et al. (2014), num Vertissolo sob pastagem natural sob diferentes intensidades de pastejo e com teores de carbono e argila no solo semelhantes ao Cambissolo da presente pesquisa, também não foram observadas alterações na estrutura do solo. Entretanto, o Vertissolo, diferentemente do Cambissolo, possui mineralogia da fração argila expansiva, o que, possivelmente, confere maior elasticidade ao solo e capacidade de reagregação após o pastejo diante de ciclos de umedecimento e secagem.

Pastagens naturais e perenes apresentam maior resistência à degradação pelo pastejo que pastagens anuais, em que há maior suscetibilidade do solo ao efeito danoso do pisoteio em superfície devido a menor quantidade de raízes preenchendo os poros de maior tamanho (MILNE; HAYNES, 2004; MARCHÃO et al., 2007) e às frequentes práticas mecânicas de revolvimento e mobilização, que tornam o solo mais suscetível à compactação (SHAHAB et al., 2013). Estudos em sistemas integrados de produção agropecuária no sul do Brasil, com utilização de pastagens de inverno (*Avena sativa* e *Lolium multiflorum*), evidenciaram comprometimento do sistema poroso na camada superficial do solo (0-5 cm) com a diminuição da altura do pasto (AMBUS et al., 2018; DE ANDRADE BONETTI et al., 2019) ou com o aumento da frequência de pastejo (LANZANOVA et al., 2007). Por outro lado, mesmo em pastagem natural, em trabalho realizado no Bioma Pampa no sul do Brasil, em um Argissolo Vermelho, Bertol et al. (1998) verificaram que a diminuição da oferta de forragem, de 16 até 4%, em um sistema de pastejo contínuo, aumentou a Ds e comprometeu o sistema macroporoso do solo nas camadas mais superficiais (0-3 e 3-6 cm), o que foi corroborado pelos trabalhos de Salton et al. (2008) e Conte et al. (2011). Comparativamente ao nosso trabalho, estes trabalhos realizados no Bioma Pampa indicam menor resistência à degradação do Argissolo comparativamente ao Cambissolo Húmico, o que ressalta a importância das características de cada solo nos efeitos do pastejo num mesmo ecossistema.

Após o período de inverno, 4 meses após a avaliação de pós pastejo, observamos que as alturas do pasto, tanto nas regiões de touceira como de entre touceiras, continuaram sem influência na Ds (Tabela 5). Este período hibernal da pastagem fez com que desaparecessem alguns efeitos dos tratamentos na porosidade total e distribuição de poros no solo, com exceção da camada de 5-10 cm na região de touceira do *A. lateralis*, onde o tratamento de 12 cm apresentou maior macroporosidade em relação ao 28 cm, o que pode ter ocorrido por efeito residual de maior promoção do crescimento de raízes com a diminuição da altura do pasto.

Tabela 5 - Densidade e distribuição de diâmetro de poros no solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), nas regiões de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas após o período de inverno de 2017/2018, 4 meses após o pastejo (mês de outubro).

Camada (cm)	Altura do pasto (cm)								Área de exclusão
	Entre touceiras				Touceira				
	12	20	28	36	12	20	28	36	
Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	1,08 A	1,16 A *	1,12 A *	1,11 A	0,97 A *	1,00 A	0,93 A *	0,92 A *	1,05
5 - 10	1,24 A	1,26 A	1,22 A *	1,23 A	1,19 A *	1,25 A	1,20 A *	1,19 A *	1,26
10 - 15	1,26 A	1,29 A	1,24 A *	1,24 A *	1,25 A *	1,30 A	1,24 A *	1,24 A *	1,29
15 - 20	1,28 A	1,32 A	1,26 A *	1,28 A	1,26 A *	1,29 A	1,25 A *	1,27 A *	1,31
Porosidade total (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	0,59 A	0,56 A *	0,58 A *	0,58 A	0,63 A *	0,62 A	0,65 A *	0,65 A *	0,60
5 - 10	0,53 A	0,52 A	0,54 A *	0,53 A	0,55 A *	0,52 A	0,54 A *	0,55 A *	0,52
10 - 15	0,52 A	0,51 A	0,53 A *	0,53 A *	0,53 A *	0,51 A	0,53 A *	0,53 A *	0,51
15 - 20	0,51 A	0,50 A	0,52 A *	0,51 A	0,52 A *	0,51 A	0,53 A *	0,52 A	0,50
Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	0,50 A	0,48 A *	0,50 A	0,49 A	0,51 A	0,50 A	0,54 A *	0,53 A	0,50
5 - 10	0,45 A	0,46 A	0,47 A	0,47 A	0,47 A	0,46 A	0,49 A	0,49 A	0,47
10 - 15	0,44 A	0,44 A	0,46 A	0,46 A	0,46 A	0,45 A	0,47 A *	0,46 A	0,45
15 - 20	0,44 A	0,44 A	0,46 A	0,46 A	0,45 A	0,44 A	0,46 A	0,45 A	0,45
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	0,09 A	0,08 A	0,07 A *	0,09 A	0,12 A	0,12 A	0,11 A	0,13 A *	0,09
5 - 10	0,07 A *	0,06 A *	0,06 A *	0,06 A	0,08 A *	0,06 AB *	0,06 B	0,06 AB *	0,05
10 - 15	0,08 A *	0,07 A	0,07 A *	0,07 A *	0,07 A *	0,06 A	0,06 A	0,07 A *	0,06
15 - 20	0,07 A *	0,06 A	0,06 A	0,06 A	0,07 A *	0,07 A *	0,07 A *	0,06 A *	0,05
Bioporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )									
0 - 5	0,05 A	0,05 A	0,04 A	0,05 A	0,07 A *	0,07 A *	0,07 A *	0,07 A *	0,04
5 - 10	0,04 A *	0,04 A *	0,04 A *	0,03 A	0,05 A *	0,04 A *	0,04 A *	0,03 A	0,03
10 - 15	0,05 A *	0,04 A *	0,05 A *	0,04 A *	0,04 A *	0,04 A	0,04 A *	0,04 A *	0,03
15 - 20	0,04 A	0,04 A *	0,04 A *	0,04 A	0,05 A *	0,05 A *	0,04 A *	0,04 A *	0,03

Médias com letras distintas, na linha, e para cada local da comunidade de plantas (touceira e entre touceira) diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e médias com asterisco diferem da área de exclusão pelo teste t Student ( $p < 0,05$ )

Ocorreu, em geral, diminuição da Ds na camada de 0-5 cm após o inverno (Tabela 5), processo que também foi observado em sistemas integrados de produção agropecuária no sul do Brasil no final do ciclo de culturas agrícolas inseridas após os ciclos de pastejo de forrageiras de inverno (ANGHINONI et al., 2015), com ausência de pisoteio no solo por um período de 4 a 5 meses. Isso ocorre pela expansão e contração do solo em função de ciclos naturais de umedecimento e secagem (DE ANDRADE BONETTI et al., 2017), o que se intensifica nas pastagens naturais de altitude em função do maior conteúdo de carbono e atividade de raízes. Entretanto, como as classes dos macroporos e bioporos não foram comprometidas pelo pastejo,

este período de inverno deve reestabelecer apenas poros intermediários não ocupados por raízes para diminuição da Ds.

Nas regiões de entre touceiras, os tratamentos 12 e 36 cm apresentaram diminuição da Ds relativamente maior que os demais tratamentos durante o período de inverno, e com isso igualaram-se à área de exclusão na camada de 0-5 cm. Possivelmente, isso se deve à maior quantidade de raízes, principalmente estolões e rizomas no tratamento de 12 cm, e pela baixa frequência de pastejo e semelhança da vegetação do tratamento de 36 cm com a área de exclusão. O tratamento de 28 cm apresentou novamente menor Ds e maior porosidade total na camada de 10-20 cm em relação a área de exclusão, e neste segundo momento de avaliação, também na camada de 5-10 cm, o que fortalece a hipótese de que isso ocorreu pela maior atividade de raízes subsuperficiais do *A. lateralis*.

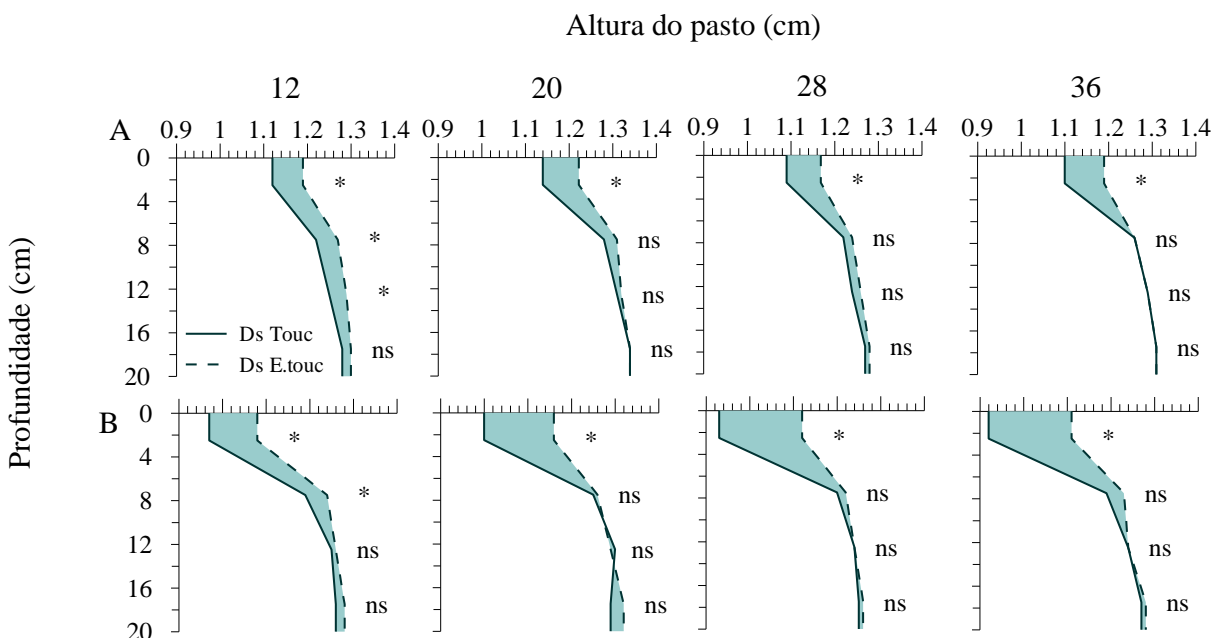
A diminuição da Ds na área de exclusão após o inverno demonstra que ocorre variação natural da estrutura do solo ao longo do ano neste sistema solo-plantas (Tabela 5). Isso ocorre devido aos ciclos naturais de expansão e contração do solo bem como à variação do crescimento e atividade de raízes. Após o inverno ocorreu aumento da macro e bioporosidade até os 20 cm de profundidade da área de exclusão, possivelmente devido a retomada do crescimento das plantas com emissão de raízes mais profundas neste sistema que não recebe pastejo (LÓPEZ - MÁRSICO et al., 2015). Mesmo assim, houve menor volume de macroporos na área de exclusão comparativamente aos tratamentos pastejados após o inverno, tanto na touceira como entre touceiras da comunidade vegetal. Entretanto, isso já foi significativo para diminuição dos microporos.

