

JADIEL ANDOIGNINI

**EFEITO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS
DE SANTA CATARINA E NAS CARACTERÍSTICAS PRODUTIVAS E
NUTRITIVAS DA AVEIA-PRETA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, no Centro de Ciências Agroveterinárias da
Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito
para a obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Dr. Jackson Adriano Albuquerque

**LAGES, SC
2019**

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

Andognini, Jadiel

Efeito do grau de compactação nos atributos físicos de solos de Santa Catarina e nas características produtivas e nutritivas da aveia-preta / Jadiel Andognini. -- 2019.

88 p.

Orientador: Jackson Adriano Albuquerque

Coorientador: Álvaro Luís Mafra

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência Do Solo, Lages, 2019.

1. Proctor. 2. Avena strigosa. 3. Compactação do Solo. 4. Forragem. I. Albuquerque, Jackson Adriano. II. Mafra, Álvaro Luís. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência Do Solo. IV. Título.

JADIEL ANDOIGNINI

**EFEITO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS
DE SOLOS DE SANTA CATARINA E NAS CARACTERÍSTICAS
PRODUTIVAS E NUTRITIVAS DA AVEIA-PRETA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Banca Examinadora

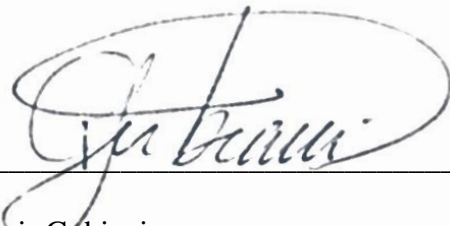
Orientador:

Dr. Jackson Adriano Albuquerque
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro Interno:

Dra. Letícia Sequinatto
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro Externo:



Dr. Paulo Ivonir Gubiani
Universidade Federal de Santa Maria

Lages/SC, 20 de fevereiro de 2019

A Deus.

Aos meus amados pais e irmãos.

A minha querida namorada, amiga e
companheira, Larissa.

Aos meus amigos.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por proporcionar condições para atingir todas as metas.

Aos meus pais Valmor e Neiva pelo apoio incondicional no meu processo de formação pessoal e profissional.

Aos meus irmãos Aderli, Fábio e Graciele pelo incentivo e apoio, e aos meus sobrinhos queridos Bruno, Miguel e Mariah, que dão mais força para seguir batalhando.

À querida Larissa pela paciência, ajuda, incentivo, companheirismo e amor nestes anos.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), campus de Lages (CAV) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pelo fornecimento de um ensino gratuito e de qualidade, e por viabilizar a realização do curso de mestrado.

À CAPES, pelo auxílio financeiro através do fornecimento da bolsa de estudo, e ao CNPq e FAPESC, pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Ao professor Dr. Jackson Adriano Albuquerque, pela orientação, confiança, amizade e ensinamentos durante estes anos, e pelo exemplo de conduta.

A todos os demais professores do PPGCS pelos ensinamentos, convívio e troca de conhecimentos.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Física e Manejo do solo, graduandos e pós-graduandos, que sempre estiveram perto nos dias de trabalho e descontração.

Aos demais colegas do PPGCS, pela troca de informações e auxílio intelectual.

Aos membros da banca examinadora pela disposição em avaliar e colaborar para a finalização do trabalho.

A todos que de alguma forma fizeram parte do trabalho, me ajudaram e torceram por mim.

Muito obrigado!

RESUMO

ANDOGNINI, Jadiel. **Efeito do grau de compactação nos atributos físicos de solos de Santa Catarina e nas características produtivas e nutritivas da Aveia-Preta.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, SC., 2019.