Nas regiões basais das touceiras até 5 cm de profundidade, houve maior diminuição da Ds nos tratamentos pastejados sob 12, 28 e 36 cm em comparação a área de exclusão durante o inverno (Figura 6). Possivelmente, isso ocorreu pela antecipação da retomada do crescimento da pastagem nos tratamentos pastejados, em função da menor massa vegetal crestada sobre o solo (ZANINI; SBRISSIA, 2013), que assim facilita a entrada de luz e estimula o crescimento das plantas após a emissão dos primeiros perfilhos. Entretanto, a maior Ds na região de touceira na camada de 0-5 cm no período pós pastejo em relação ao período de pós inverno, também pode estar relacionada ao pisoteio que eventualmente ocorre nas regiões basais da touceira, principalmente as de menor porte, o que leva a um aumento momentâneo da Ds logo após o pastejo devido ao baixo grau de consolidação inicial do solo (BRAIDA et al., 2008).

Em relação a variabilidade espacial da Ds na comunidade de plantas, a região da touceira diminui naturalmente a Ds em relação à entre touceiras até 5 cm de profundidade, independentemente da altura do pasto (Figura 6). Isso também foi observado por Leão et al.

(2004) em área de pastagem perene de *Panicum maximum* (Tanzânia) em Latossolo Vermelho argiloso, e ocorre porque as regiões basais da touceira apresentam elevada atividade de perfilhos, bem como não recebem pisoteio. A amplitude da diferença da Ds entre as regiões de touceira e entre touceiras aumentou após o período de inverno, devido a diminuição geral da Ds, principalmente nas regiões basais das touceiras nos tratamentos de maior altura (28 e 36 cm), em que as touceiras são maiores e com maior número de perfilhos. A partir dos 5 cm de profundidade, nos tratamentos de 20, 28 e 36 cm, a Ds permaneceu semelhante entre os locais de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas, o que indica que começa a haver semelhança na quantidade e atividade de raízes no solo entre os diferentes locais da comunidade vegetal a partir desta profundidade. Já no tratamento de 12 cm, a diminuição da Ds nos locais de touceira em comparação à entre touceiras se estendeu até 15 cm de profundidade após o pastejo e até 10 cm após o inverno, possivelmente pela maior promoção do crescimento das raízes de *A. lateralis* verticalmente (Figura 6).

Figura 6 - Amplitude de variação da densidade do solo (Ds) entre os locais de touceira e entre touceiras da comunidade de plantas em diferentes alturas de pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), após o período de pastejo de 2017/2018, no mês de junho (A), e após o período de inverno (B), 4 meses após o pastejo (mês de outubro). \*: significativo ao teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). ns: Não significativo.



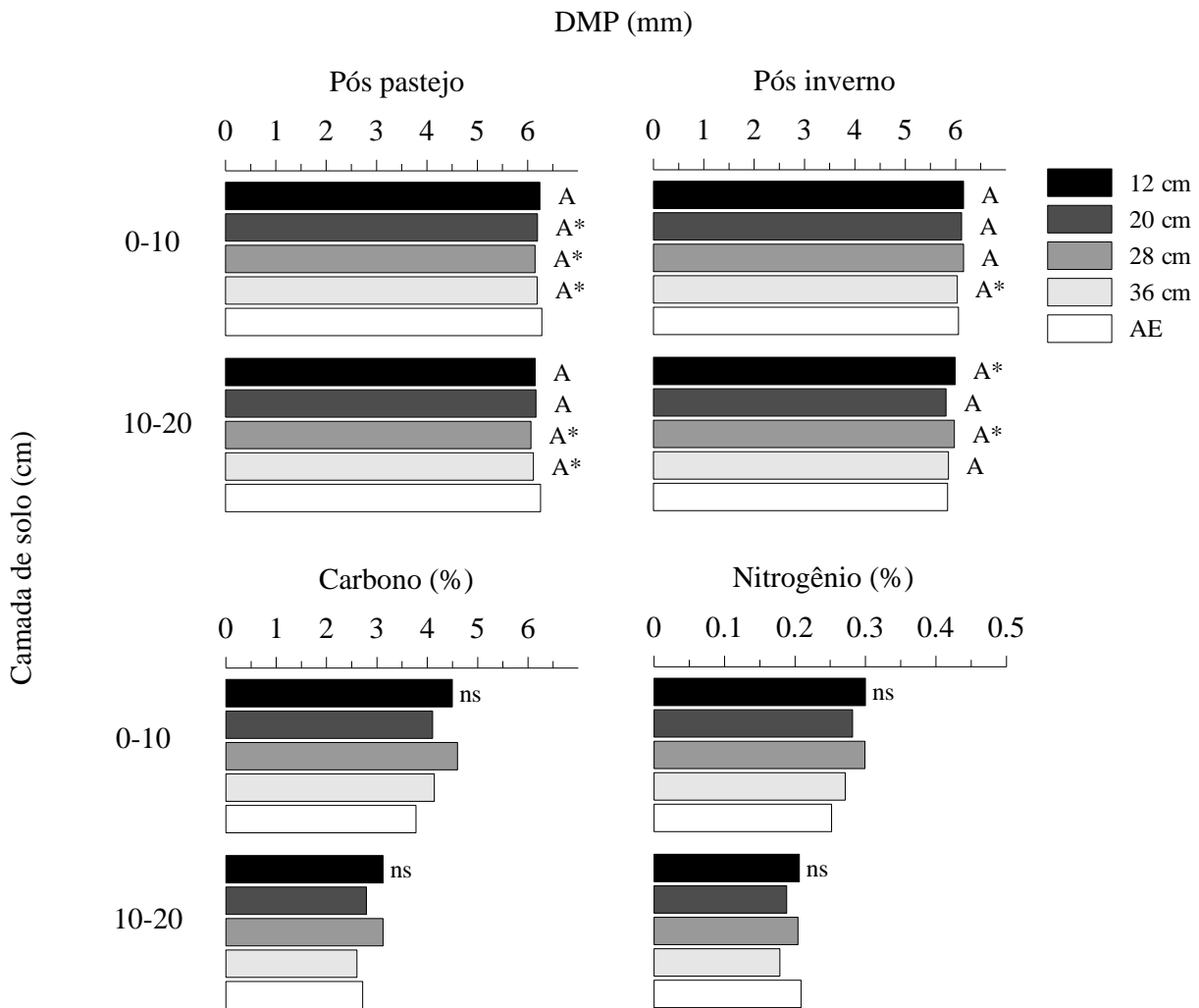
Possivelmente, as regiões de touceira do *A. lateralis* atuam na filtragem da enxurrada que eventualmente ocorre durante eventos pluviométricos e conseqüentemente estimulam a deposição de material erodido. Isso cria uma leve elevação da superfície do solo nas bases das

touceiras, com estrutura de solo solto, e promove a variação da estrutura com os locais de entre touceiras (Figura 6). Outro efeito que pode ocorrer está relacionado à baixa quantidade de espécies e massa vegetal nas regiões de entre touceiras, principalmente nos tratamentos de maior altura de pasto (28 e 36 cm), o que favorece o escoamento de água, desagregação e perda de solo pela enxurrada, que pode gerar rebaixamento da superfície do solo nestes locais com remoção da camada superficial mais porosa.

A estabilidade de agregados do solo, que expressa a resistência do solo à desagregação, não foi alterada pela altura do pasto, tanto no período de pós pastejo como de pós inverno. Já em relação a área de exclusão, no período de pós pastejo, os tratamentos de 20, 28 e 36 cm apresentaram menor estabilidade na camada de 0-10 cm, bem como os tratamentos 28 e 36 cm na camada de 10-20 cm (Figura 7). Isso indica que ocorreu leve desagregação do solo pelo pisoteio em comparação a área sem pastejo, possivelmente devido ao rearranjo do solo com desprendimento de partículas de areia e silte, que não possuem cargas e potencial de agregação e que representam 63% da fração granulométrica total do solo. Já o tratamento de 12 cm resiste mais à desagregação possivelmente devido ao maior número de espécies no estrato entre touceiras da comunidade vegetal.

No período de pós inverno apenas o tratamento de 36 cm apresentou menor estabilidade que a área de exclusão, na camada de 0-10 cm. Já os tratamentos 12 e 28 cm apresentaram maior estabilidade que a área de exclusão na camada de 10-20 cm (Figura 7), devido à reagregação do solo que ocorreu neste período hibernar da pastagem. Por outro lado, percebemos pequena diminuição geral da estabilidade de agregados neste período, provavelmente pela diminuição da  $D_s$ , o que diminui a resistência dos agregados. Isso foi mais significativo na área de exclusão, possivelmente por não existir efeito residual de deposição de fezes e urina no solo, que liberam compostos orgânicos estabilizantes no solo (YAGÜE et al., 2016). No entanto, vale ressaltar, que as diferenças verificadas foram pequenas em valores absolutos, o que não impacta os processos do solo, que apresentou uma elevada estabilidade de estrutura independentemente do tratamento e período de avaliação.

Figura 7 - Estabilidade de agregados no solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), nos períodos de pós pastejo e pós inverno, e porcentagem de carbono orgânico e nitrogênio totais no solo. Para cada camada de solo, médias com letras distintas diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), e médias com asterisco diferem da área de exclusão (AE) pelo teste t Student ( $p < 0,05$ ). DMP: Diâmetro médio ponderado.



A elevada estabilidade estrutural do solo se deve, fundamentalmente, a dois fatores: ao elevado conteúdo de carbono orgânico (Figura 7), que cria ligações com as cargas elétricas dos argilominerais e promove a microagregação (INDA JUNIOR et al., 2007; FERREIRA, 2016) e a integridade do sistema poroso (SHAHAB et al., 2013; WANG et al., 2019); e a alta quantidade de raízes, que contribuem para a estabilização dos macroagregados do solo (CONTE et al., 2011). Demais fatores, como presença de minerais secundários do tipo 2:1 com hidróxidos entre camadas e do tipo óxidos de ferro e alumínio, também contribuem para a estruturação do solo. Entretanto, a elevada quantidade de matéria orgânica e de raízes, presente naturalmente em pastagens de altitude, são as características predominantes na estruturação,

que assim se sobrepuseram às condições de manejo nas alterações da estrutura do solo, como também, possivelmente, à umidade do solo para determinação da capacidade de suporte de carga e resistência à desagregação, o que gera um sistema resistente e adaptado ao pisoteio bovino.

O teores de carbono e nitrogênio foram utilizados mais como variáveis explicativas do processo de resistência do solo à degradação do que como variáveis resposta, pois, como já esperado, não houve influência do pastejo e da altura do pasto no conteúdo total desses (Figura 7), mesmo que trabalhos evidenciem que a presença animal em pastagem natural é importante para a promoção do estoque de carbono no solo, seja via aumento da ciclagem (CONANT; PAUSTIAN; ELLIOTT, 2001; WATERS et al., 2017; ORGILL et al., 2018) ou promoção da biomassa de raízes (PIÑEIRO et al., 2010). Estes fatores são relativamente pouco significativos diante do conteúdo total de carbono e raízes presentes no solo e da biomassa de aporte total acima do solo, além de não haver revolvimento ou mobilização nos tratamentos avaliados, o que possivelmente não altera a taxa de decomposição e perda de carbono.