Solos cultivados, quando mal manejados, sofrem com a degradação física por compactação devido a pressão das máquinas e do gado durante o ano. A compactação é um grave problema, e recorrente nas propriedades agrícolas, principalmente nas que se trabalha com semeadura direta, degrada a estrutura física dos solos, afeta o crescimento de raízes e plantas com prejuízos econômicos e ambientais. O processo de compactação é dependente das características intrínsecas de cada solo, como textura e teor de matéria orgânica. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes graus de compactação (GC) na qualidade física de solos e nas características quantitativas e qualitativas da aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb), bem como o efeito da forrageira na descompactação dos solos. Para isso, foram coletadas amostras com estrutura alterada, na camada de 0 a 0,20 m dos solos: Latossolo Vermelho distrófico retrático, Cambissolo Húmico alumínico típico, Nitossolo Bruno distrófico típico e Nitossolo Bruno distrófico húmico. Foi determinada a densidade máxima do solo através do teste de Proctor Normal. No laboratório foram montados anéis volumétricos com diferentes GC (80, 85, 90, 95 e 100%) para determinar a curva de retenção de água, a resistência à penetração e a condutividade hidráulica em solo saturado. Na casa de vegetação foi cultivada aveia em vasos, num delineamento experimental inteiramente casualizado com cinco repetições e quatro plantas por vaso. Os solos foram acondicionados em três camadas nos vasos. A compactação foi estabelecida na camada central (GC de 80, 85, 90, 95 e 100%), a oito centímetros abaixo da superfície, simulando condições ocorrentes a campo. A aveia foi cultivada durante 100 dias, e mantida com altura entre 10 e 20 cm através de cortes periódicos. Foi determinada a taxa de crescimento em altura, massa verde e seca e realizado análises bromatológicas. Após a colheita foi determinada a densidade do solo no anel central e a massa de raízes de cada camada. A resistência a penetração varia menos no Cambissolo em relação aos demais solos, sendo considerado fator restritivo ao desenvolvimento das plantas, entretanto, a produtividade e a qualidade nutricional da aveia não são afetadas pelo grau de compactação. Desta forma, o grau de compactação que afeta a qualidade do solo varia entre solos, sendo que a resistência a penetração e macroporosidade limitam a qualidade para o Latossolo Vermelho, Cambissolo Húmico e Nitossolo húmico nos GC85, GC95 e GC90 respectivamente, e no Nitossolo típico somente a resistência a penetração limita a qualidade física no GC90. A compactação diminui a produtividade da aveia somente no Cambissolo e nos GC mais elevados. No Latossolo Vermelho e no Nitossolo típico e húmico a produtividade não é alterada. O teor de fibra em detergente ácido é alterado no Nitossolo típico, mas sem interferir na qualidade. A aveia tem potencial para atuar como agente biológico de descompactação, pois melhora a qualidade física dos solos.

Palavras-chave: Proctor. *Avena strigosa*. Compactação do Solo. Forragem.

ABSTRACT

ANDOGNINI, Jadiel. **Degree of compaction effects in the physical attributes of soils from Santa Catarina and in the productive and nutritional characteristics of Black Oat.** 2019. Dissertation (MSc in Soil Science) – Santa Catarina State University. Soil Science postgraduate program, Lages, SC, 2019.

Soils cultivated, when mismanaged, suffer with the physical degradation by soil compaction because of the machines and cattle pressure during the year. The compaction is a serious problem, and common in the farms, mainly in the no-tillage system, degrades soil physical structure, affects root and plants growth with economic and environmental losses. Compaction process depends of intrinsic characteristics of each soil, like particle size and organic matter content. The objective of this study was evaluate the effect of different degree of soil compaction (DC) in physical attributes of soils, and in black oat (*Avena strigosa* Schreb) features, and the effect of the forage in soil recovery. For this, samples were collected in the arable layer, from 0 to 0,20 m of the soils: Latossolo Vermelho distrófico retrático, Cambissolo Húmico aluminico típico, Nitossolo Bruno distrófico típico and Nitossolo Bruno distrófico húmico. The maximum soil density was obtained by Proctor test. In the laboratory, soil samples were made in volumetric rings with some different degree of compaction (80, 85, 90, 95 and 100%) to determine the soil-water retention curve, soil penetration resistance and soil saturated hydraulic conductivity. In green house was cultivated oat in vases, under completely randomized design with five repetitions, with four plants per vase. The soils were packed in the vases in three layers. In the central sublayer the compaction was contained (DC 80, 85, 90, 95 and 100%) at eight centimeters belowground, simulating conditions that occurs at the field. The oat was cultivated for 100 days and maintained at height between 10 and 20 cm with periodical cuts. The growth rate in height was measured, green and dry mass and bromatological analyzes. After harvest, the soil density in the central ring was measured and determined the root mass in each layer. The penetration resistance was altered with less intensity in the Cambissolo in relation to the other soils, and considered restrictive to plant growth, however, productivity and nutritional quality of black-oat were not changed to the degree of compaction. Thus, the degree of compactness that affects soil quality and restrict plant growth change between soils, penetration resistance and macroporosity limit the quality to Latossolo, Cambissolo and Nitossolo húmico at DC85, DC95 and DC90 respectively, and in the Nitossolo típico, penetration resistance limits physical quality at DC90. The compactness reduces Oat productivity only at Cambissolo and in higher DC. In the Latossolo Vermelho and Nitossolo típico and húmico, productivity is not altered. Acid detergent fiber content changed in the Nitossolo típico but did not interfere in the quality. Black oat has potential as a biological agent of soil recovery, because it improves soils physical quality.

Index terms: Proctor. *Avena strigosa*. Soil compaction. Forage.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapa de localização dos quatro solos amostrados para realização do trabalho.33
- Figura 2 - Execução do teste de Proctor Normal. A) Solo seco ao ar, destorroado e peneirado; B) Aparelho Soiltest CN4230 e; C) Amostra extraída do cilindro com auxílio de um extrator de amostra tipo macaco hidráulico..... 36
- Figura 3 - Curva de compactação do solo para Latossolo Vermelho distrófico retrático (LVCN) (A), Cambissolo Húmico alumínico típico (CHLG) (B), Nitossolo Bruno distrófico típico (NBPA) (C) e Nitossolo Bruno distrófico húmico (NBSJ) (D).37
- Figura 4 - Anéis volumétricos artificialmente compactados com solo de estrutura alterada, representando densidades que correspondem aos tratamentos de diferentes GC..38
- Figura 5 - Realização de teste de RP em penetrômetro de bancada Marconi (MA 933).40
- Figura 6 - Realização do teste Ks em permeâmetro de carga variável.....40
- Figura 7 - A) Demonstração da fita na junção dos anéis impedindo o crescimento periférico das raízes; B) Vasos montados com cultura semeada; e C) Plantas emergindo nos vasos.42
- Figura 8 - Curvas de retenção de água para o Latossolo Vermelho distrófico retrático (LVCN) (A), Cambissolo Húmico alumínico típico (CHLG) (B), Nitossolo Bruno distrófico típico (NBPA) (C) e Nitossolo Bruno distrófico húmico (NBSJ) (D) para cada GC, determinado em nove tensões, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten.....47
- Figura 9 - Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho distrófico retrático em diferentes graus de compactação.49
- Figura 10 – Massa seca de raízes (A), Massa verde da parte aérea (B), Massa seca da parte aérea (C), Taxa de crescimento das plantas (D) e teor de fibra (E), em diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho distrófico retrático.51
- Figura 11 – Porosidade de aeração de um Cambissolo Húmico alumínico típico em diferentes graus de compactação.54
- Figura 12 – Massa seca de raízes (E), Massa verde da parte aérea (F), Massa seca da parte aérea (G), Taxa de crescimento das plantas (H) em diferentes graus de compactação de um Cambissolo Húmico alumínico típico.55
- Figura 13 – Porosidade de aeração de um Nitossolo Bruno distrófico típico em diferentes graus de compactação.....57
- Figura 14 – Massa seca de raízes (A), Massa verde da parte aérea (B), Massa seca da parte aérea (C), Taxa de crescimento das plantas (D) e teor de fibras (E) em diferentes graus de compactação de um Nitossolo Bruno distrófico típico.....59
- Figura 15 – Porosidade de aeração de um Nitossolo Bruno distrófico húmico em diferentes graus de compactação.61

Figura 16 - Massa seca de raízes (A), Massa verde da parte aérea (B), Massa seca da parte aérea (C), Taxa de crescimento das plantas (D) e teor de fibra (E) em diferentes graus de compactação de um Nitossolo Bruno distrófico húmico. 63