No que se refere ao conteúdo de nitrogênio, a diminuição da altura de manejo não alterou o quantidade e aporte de espécies leguminosas (ZANELLA, 2019). O curto período de condução do protocolo experimental (4 anos) pode ter colaborado para que ainda não haja influências do manejo no estoque de carbono e nitrogênio até 20 cm de profundidade.

## 6.2 A ESTRUTURA DO SOLO E AS PLANTAS NATIVAS

A manutenção da diversidade de espécies de plantas sob pastagem natural é o principal serviço ecossistêmico da estrutura do solo, que equilibra a retenção e disponibilidade de ar e água às plantas e permite o crescimento e estabelecimento das raízes no solo sem impedimento mecânico, tais fatores que regulam diretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas (LETEY, 1985). A  $D_s$  é um indicador de qualidade física que se relaciona com os processos físicos do solo e com o crescimento das plantas, e seu uso é utilizado como “alerta” às condições estruturais do solo. Para solos com textura franco argilosa, a faixa de  $D_s$  crítica é de 1,4 a 1,5  $Mg\ m^{-3}$  (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003), que, no entanto, não se aplica ao solo estudado devido ao alto conteúdo de carbono. Alta quantidade de matéria orgânica diminui a densidade crítica do solo e altera a influência da  $D_s$  nos processos físicos e nas plantas (LUCIANO et al., 2012).

O GC é um indicador da qualidade de estrutura do solo que relaciona a  $D_s$  avaliada a campo com a densidade máxima do solo. A faixa de 80 a 90% é utilizada como a mais favorável

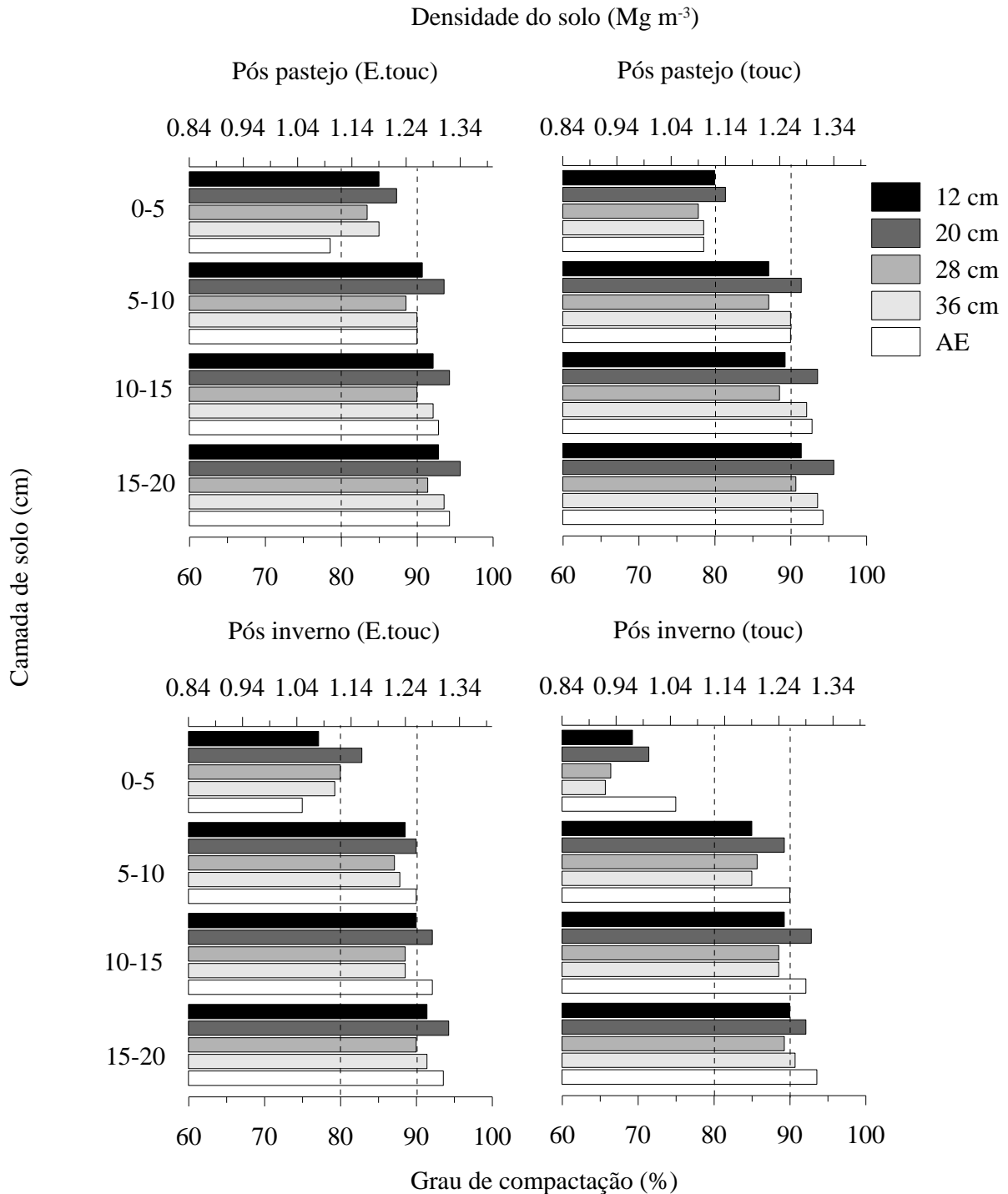
para o equilíbrio entre retenção e disponibilidade de ar e água às plantas e por favorecer o contato entre as raízes e o solo (TRACY et al., 2011). O GC é um indicador largamente utilizado para relacionar a estrutura do solo com culturas anuais (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; SUZUKI; REICHERT; REINERT, 2013), mas também aplicável em áreas com plantas perenes (SUZUKI et al., 2015), que, no entanto, possuem maior facilidade de crescimento em solo compactado em função do sistema radicular já estabelecido. A densidade máxima do solo foi de  $1,395 \text{ Mg m}^{-3}$  (Figura 8), com isso o GC de 80% corresponde a  $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$ , enquanto a densidade crítica, com GC de 90% da densidade máxima corresponde a  $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ .

Entre as alturas do pasto, como não houve mudanças na Ds nos locais de entre touceiras e touceira do *A. lateralis*, a estrutura do solo relacionada ao crescimento e desenvolvimento das plantas não foi alterada. Comparativamente a área de exclusão, os tratamentos pastejados apresentaram elevação do grau de compactação na camada de 0-5 cm de profundidade nas regiões de entre touceiras, mas sem ultrapassar o GC crítico de 90%, o que até pode favorecer espécies em estado inicial de estabelecimento e crescimento, visto que o GC da área de exclusão foi de 78% nesta camada, abaixo da faixa mais favorável às plantas.

O GC abaixo dos 80 % na área de exclusão e regiões de touceira do *A. lateralis* nos tratamentos pastejados não deve ser danoso às plantas predominantes na área no que se refere a retenção de água no solo, visto que as plantas aproveitam as camadas mais profundas do solo para absorção de água e nutrientes. A partir dos 5 cm de profundidade o GC ultrapassou, em geral, a condição crítica, mas possivelmente isso não afeta as plantas pelo fato da adaptação natural à esta condição. Teles (2019) verificou que o crescimento e produção de Jiggs (*Cynodon dactylon*), uma forrageira perene, apenas foi prejudicado a partir de um GC de 95% em um Cambissolo Húmico, nível que não foi superado no nosso estudo.



Figura 8 - Densidade e grau de compactação (GC) do solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), após o pastejo e após o período de inverno (4 meses após o pastejo). AE: Área de exclusão ao pastejo. As linhas traçadas entre 80 e 90% do GC, expressam a faixa mais favorável ao crescimento das plantas.



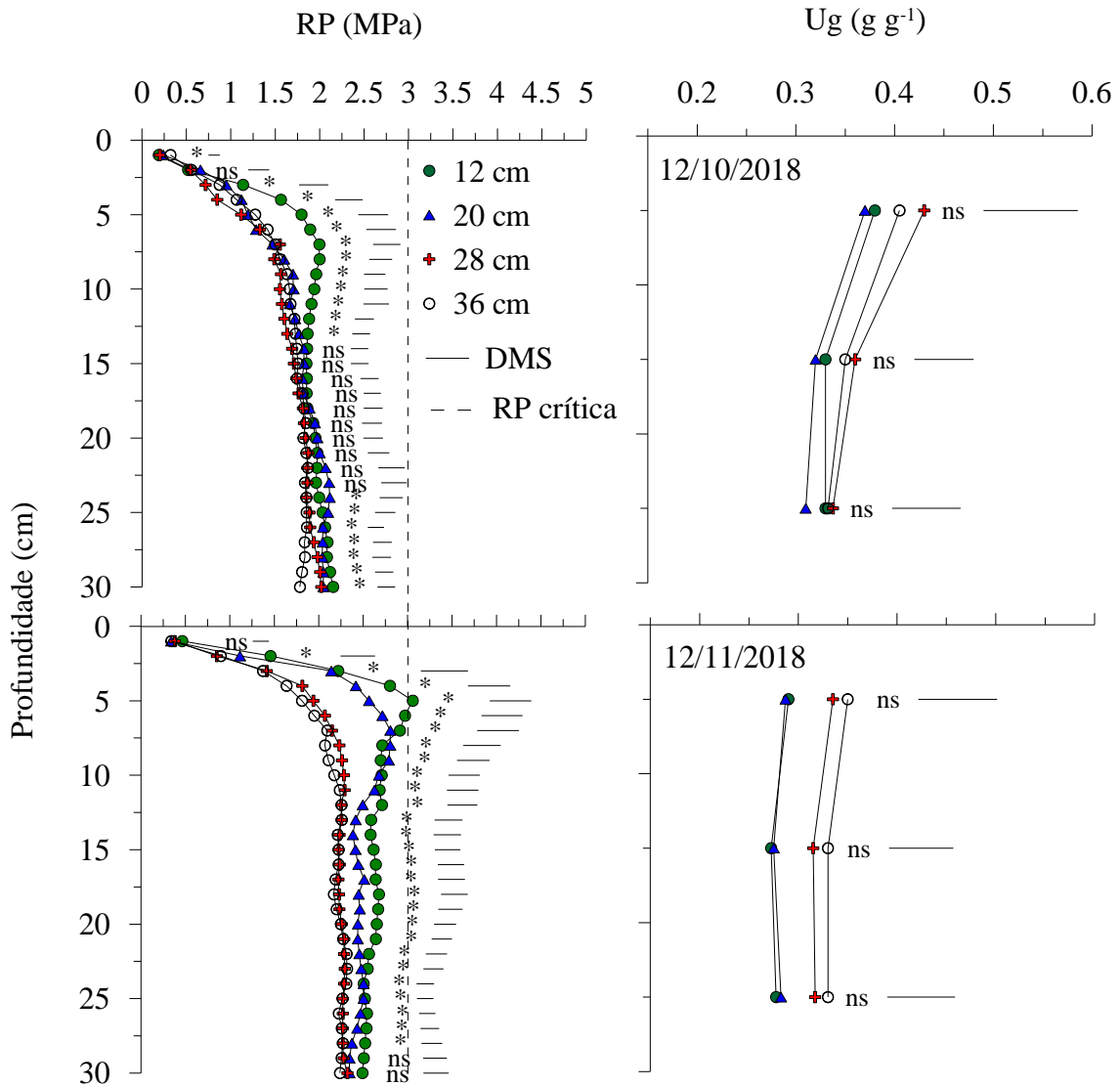
A RP expressa a resistência física da estrutura do solo ao crescimento de raízes, e varia com a umidade e a Ds. A diminuição da umidade do solo leva a uma maior coesão entre as partículas do solo, e o aumento da Ds aproxima as partículas e diminui os poros de maior tamanho. Assim, a diminuição da umidade do solo e o aumento da Ds aumentam a resistência

do solo ao crescimento de raízes, que é um fator físico dinâmico em função dos ciclos de umedecimento e secagem do solo (KAISER et al., 2013).