Figura 17 – Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), determinado pela densidade do solo nos níveis críticos de indicadores físicos de qualidade do solo para Latossolo Vermelho distrófico típico (LVCN), Cambissolo Húmico alumínico típico (CHLG), Nitossolo Bruno distrófico típico (NBPA) e Nitossolo Bruno distrófico húmico (NBSJ)... 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe, localização, coordenadas e altitude dos quatro solos amostrados para realização do trabalho.	33
Tabela 2 - Caracterização física e química dos solos coletados.	34
Tabela 3 - Teor de água disponível às plantas para quatro solos do estado de Santa Catarina compactados artificialmente.	46
Tabela 4 – Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico retrático para diferentes graus de compactação.	49
Tabela 5 - Atributos físicos de um Cambissolo Húmico alumínico típico para diferentes graus de compactação.	53
Tabela 6 - Atributos físicos de um Nitossolo Bruno distrófico típico para diferentes graus de compactação.	56
Tabela 7 - Atributos físicos de um Nitossolo Bruno distrófico húmico para diferentes graus de compactação.	61
Tabela 8 - Atributos físicos de quatro solos de Santa Catarina, antes e após o cultivo de aveia preta.	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVO	21
1.1.1	Objetivos específicos	21
1.2	HIPÓTESES	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	SISTEMAS DE MANEJO	23
2.2	INFLUÊNCIA DO MANEJO NA FÍSICA DO SOLO	25
2.2.1	Densidade máxima e umidade ótima de compactação	26
2.2.2	Densidade e grau de compactação do solo	27
2.2.2.1	Relação grau de compactação x culturas forrageiras.....	28
2.2.3	Resistência a penetração do solo	28
2.2.4	Porosidade do solo	29
2.2.5	Condutividade hidráulica do solo	30
2.3	INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO ATRIBUTO DE QUALIDADE FÍSICA	30
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	SOLOS	33
3.2	COLETA DOS SOLOS	34
3.3	DETERMINAÇÕES DE LABORATÓRIO	34
3.3.1	Ensaio de Proctor Normal	34
3.3.2	Montagem dos anéis volumétricos em laboratório	37
3.3.3	Densidade, porosidade e curva de retenção de água	38
3.3.4	Resistência a Penetração do Solo	39
3.3.5	Condutividade Hidráulica Saturada	40
3.4	EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO	41
3.4.1	Montagem dos vasos	41
3.4.2	Implantação da cultura	42
3.4.3	Evapotranspiração e atributos produtivos da aveia preta	42
3.4.4	Avaliação de raízes	43
3.5	ANÁLISES BROMATOLÓGICAS	44
3.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	45
4.2	LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO RETRÁTICO ÚMBRICO	47

4.3 CAMBISSOLO HÚMICO ALUMÍNICO TÍPICO	52
4.4 NITOSSOLO BRUNO DISTRÓFICO TÍPICO	56
4.5 NITOSSOLO BRUNO DISTRÓFICO HÚMICO.....	60
4.6 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO	64
4.7 POTENCIAL DA AVEIA NA RECUPERAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS.....	66
5 CONCLUSÕES	69
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	85

1 INTRODUÇÃO

A agricultura passou por diversas mudanças até os dias atuais. Um grande marco foi a utilização do sistema de semeadura direta (SSD), também conhecido popularmente como “plantio direto”, difundido no Brasil nos anos 70. Este sistema preconizou o não revolvimento do solo, a utilização de plantas de cobertura e rotação de culturas. Tem vantagens comparado ao sistema convencional, pois reduz as perdas de solo, nutrientes e água, demanda menor consumo de combustível e, para algumas culturas, aumenta sua produtividade (ALBUQUERQUE et al. 2001; SILVA et al. 2014). Iniciou em propriedades da região sul (PR e RS) e expandiu para as demais regiões, com grande desenvolvimento nos anos 90.

Acompanhando o desenvolvimento do SSD, muitas áreas rurais passaram a ser cultivadas com culturas anuais de grãos (feijão, milho e/ou soja) durante o verão e plantas de cobertura na entressafra, época que a área permanecia em pousio. Estas plantas, além de servirem como proteção para o solo, foram utilizadas como alimentação para o gado. É um sistema denominado de “Integração lavoura-pecuária” (ILP), ou seja, atividades agrícolas e pecuárias desenvolvidas na mesma área em diferentes épocas do ano.