No dia 12/10/2018, o tratamento de 12 cm apresentou maior RP que os demais tratamentos até os 17 cm de profundidade, como também maior RP que o tratamento de 36 cm dos 23 aos 30 cm de profundidade, mas sem variação de umidade entre os tratamentos (Figura 9). Já na data de 12/11/2018, em que a umidade do solo esteve menor, mas também sem influência do tratamento na quantidade de água no solo, a RP do solo aumentou em todos os tratamentos, principalmente nas alturas de pasto de 12 e 20 cm até os 28 cm de profundidade. Na segunda data de avaliação, o tratamento de 12 cm apresentou RP na profundidade de 5 cm acima do valor crítico de 3 MPa, valor comumente utilizado como restritivo para culturas anuais.

A maior RP nos tratamentos de 12 e 20 cm deve estar relacionada a menor umidade do solo, mesmo que não houve diferença estatística na umidade gravimétrica, visto o baixo número de repetições das amostras coletadas (1 amostra por parcela), pois não houve mudanças na Ds pelos tratamentos. O menor teor de água nas alturas de pasto de 12 e 20 cm ocorre devido a menor cobertura vegetal viva e morta sobre o solo, o que ocasiona maior perda de água por evaporação comparativamente as demais alturas do pasto (BLAINSKI et al., 2012).

Figura 9 - Resistência do solo à penetração (RP) e umidade gravimétrica do solo (Ug) durante o período de retomada de crescimento da pastagem natural, após o período de inverno de 2018, sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), nas datas de 12/10/2018 e 12/11/2018. \*: Significativo ao teste de Tukey ( $p < 0,05$ ); ns: não significativo. DMS: Diferença mínima significativa.



O solo apresentou elevada variabilidade espacial de RP (Figuras 10 e 11), principalmente no tratamento de 12 cm na data de 12/11/2018, condição de menor umidade do solo. A menor quantidade de água expôs mais a variabilidade da estrutura do solo, estimulada pela diversidade de plantas e distribuição espacial das touceiras na comunidade. Nos tratamentos de 28 e 36 cm, em que as touceiras de *A. lateralis* são de maior porte, a RP na superfície do solo abaixo das touceiras (0-10 cm) foi menor, devido à baixa Ds e possivelmente à maior retenção de umidade nestes locais, o que favorece as plantas para emissão de novos perfilhos e raízes. Na área de exclusão, a menor variabilidade da estrutura do solo se deve à não

formação de estratos de touceira e entre touceiras, o que diminui a alteração espacial da estrutura do solo pela comunidade de plantas.

Figura 10 - Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração (RP) na comunidade de plantas e umidade do solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), na data de 12/10/2018, período de retomada do crescimento da pastagem após o período de inverno. AE: área de exclusão ao pastejo. DMS: Diferença mínima significativa.

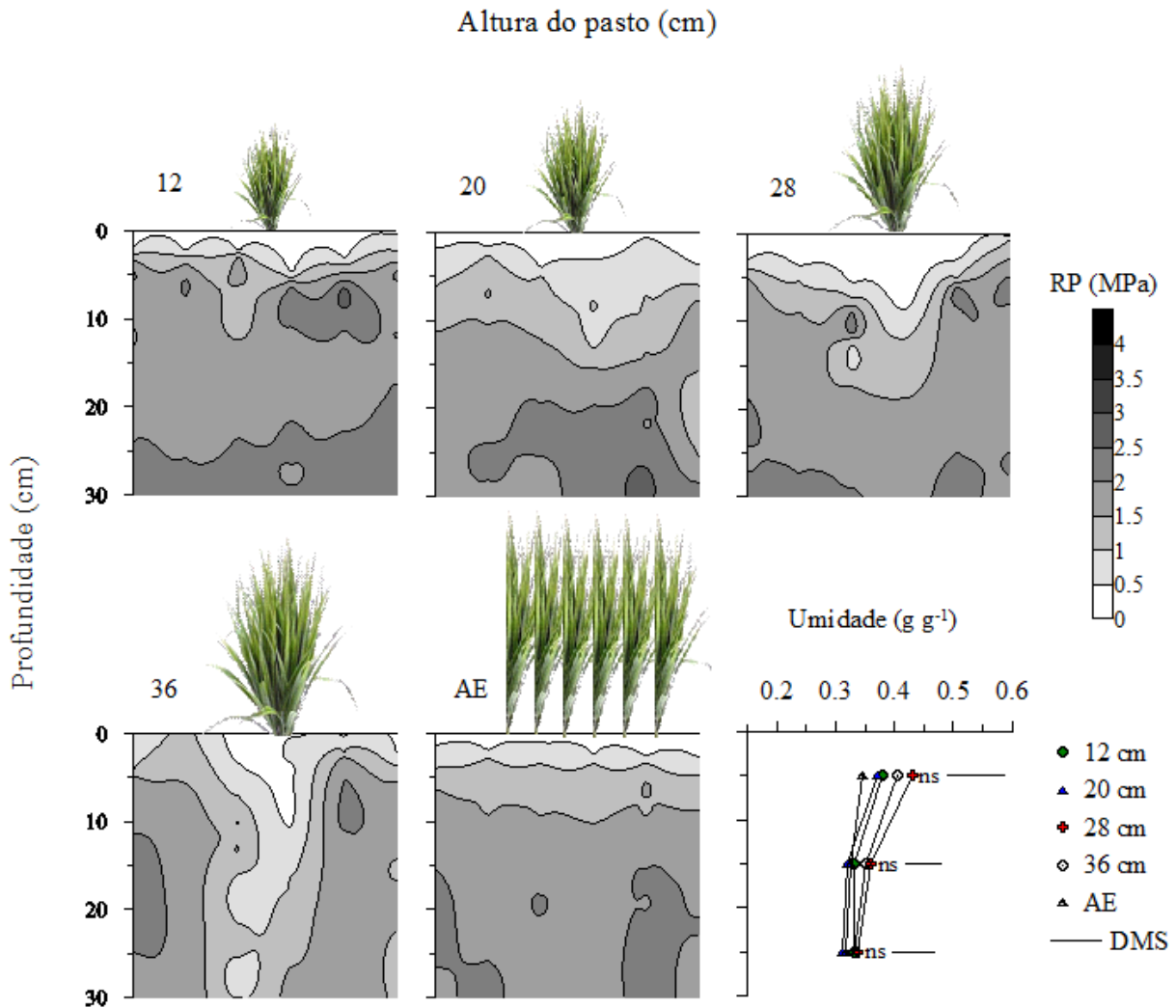
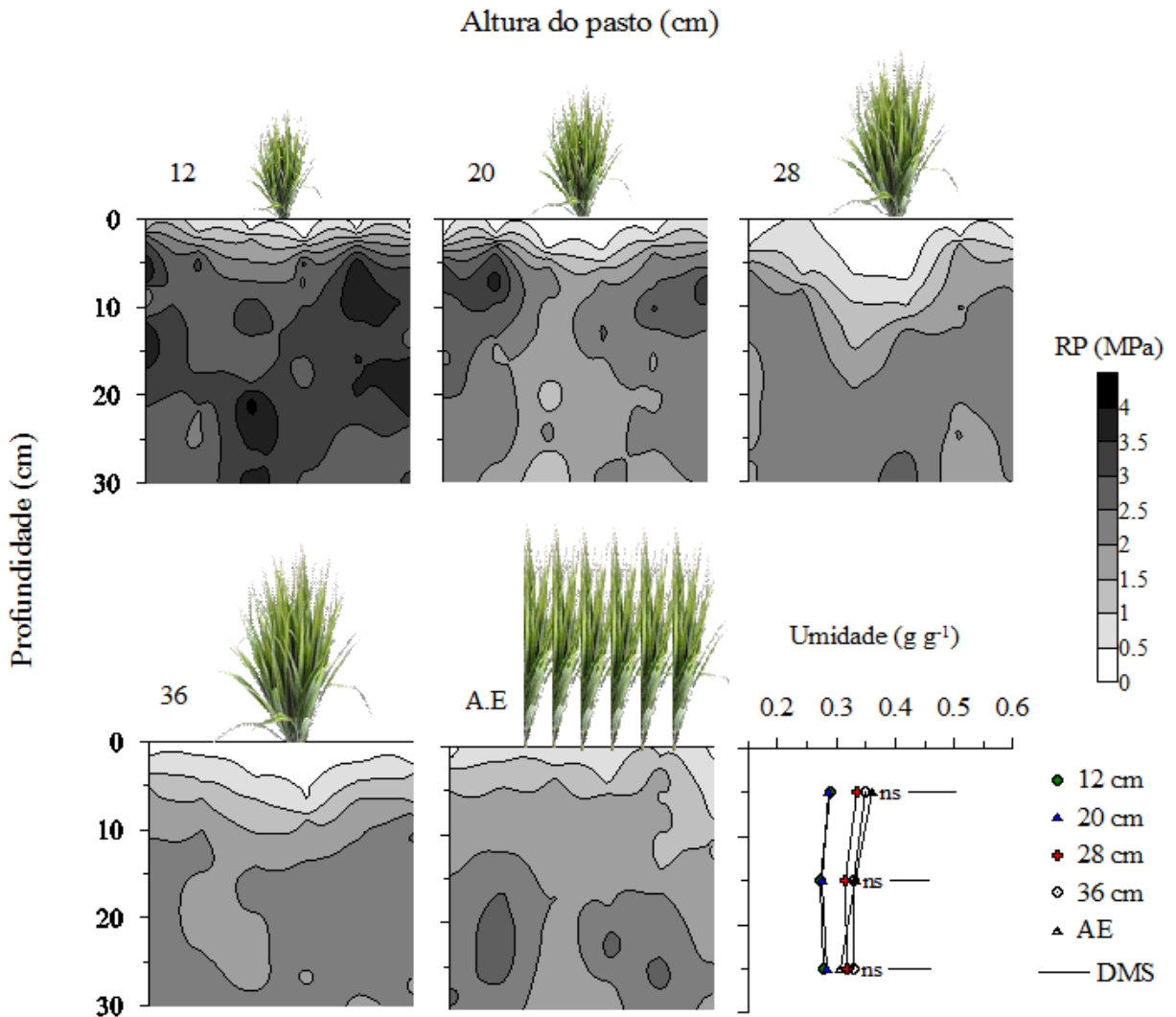


Figura 11 - Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração na comunidade de plantas e umidade do solo sob diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), na data de 12/11/2018, período de retomada do crescimento da pastagem após o período de inverno. AE: área de exclusão ao pastejo. DMS: Diferença mínima significativa.



A comunidade vegetal na pastagem se beneficia da variabilidade espacial da estrutura do solo, pois as plantas moldam o sistema radicular e crescem nas regiões de menor resistência (TRACY et al., 2011; KLEIN et al., 2016), o que é uma vantagem competitiva principalmente para gramíneas com raízes finas, que moldam a região apical do sistema radicular com maior facilidade que raízes mais espesas. As plantas produzem substâncias mucilaginosas na coifa das raízes para facilitar a penetração em regiões de impedimento mecânico (BENGOUGH; KIRBY, 1999) e aproveitam bioporos já formados por raízes anteriores para aprofundamento do sistema radicular (COLOMBI et al., 2017). E como a maior parte das espécies são perenes e possuem um vasto sistema radicular já estabelecido no solo, as plantas neste ecossistema

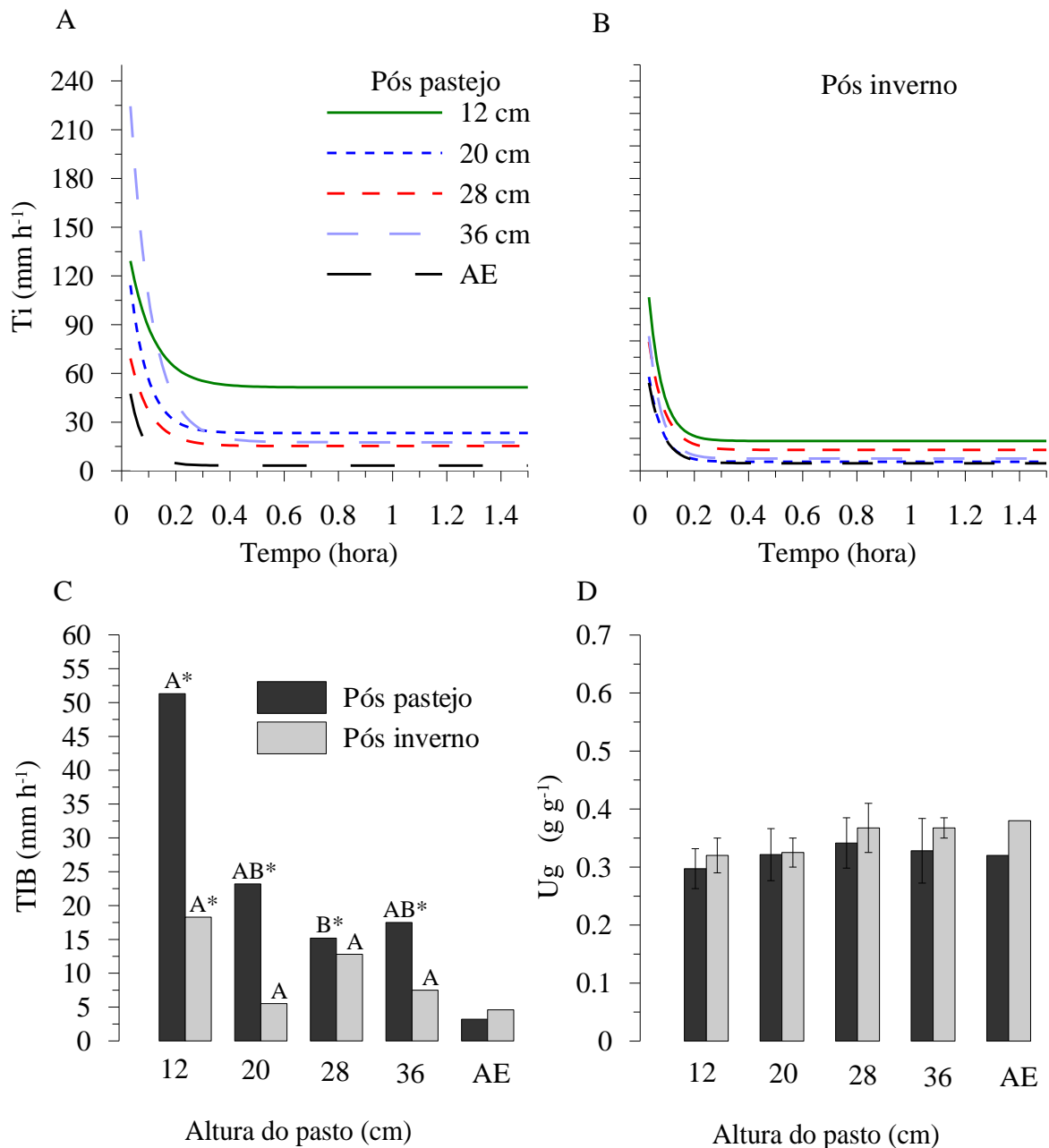
aproveitam os períodos de maior umidade do solo para renovação das raízes e crescimento da parte aérea, onde a resistência ao crescimento diminui e as células da coifa apresentam maior pressão hidrostática para rompimento de camadas impeditivas. Nos períodos mais secos do ano as plantas apresentam certa plasticidade, com alteração morfológica e da distribuição do sistema radicular no solo para promoção da resistência aproveitamento de água (PADILLA et al., 2013), o que torna a intensidade de influência das restrições físicas ao crescimento das plantas baixo (KAISER et al., 2013), independentemente da altura do pasto.

### 6.3 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A infiltração de água é uma característica do solo e considerada um processo físico emergente decorrente da interação de fatores como quantidade, continuidade, conectividade e estabilidade de macroporos no perfil (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). A taxa de infiltração básica (TIB) ocorre quando o perfil se encontra aproximadamente saturado, em que a passagem de água pelos poros é regulada pela condutividade hidráulica saturada, mantendo-se constante ao longo do tempo (LIBARDI, 2018).

Entre as alturas do pasto, o tratamento de 12 cm aumentou a TIB em relação ao tratamento de 28 cm após o pastejo. Após o inverno as diferenças na TIB desapareceram entre os tratamentos, pois ocorreu, em média, redução de 53% na infiltração de água comparativamente ao período de pós pastejo (Figura 12). Em comparação à área de exclusão, as alturas do pasto aumentaram, em média, oito vezes a TIB após o pastejo. Após o inverno apenas o tratamento de 12 cm apresentou maior taxa de infiltração de água no solo que a área de exclusão. Dai et al. (2019) em pastagem natural de altitude na China, também verificaram aumento da infiltração de água no tratamento de maior frequência de pastejo e lotação animal. Os autores justificaram pelo aumento na biomassa de raízes na superfície solo, que, juntamente com a atividade da fauna, como minhocas e besouros coprófagos (KAVDIR; REMZI, 2011; PAGENKEMPER et al., 2015), criam canais contínuos para movimentação preferencial de água (GHESTEM; SIDLE; STOKES, 2011; ZENG et al., 2013).

Figura 12 - Ajuste do modelo de Horton à infiltração de água no solo ao longo do tempo, em diferentes alturas do pasto sob pastejo bovino (12, 20, 28 e 36 cm) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees), no período de pós pastejo (A) e pós inverno (B) (quatro meses após o pastejo), e taxa de infiltração básica de água no solo (TIB) (C) e umidade gravimétrica do solo ( $U_g$ ) (D). Para cada período de avaliação, médias maiúsculas distintas diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e médias com asterisco diferem da área de exclusão (AE) pelo teste de t Student ( $p < 0,05$ ).



A contribuição do sistema radicular das plantas no aumento da infiltração de água no tratamento de 12 cm provavelmente não é explicada apenas pela quantidade ou massa momentânea de raízes, possivelmente influenciada pela altura do pasto. Isso ocasionaria maior obstrução dos poros e consequentemente diminuição da infiltração comparativamente as

demais alturas de pasto. Talvez tenha ocorrido maior renovação e ciclagem de raízes no tratamento de 12 cm, devido: ao maior arranquio de plantas pelo pastejo e maior incidência de luz na base do dossel, o que ocasiona maior perfilhamento e emissão de novas raízes, que talvez mais finas eram de menor longevidade que as demais alturas de pasto (JUNIOR, 2017); e ao frequente pastejo e heterogeneidade de desfolha, que pode ter intensificado os processos de renovação de tecidos das plantas, por hora renovando tecidos radiculares e, por vezes, alocando parte das reservas contidas nas raízes para crescimento da parte aérea.

Além de promoção do crescimento de raízes mais finas, o pastejo também tende a alocá-las para as camadas mais superficiais do solo (LÓPEZ-MÁRSICO et al., 2015; DAI et al., 2019). Deste modo, essas raízes, de mais rápida decomposição, mesmo quando vivas e ocupando os poros do solo, permitem a passagem de água nos espaços entre as raízes e a matriz do solo (GHESTEM; SIDLE; STOKES, 2011). O volume da interface raiz-solo é promovido por raízes finas devido à maior área superficial específica do que raízes mais grossas, o que facilita a movimentação de água no solo. Além disso, raízes mais finas podem contribuir para maior estabilidade do sistema macroporoso do solo (CONTE et al., 2011) e diminuir a desagregação e entupimento de poros durante o teste de infiltração.

O possível aumento da renovação e tipologia radicular com a diminuição da altura do pasto fez aumentar a formação de macroporos no solo com maior proporção de poros desobstruídos logo após o pastejo. Neste período, foi o único em que foi verificada boa relação entre macroporosidade e TIB (Figura 13), embora, com baixo coeficiente de determinação. Isso indica que somente o volume de poros com diâmetro acima de 50  $\mu\text{m}$  não expressa a facilidade com que a água se movimenta no perfil do solo. Após o período de inverno, com a retomada do crescimento vegetativo das plantas, possivelmente os poros foram novamente obstruídos por novas raízes de *A. lateralis*, espécies de entre touceiras de verão e espécies remanescentes de inverno, o que fez diminuir a infiltração de água e comprometer a relação da macroporosidade com a TIB (Figura 13).

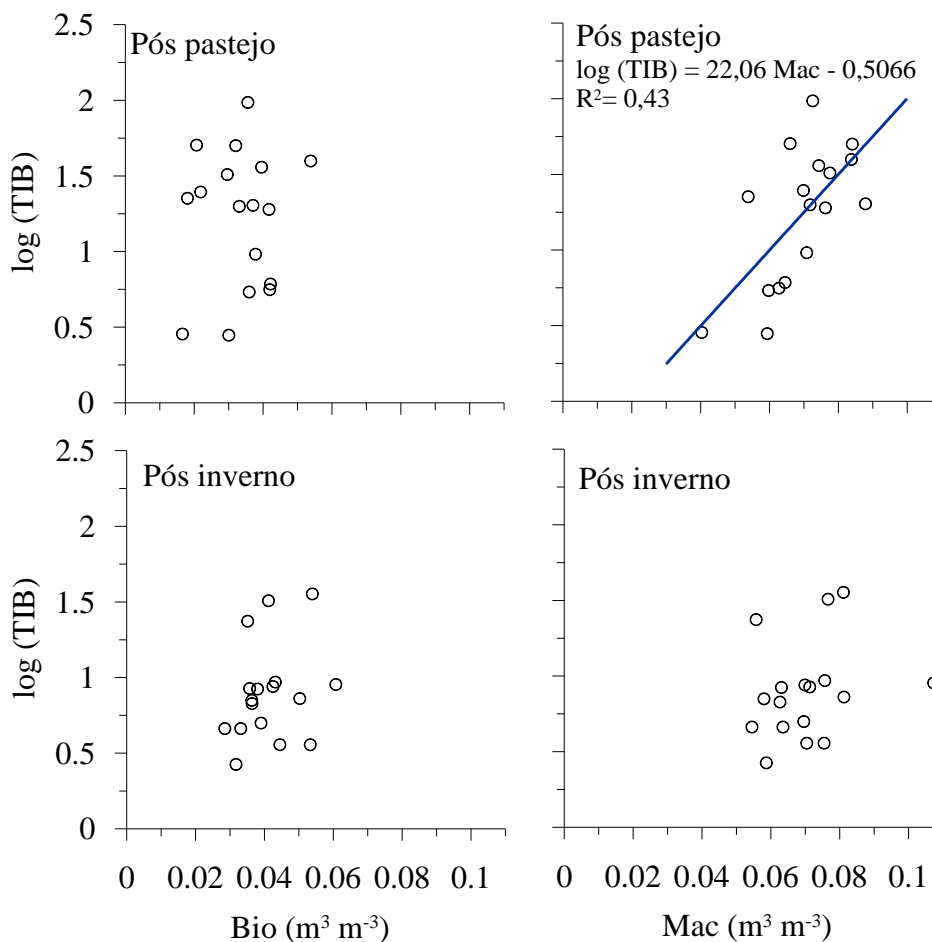
A maior condição de umidade do solo no período de pós inverno também pode ter colaborado para a menor TIB verificada neste período (Figura 12). A umidade inicial do solo não tem influência na taxa de infiltração básica quando o perfil de solo estiver saturado, porém pode influenciar a taxa estável de infiltração quando não é atingida a saturação completa do solo. Com a saturação incompleta, há maior grau de contração dos agregados e espaço livre para passagem de água entre agregados, o que favorece a infiltração. Durante a curva de saturação do solo no teste de infiltração pode ocorrer a estabilização da taxa por caminhos preferenciais, mas sem saturar regiões internas dos agregados, visto o baixo tempo de realização



do teste (90 minutos). Uma menor condição inicial de umidade do solo dificulta mais a saturação do solo durante o teste, e é possível que a TIB não tenha sido atingida neste estudo, principalmente no período de pós pastejo.

A bioporosidade reflete, aproximadamente, o volume de solo ocupado por raízes, que variou desde 2 a 3% na área de exclusão até 7% nos tratamentos pastejados. Estes poros não apresentaram relação com a TIB em ambos os momentos de avaliação (Figura 13), o que indica eles se mantêm obstruídos por raízes espessas e longevas durante a maior parte do ano e não contribuem para a movimentação de água no solo. Assim, os poros intermediários entre 50 e 300  $\mu\text{m}$ , formados por raízes finas e pelo próprio arranjo das partículas do solo, devem ter regulado a movimentação de água neste sistema solo-plantas.

Figura 13 - Relação da bioporosidade (Bio) e macroporosidade (Mac) média na camada de 0-20 cm de profundidade com a taxa de infiltração básica de água no solo (TIB), após o período de pastejo e após o período de inverno (quatro meses após o pastejo) em uma pastagem natural com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees) sob pastejo bovino.



A infiltração básica de água no Cambissolo Húmico é naturalmente baixa, de cerca de  $6,6 \text{ mm h}^{-1}$  (BERTOL et al., 2015), fundamentalmente devido à textura do solo, com proporção

de areia, silte e argila semelhante, o que cria acomodação do silte entre as partículas de argila e areia e conseqüentemente entupimento de poros, com baixa presença de macroporos (FORSYTHE, 1975). Na pastagem natural esta infiltração básica de água pode ser ainda menor devido à obstrução radicular dos poros de maior tamanho. Como o método dos anéis concêntricos utilizado para avaliação da infiltração de água no solo superestima a infiltração real em cerca de 5 a 10 vezes (FORSYTHE, 1975), chama a atenção o fato da infiltração de água na área de exclusão ter sido menor que a real para este solo (Figura 12). Isto indica que a carga hidráulica não teve um efeito expressivo na pressurização de água para dentro dos poros neste tratamento, possivelmente pela quase total obstrução dos macroporos por raízes espessas. Já nos tratamentos pastejados, principalmente sob 12 cm, possivelmente com maior ciclagem de raízes, formação de macroporos e maior proporção de poros desobstruídos, a pressurização de água pela carga hidráulica teve maior efeito na infiltração de água.

As melhorias do pastejo e da diminuição da altura do pasto na funcionalidade da rede de poros do solo indica que os efeitos indiretos do pastejo na promoção da quantidade, diversidade e ciclagem de raízes e atividade biológica foram predominantes perante os efeitos do pisoteio. No trabalho de Bertol et al. (1998), em pastagem natural no sul do Brasil, em um Argissolo Vermelho, foi verificada diminuição linear da infiltração de água com a diminuição da oferta de forragem, mesmo com aumento da quantidade de raízes no solo (CONTE et al., 2011). Isto indica que os efeitos diretos do pisoteio no aumento da densidade e diminuição da rede de macroporos se sobrepuseram aos efeitos indiretos no aumento da quantidade de raízes naquele sistema, devido a menor capacidade de resistência do solo.

No caso desta pesquisa, a diminuição da altura do pasto até 12 cm, considerada inicialmente como danosa a estrutura do solo pela elevada frequência de pastejo e pisoteio, baixa quantidade de material vegetal na superfície do solo e por prejudicar o rebrote forrageiro, nem chegou a superar ou romper com a capacidade de resistência do solo ao pisoteio, sem que fosse necessário a exploração da capacidade de resiliência do solo durante o período hibernar da pastagem para evitar a degradação do solo.

## 7 CONCLUSÕES

A diminuição da altura do pasto de 36 cm até 12 cm não degradou a estrutura do solo, o que indica que a altura de pasto 12 cm pode ser utilizada para intensificar a produção de carne sem comprometer a funcionalidade da estrutura do solo nas pastagens naturais de altitude com predomínio de capim caninha (*Andropogon lateralis* Nees).

Independentemente da altura do pasto (12, 20, 28 e 36 cm), o pastejo aumentou a macroporosidade, bioporosidade e infiltração de água no solo comparativamente à área de exclusão. Isso demonstra a importância do componente animal para manutenção e promoção das funções e serviços ecossistêmicos do solo no ambiente da pastagem natural.

Nas alturas de pasto estudadas, o pastejo elevou levemente a densidade do solo em superfície (0-5 cm) no estrado entre touceiras da comunidade de plantas, local preferencial para caminhamento dos bovinos em pastejo. Entretanto, este rearranjo do solo não comprometeu a funcionalidade do sistema macroporoso e não superou a capacidade de resistência do solo à degradação. Assim, independentemente da altura do pasto, não foi necessário o período de quatro meses para repouso de inverno da pastagem para a manifestação da resiliência do solo.



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pastagens naturais são ecossistemas com elevada resistência à degradação pelo pastejo em função da plasticidade e adaptação da comunidade vegetal às mudanças no manejo. Em ambientes de altitude, o alto conteúdo de carbono no solo condiciona uma resistência ainda maior, o que faz este ecossistema diferir de ambientes com pastagens anuais em sistemas integrados de produção agropecuária e das pastagens naturais do Pampa no sul do Brasil. A pesquisa foi realizada em um ambiente com altitude de aproximadamente 920 m e com conteúdo de carbono total no solo em torno de 4% na camada superficial de 0-10 cm. Nesta condição o solo manifesta resistência física à degradação. Com isto, é de se esperar que as pastagens que ocorrem em altitudes ainda maiores, em ambientes de até 1800 m, com predomínio de solos com teores de carbono superiores – visto que o fator clima influenciado pela altitude altera a dinâmica de decomposição e estoques de carbono no solo –, tenham uma resistência ainda maior ao pastejo. Porém, são necessários mais estudos relacionados às demais características dos diferentes tipos de solo e vegetação para comprovar esta hipótese.

A altura de pasto mais favorável para equilibrar a produção animal com a conservação do solo não está entre 20 e 28 cm, mas sim, possivelmente, em torno de 12 cm. Nesta condição, foram observadas inclusive melhorias na funcionalidade do sistema poroso do solo pelo pastejo, principalmente em relação a área de exclusão. Já em relação aos tratamentos de maior altura do pasto, as melhorias na estrutura do solo ficarão, possivelmente, mais evidentes com mais alguns anos de condução do experimento. Até o presente momento o sistema pode estar em um estágio de adaptação às diferentes condições de manejo, mas ainda não em equilíbrio, pois a estrutura do solo requer longo prazo para ser alterada benéficamente.

O período de inverno diminuiu o grau de compactação para abaixo da faixa mais favorável de 80 a 90% na camada de 0-5 cm nos tratamentos de 12, 28 e 36 cm. Assim, a manutenção dos bovinos em pastejo neste período poderia ser uma estratégia explorada e estudada, visto que não foi necessário o período hibernar da pastagem para recuperação do solo. Este período poderia ser utilizado para aumento da produção animal anual neste ecossistema, bem como para preservar raízes ativas em renovação no solo e manter o grau de compactação e infiltração de água em níveis mais favoráveis.

A principal pergunta que surge deste trabalho é: *existe uma altura de pasto, abaixo dos 12 cm, capaz de romper o sinergismo entre o solo-planta-animal, em que o efeito do sobrepastejo supere a capacidade de resistência do solo à degradação?* Estudos futuros poderão arbitrar uma altura ainda menor do que 12 cm para o pasto, tanto com o intuito de

verificar em qual altura ocorre o rompimento da capacidade de resistência do solo à degradação, como também para avaliar a capacidade de resiliência deste ambiente.

A dinâmica do sistema radicular das plantas sob as diferentes alturas de pasto parece comandar as alterações na estrutura do solo. Há necessidade de estudos específicos de avaliação da quantidade, diversidade, tipologia e variação do sistema radicular das plantas ao longo do ano e dos pastejos. Metodologias de quantificação momentânea de raízes podem não ser suficientes para explicar a alteração do sistema radicular da comunidade de plantas pelo manejo, visto que as maiores alterações devem estar relacionadas à intensificação da ciclagem de raízes. A avaliação do sistema poroso do solo por meio de tomografia computadorizada pode colaborar para a avaliação do efeito das raízes na formação e funcionalidade da rede de macroporos do solo, principalmente se for possível fazer uma distinção entre poros obstruídos e livres de raízes.

Para melhor compreensão dos efeitos simultâneos do pastejo na qualidade do solo, também são importantes estudos relacionados à fertilidade química do solo, como ciclagem de nutrientes, fertilidade biológica relacionada à processos de baixa redundância funcional e, indicadores de fauna do solo como minhocas, besouros coprófagos e demais organismos que tem a presença estimulada pelo pastejo. Os *hotspots* promovidos pelo pastejo, principalmente a detritosfera e a rizosfera, também podem ser tema de estudos futuros, tanto para delimitar estas zonas do solo, bem como para avaliar efeito delas nas funções globais do solo.

O efeito da altura do pasto nas perdas de solo e água via erosão hídrica pluvial também requer estudos, pois além de alterar a estrutura do solo, a altura do pasto altera a massa vegetal sobre o solo e a dinâmica da comunidade de plantas, o que pode impactar a ação das gotas de chuva sobre o solo bem como o efeito da enxurrada na desagregação. Técnicas alternativas para avaliação da resistência do solo à desagregação, como o uso de energia ultrassônica, podem colaborar em estudos de erosão e de avaliação do efeito da altura do pasto na estabilidade de estrutura, visto que o método do peneiramento úmido utilizado neste estudo não aplicou energia suficiente para iniciar a desagregação, devido a elevada estabilidade natural do solo.

Após conhecida uma altura ou faixa de altura ideal de pasto destas pastagens naturais, é importante a realização e continuidade de estudos de quantificação do efeito da presença do componente animal em indicadores e variáveis físicas, químicas e biológicas relacionadas às funções e serviços ecossistêmicos do solo comparativamente às áreas de exclusão ao pastejo. Isso é importante para gerar um melhor entendimento da real importância do componente animal na manutenção da vegetação campestre e na promoção das funções do solo. Entretanto, é importante que os protocolos experimentais que venham a explorar esta temática, utilizem as áreas de exclusão como um tratamento com repetições dentro do delineamento experimental.

Como pastagens naturais apresentam naturalmente maior resistência à degradação que áreas com pastagens anuais ou com lavouras, são necessários estudos que avaliem o real efeito de rizomas e estolões, bem como o conteúdo de matéria orgânica e mineralogia do solo, na capacidade de suporte de carga, que nestes ambientes, podem se sobrepor à umidade do solo para determinação da resistência do solo à compactação. A dinâmica de retenção e disponibilidade de água e ar neste solo também requer mais estudos, visto que a alta quantidade de mesoporos pode compartilhar com os macro e microporos funções de aeração e movimentação de água, o que faz com que limites críticos estabelecidos na literatura possam não representar condições críticas reais deste sistema aos processos do solo e às plantas.

É necessário, portanto, um melhor entendimento da complexidade existente dentro deste ambiente de pastagem natural de altitude, o que deve anteceder à estudos de melhoramento das pastagens.





## REFERÊNCIAS

- AARONS, S. R.; O'CONNOR, C. R.; GOURLEY, C. J. P. Dung decomposition in temperate dairy pastures. I. Changes in soil chemical properties. **Soil Research**, v. 42, n. 1, p. 107-114, 2004.
- ALMEIDA, J. A. de. Fatores abióticos. In: BOLDRINI, I. I. **Biodiversidade dos campos do planalto das araucárias**. 2009.
- AMBUS, J. V. et al. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, v. 330, p.232-243, 2018.
- ANDRADE, B. O. et al. Highland grasslands at the Southern tip of the Atlantic Forest biome: Management options and conservation challenges. **Oecologia Australis**, v. 20(2), p. 37-61, 2016.
- ANGHINONI, A. et al. O solo no contexto. IN: MARTINS, A. P. et al. **Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil**. Boletim técnico. 2º edição. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 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 subtropical brasileiro. In: ARAÚJO, A. P.; AVELAR, B. J. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.8, p.325-380, 2013.
- BARBOSA, M. C. R.; DE LIMA, H. M. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 113-120, 2013.
- BEHLING, H. et al. Late Quaternary Araucaria forest, grassland (Campos), fire and climate dynamics, studied by high-resolution pollen, charcoal and multivariate analysis of the Cambará do Sul core in southern Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 203, n. 3-4, p. 277-297, 2004.
- BEHLING, H. et al. Late-Holocene fire history in a forest-grassland mosaic in southern Brazil: Implications for conservation. **Applied Vegetation Science**, v. 10, n. 1, p. 81-90, 2007.
- BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.
- BENGOUGH, A. G.; KIRBY, J. M. Tribology of the root cap in maize (*Zea mays*) and peas (*Pisum sativum*). **The New Phytologist**, v. 142, n.3, p. 421-425, 1999.

BERTOL, I. et al. Erosão hídrica em campo nativo sob diversos manejos: perdas de água e solo e de fósforo, potássio e amônio na água de enxurrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1421-1430, 2011.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 5, p. 779-786, 1998.

BERTOL, I. et al. Water infiltration in two cultivated soils in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n. 2, p.573-588, 2015.

BEUTLER, A. N. et al. Efeito da compactação do solo na estabilidade de agregados e no conteúdo gravimétrico de água. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 27, n. 2, p. 193-198, 2005.

BLAINSKI, É. et al. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 79-87, 2012.

BLANK, R. R.; SVEJCAR, T.; RIEGEL, G. Soil attributes in a Sierra Nevada riparian meadow as influenced by grazing. **Rangeland Ecology & Management**, v. 59, n. 3, p. 321-329, 2006.

BOLDRINI, I. I. et al. Flora. In: BOLDRINI, I. I. **Biodiversidade dos campos do planalto das araucárias**. 2009.

BORTOLINI, D. et al. Propriedades físicas do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em Cambissolo Húmico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 1, p. 60-67, 2016.

BOUWER, H. Intake rates: cylinder infiltrometer. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, WI, p. 825-844, 1986.

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 477-485, 2008.

BRANDT, A. A. **Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS. 2009.

BRISKE, D. D. et al. Pastoreio rotativo em pastagens: reconciliação da percepção e evidência experimental. **Rangeland Ecology & Management**, v. 61, n. 1, p. 3-17, 2008.

CAPURRO, E. P. G. et al. Compressibilidade e elasticidade de um Vertissolo afetado pela intensidade de pastejo bovino. **Ciência Rural**, v. 44, n. 2, p. 283-288, 2014.

CARVALHO, P. C. D.F. et al. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. **Journal of animal Science**, v. 96, n. 8, p. 3513-3525, 2018.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.103, p.158-164, 2009.

CERQUEIRA SILVEIRA, D. de. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, n. 3, 2010.

COLOMBI, T. et al. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. **Science of The Total Environment**, v. 574, p. 1283-1293, 2017.

CONANT, R.T.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. **Ecological applications**, v. 11, n. 2, p. 343-355, 2001.

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**, v. 35, n. 2, p. 579-587, 2011.

DA SILVA, S.; SBRISSIA, A.; PEREIRA, L. Ecofisiologia das gramíneas forrageiras C4 - compreendendo o crescimento das plantas para otimizar seu uso e manejo. **Agricultura** , v. 5, n. 3, p. 598-625, 2015.

DAI, L. et al. Moderate grazing promotes the root biomass in Kobresia meadow on the northern Qinghai–Tibet Plateau. **Ecology and Evolution**, p. 1-12, 2019.

DE ANDRADE BONETTI, J. et al. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 104-112, 2017.

DE ANDRADE BONETTI, J. et al. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**. v. 186, p.280-291, 2019.

DE OLIVEIRA, G. G. et al. Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais. *Revista de Ciências Agrárias*. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 4, p. 388-395, 2015.

DIAS FILHO, M. B.; FERREIRA, J. N. Influência do pastejo na biodiversidade do ecossistema da pastagem. In: Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: **Simpósio sobre manejo estratégico da pastagem. 4.; simpósio internacional sobre produção animal em pastejo**. Anais. Viçosa: UFV, 2008.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 575p, 2017.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 531p, 2018.

EVANS, K. S. et al. Soil Fauna Accelerate Dung Pat Decomposition and Nutrient Cycling into Grassland Soil. **Rangeland Ecology & Management**, v. 72, n. 4, p. 667-677, 2019.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong. **Física do solo**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p.29-102, 2016.

FORSYTHE, W. **Física de Suelos: Manual de Laboratorio**. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 212p, 1975.

FRANK, D. A.; KUNS, M. M.; GUIDO, D. R. Consumer control of grassland plant production. **Ecology**, v. 83, n. 3, p. 602-606, 2002.

GHESTEM, M; SIDLE, R. C.; STOKES, A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. **Bioscience**, v. 61, n. 11, p. 869-879, 2011.

GRAF, F; FREI, M. Soil aggregate stability related to soil density, root length, and mycorrhiza using site-specific *Alnus incana* and *Melanogaster variegatus* sl. **Ecological engineering**, v. 57, p. 314-323, 2013.

GREENWOOD, K. L.; MCKENZIE, B. M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 41, n. 8, p. 1231-1250, 2001.

HERINGER, I; JACQUES, A. V. Á. Acumulação de forragem e material morto em pastagem nativa sob distintas alternativas de manejo em relação às queimadas. **Revista brasileira de zootecnia= Brazilian journal of animal science**. Viçosa, MG. Vol. 31, n. 2 (Mar./Abr. 2002), p. 599-616, 2002.

HORTON, R. E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.5, p.399-417, 1940.

INDA JUNIOR, A. V. et al.. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência rural, Santa Maria**. Vol. 37, n. 5 (set./out. 2007), p. 1301-1307, 2007.

JÉGOU, D. et al. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. **European Journal of Soil Biology**, v. 38, n. 3-4, p. 329-336, 2002.

JUNIOR, L. H. P. D. G. **Demografia do perfilhamento e estabilidade populacional de capim-caninha em pastagem natural submetido a alturas de manejo**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017.

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

KAISER, D. R. et al. Soil physical capacity and intensity properties for achieving sustainable agriculture in the subtropics and tropics: a review. Soil degradation. **Advances in Geocology**, v. 42, p. 282-339, 2013.

KAVIDIR, Y.; ILAY, R. Earthworms and soil structure. In: KARACA, A. **Biology of Earthworms**. Springer, Berlin, Heidelberg. p. 39-50, 2011.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: Black CA, Evans DD, White JL. **Methods of soil analysis. Part 1**. Madison: **American Society of Agronomy**, p.499-509, 1965.

KLEIN, V. A. et al. Variabilidade espacial do intervalo hídrico ótimo de solo cultivados em Sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.11, p.1890-1898, 2016.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 2ª edição. UPF. 2006.

KLUG, I. **Estoque e frações granulométricas do carbono em solo de altitude do Rio Grande do Sul sob diferentes vegetações**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC, 2014.

KOCH, C. et al. Management intensity and temporary conversion to other land-use types affect plant diversity and species composition of subtropical grasslands in southern Brazil. **Applied vegetation science**, v. 19, n. 4, p. 589-599, 2016.

KUNCORO, P. H. et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. **Soil and Tillage research**, v. 143, p. 180-187, 2014.

KUSUMOTA BONINI, A. et al. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, v. 41, n. 9, 2011.

KUZYAKOV, Y.; BLAGODATSKAYA, E. Microbial hotspots and hot moments in soil: concept & review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 83, p. 184-199, 2015.

LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007.

LEÃO, T. P. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 415-422, 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**.v.1, p.277-294, 1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Edusp. 3ª edição. 2018.

LÓPEZ-MÁRSICO, L. et al. Grazing increases below-ground biomass and net primary production in a temperate grassland. **Plant and Soil**, v. 392, n. 1-2, p. 155-162, 2015.

LUCIANO, R. V. et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1733-1744, 2012.

MARCHÃO, R. L. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 873-882, 2007.

MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. de O. Impactos no solo. IN: CARVALHO, P. C. F. et al. **Nativão: + de 30 anos de pesquisa em campo nativo**. Boletim técnico. Porto Alegre, 2019.

MILNE, R. M.; HAYNES, R. J. Soil organic matter, microbial properties, and aggregate stability under annual and perennial pastures. **Biology and Fertility of Soils**, v. 39, n. 3, p. 172-178, 2004.

MODERNELO, P. et al. Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 11, p. 113002, 2016.

MOREIRA, W. H. et al. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1315-1326, 2014.

ORGILL, S. E. et al. Removing grazing pressure from a native pasture decreases soil organic carbon in southern New South Wales, Australia. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 2, p. 274-283, 2018.

PADILLA, F. M. et al. Root plasticity maintains growth of temperate grassland species under pulsed water supply. **Plant and Soil**, v. 369, n. 1-2, p. 377-386, 2013.

- PAGENKEMPER, S. K. et al. The effect of earthworm activity on soil bioporosity— Investigated with X-ray computed tomography and endoscopy. **Soil and tillage Research**, v. 146, p. 79-88, 2015.
- PALHANO, A. L. et al. Padrões de deslocamento e procura por forragem de novilhas leiteiras em pastagem de capim-mombaça. **Revista brasileira de zootecnia**. Brazilian journal of animal science. v. 35, n. 6, p. 2253-2259, 2006.
- PIÑEIRO, G. et al. Pathways of grazing effects on soil organic carbon and nitrogen. **Rangeland Ecology & Management**, v. 63, n. 1, p. 109-119, 2010.
- PINTO, C. E. et al. **Pecuária de corte: Vocação e inovação para o desenvolvimento catarinense**. Florianópolis: Epagri, 2016.
- RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: a review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, 2018.
- REICHERT J. M. et al. Mecânica do solo. In: VAN LIER, Q. de J. **Física do solo**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p.29-102, 2016a.
- REICHERT, J. M. et al. Load dissipation by corn residue on tilled soil in laboratory and field-wheeling conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 8, p. 2705-2714, 2016b.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, 27:29-48, 2003.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.4, p.49-134, 2007.
- SALTON, J. C. et al. Atributos físicos de um Argissolo sob pastagem natural após 18 anos sob diferentes níveis de ofertas de forragem. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 7, n. 2, p. 107-118, 2008.
- SBRISSIA, A. F. et al. Produção animal em pastagens cultivadas em regiões de clima temperado da América Latina. **Archivos Latinoamericanos de Producción Animal**, v. 25, n. 1-2, p. 47-60, 2017.
- SHAHAB, H. et al. Pore size distribution as a soil physical quality index for agricultural and pasture soils in northeastern Iran. **Pedosphere**, v. 23, n. 3, p. 312-320, 2013.
- SILVA, A. P. et al. Indicadores da qualidade física do solo. In: VAN LIER, Q. de J. **Física do solo**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p.241-282, 2016.

SILVA, G. L. S. et al. Algumas considerações sobre o sistema radicular de plantas forrageiras. **PUBVET**, v. 8, p. 0587-0696, 2014.

SOUSSANA, J. F.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 9-17, 2014.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Degree of compactness and mechanical properties of a subtropical Alfisol with eucalyptus, native forest, and grazed pasture. **Forest Science**, v. 61, n. 4, p. 716-722, 2015.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil research**, v. 51, n. 4, p. 311-321, 2013.

TELES, J. S. **Desenvolvimento do jiggs em diferentes graus de compactação em solos de santa catarina**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação, Lages, SC., 2019.

TRACY, S. R. et al. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 91, n. 9, p. 1528-1537, 2011.

VAN DER TOL, P. P. J. et al. The pressure distribution under the bovine claw during square standing on a flat substrate. **Journal of dairy science**, v. 85, n. 6, p. 1476-1481, 2002.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009.

WANG, M. et al. Assessing the effects of land use change from rice to vegetable on soil structural quality using X-ray CT. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104343, 2019.

WATERS, C. M. et al. Management of grazing intensity in the semi-arid rangelands of southern Australia: effects on soil and biodiversity. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 4, p. 1363-1375, 2017.

WILSON, C. H. et al. Grazing enhances belowground carbon allocation, microbial biomass, and soil carbon in a subtropical grassland. **Global change biology**, v. 24, n. 7, p. 2997-3009, 2018.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 6, p. 1743-1750, 1992.



YAGÜE, M. R. et al. Dairy cattle manure effects on soil quality: porosity, earthworms, aggregates and soil organic carbon fractions. **Land degradation & development**, v. 27, n. 7, p. 1753-1762, 2016.

ZANELLA, P. G. **Estratégias de manejo do pastejo e suas implicações na dinâmica da vegetação em pastagem natural com predomínio de *Andropogon lateralis* Nees**. Tese (Doutorado em Ciência Animal – Área: Produção Animal). Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, Lages, 2019.

ZANINI, G. D.; SBRISSIA, A. F. Fogo em pastagens: estratégia de manejo?. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 12, n. 1, p. 94-103, 2013.

ZENG, C. et al. Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai-Tibetan Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 478, p. 148-156, 2013.



## ANEXOS

ANEXO A: Descrição do solo da área experimental

### DESCRIÇÃO GERAL

DATA: Junho de 2019.

CLASSIFICAÇÃO: CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Estação experimental da Epagri, Lages, Santa Catarina, 27°47'55'' S e 50°19'25'' O.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERIL: Terço médio da encosta, com declividade de 10%.

ELEVAÇÃO: 922 m.

LITOLOGIA: Siltitos intercalados com arenitos.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Grupo Passa Dois, Formação Rio do Rasto.

PERÍODO: Permiano Superior.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Produto da alteração das rochas supracitadas.

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

ROCHOSIDADE: Não rochoso.

RELEVO LOCAL: Ondulado.

RELEVO REGIONAL: Ondulado.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Pastagem natural com predomínio de *Andropogon lateralis* Nees (Capim-caninha).

USO ATUAL: Pastagem natural com predomínio de *Andropogon lateralis* Nees (Capim-caninha).

CLIMA: Cfb (Köppen)

DESCRITO E COLETADO POR: Letícia Sequinatto, Lucas Raimundo Rauber e Gustavo Eduardo Pereira.

## DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A1** 0-5 cm, bruno muito escuro (7,5 YR 2.5/2, úmida, 7,5 YR 2.5/1 molhada e 7,5 YR 3/2, seca); francoargilosa; Blocos subangulares, pequena que se desfaz em granular, granular, grande, média e pequena que se desfaz em pequena e muito pequena e moderada a fraca com predominância de estrutura granular; Muito dura, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana/ abrupta.
- A2** 5-15 cm, bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmida, 7,5 YR 2.5/1.5 molhada e 7,5 YR 4/2, seca); francoargilosa; Blocos subangulares, pequena a muito pequena que se desfaz em blocos subangulares, muito pequena e granular, moderada a fraca; Dura, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana/ abrupta.
- AB** 15-33 cm, bruno-escuro (7,5 YR 3/2.5, úmida, 7,5 YR 2.5/2 molhada e 7,5 YR 4.5/2, seca); francoargilosa; Blocos subangulares, média e pequena que se desfaz em blocos subangulares, pequena e muito pequena, granular, moderada; Dura, friável, plástico e pegajoso; transição plana/ abrupta.
- BA** 33-52 cm, bruno-escuro (7,5 YR 3/3, úmida, 7,5 YR 2.5/2.5 molhada e 7,5 YR 4/3, seca); francoargilosa; Blocos subangulares, grande, média e pequena que se desfaz em pequena e muito pequena, moderada; Dura, friável, plástico e pegajoso; transição plana/ abrupta.
- Bi** 52-70 cm, bruno (7,5 YR 4/4, úmida, 7,5 YR 3/3 molhada e 7,5 YR 5/4, seca); francoargilosa; Blocos subangulares, média a grande que se desfaz em média a pequena, moderada a forte; Muito dura, friável, plástico e pegajoso; transição plana/ abrupta.
- BC** 70-80 cm, bruno-forte (7,5 YR 4.5/6, úmida, 7,5 YR 3/4 molhada e 7,5 YR 6/6, seca); francoargilosa; Blocos subangulares, média a grande e pequena que se desfaz em pequena, moderada a forte, presença de mosqueado (pouca); Muito dura, friável, plástico e pegajoso a muito pegajoso; transição plana/ abrupta.
- C1** 80 - 87 cm, transição plana/clara.
- CR1** 87-100 cm, transição ondulada/clara.
- CR2** 100-127 cm, transição ondulada/clara.
- CR3** 127 cm +, transição ondulada/clara.

**RAÍZES:** Muitas, fasciculadas, médias e finas nos horizontes A1, A2, AB e BA, e comuns e finas nos horizontes Bi e BC.

## ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS DOS HORIZONTES

Horizontes		Frações da Amostra Total			Composição granulométrica da Terra Fina			Argila dispersa em água	Grau de flocculação	Rel Silt/Arg
Simb	Prof. cm	Calh	Casc	T.Fina	Areia	Silte	Argila			
					g kg <sup>-1</sup>				%	
A1	0-5	0	0	1000	388	291	322	107	67	0,9
A2	5 - 15	0	0	1000	376	327	296	90	70	1,1
AB	15 - 33	0	0	1000	369	281	350	146	58	0,8
BA	33 - 52	0	0	1000	365	282	353	144	59	0,8
Bi	52 - 70	0	0	1000	362	285	353	173	51	0,8
BC	70 - 80	0	0	1000	364	283	353	220	38	0,8

pH (1:2,5)		Complexo sortivo							T	V	m
Água	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SB	Al <sup>3+</sup>	H+Al			
		cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>								%	
5,3	4,0	4,3	1,0	0,3	0,0	5,6	4,0	11,6	17,2	33	42
5,2	4,0	1,8	0,8	0,2	0,0	2,7	4,6	11,1	13,8	20	63
5,2	4,1	0,9	0,4	0,1	0,0	1,3	4,4	9,5	10,9	12	76
5,1	4,1	0,7	0,3	0,1	0,0	1,1	4,2	9,1	10,2	11	79
4,9	4,0	0,6	0,3	0,1	0,0	1,0	4,3	8,3	9,3	11	82
4,8	4,0	0,6	0,3	0,1	0,0	1,0	4,4	7,0	8,0	12	81

C.org	Ataque Sulfúrico		
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	g kg <sup>-1</sup>		
46,4			
37,6			
24,5			
18,7		105	51
15,1		123	54
9,9			