O Brasil possui um dos maiores rebanhos bovinos do mundo, com aproximadamente 218 milhões de cabeças, segundo dados atualizados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), e a pastagem é o alimento básico de aproximadamente 96% destes animais (ANUALPEC, 2008), com área total (naturais e plantadas) de 159 milhões de hectares (IBGE, 2018).

Na região sul do Brasil predomina agricultura familiar, com mais de 800 mil estabelecimentos que representam 16% da área agrícola familiar do Brasil, e muitas dessas implantaram o SSD. O estado de Santa Catarina (SC) tem pequenas propriedades, que exercem as mais variadas atividades agrícolas, dentre estas a pecuária de corte e leite. O estado também oferece um produto com grande potencial e apreciado pelos mais exigentes mercados, a carne de bovinos criados a pasto, o chamado “boi verde” ou “boi de capim” (grass-fed beef). O estado tem 4% do rebanho bovino brasileiro, com 550 mil cabeças, numa área de 1,832 milhões de hectares de pastagens (IBGE, 2018). A microrregião dos Campos de Lages, na serra de SC, vem tendo grande expansão na atividade, com implemento de pastagens melhoradas e aplicação de tecnologia nas propriedades, assim como a microrregião de Curitibanos, representada principalmente pelo município de Campos Novos, que além de ser considerada “celeiro do estado”, vem expandindo a atividade pecuária com o sistema ILP.

Entretanto, em áreas cultivadas, uma das principais causas de degradação dos solos é a compactação, e isso preocupa quando manejadas com integração lavoura-pecuária no SSD (COLLARES, 2005). A compactação pode ser definida como um rearranjo das partículas do solo, com redução do volume e da porosidade (CURI et al., 1993) ou o adensamento do solo pela aplicação de uma energia mecânica (HOLTZ & KOVACS, 1981). Agronomicamente é um efeito indesejado ao ponto que os prejuízos são maiores que o custo de recuperação, e é um dos grandes entraves à obtenção de elevadas produtividades das pastagens (LIMA et al., 2004).

A mecanização agrícola facilita o trabalho do produtor rural, embora em alguns momentos possa causar degradação dos solos, pois a principal energia que comprime o solo daí provém (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Nas áreas de ILP, o efeito da mecanização e pequena mobilização do solo, é somado ao efeito do pisoteio animal, motivo pelo qual nesse sistema a compactação é recorrente. Este fenômeno é verificado principalmente na camada superficial (Alves & Suzuki, 2004), diferentemente das áreas com preparo convencional, onde o problema também ocorre, porém em profundidades maiores (SALES, 2016), dependendo do alcance dos implementos de preparo do solo.

A compactação tem estreita relação com alguns atributos do solo, como porosidade, densidade, permeabilidade, retenção e disponibilidade de água, entre outros, e isto, dependendo do grau de compactação, pode afetar negativamente a relação do solo com a planta, dificultar a penetração das raízes, reduzir a aeração na rizosfera e prejudicar os processos metabólicos da planta. Todas estas alterações causadas ao solo são dependentes de outros fatores intrínsecos deste, principalmente da textura e MO, que determina o tamanho e distribuição de poros e densidade do solo.

Desta forma, para avaliar o efeito da compactação dos solos com o crescimento das culturas, usa-se o grau de compactação (GC) (COLLARES et al., 2008; SECCO et al., 2009), que é o quociente da densidade atual do solo pela densidade máxima do mesmo solo obtida no ensaio de Proctor Normal (VARGAS, 1977; LIPIEC et al., 1991; SILVA et al., 1997). É um parâmetro que facilita a análise das mudanças nos atributos físicos como macroporosidade, permeabilidade ao ar e resistência a penetração. O efeito da compactação está relacionado a umidade e ao tipo de solo (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

Estudos da relação do GC com o crescimento de plantas são recentes no Brasil (DIAS JUNIOR & ESTANISLAU, 1999; SUZUKI et al., 2007; BETIOLI JUNIOR et al. 2012), por isso faz-se necessário avaliar a resposta das culturas em diferentes níveis de densidade, afim de definir qual a faixa de GC que favorece as plantas e qual é seu limite crítico para as culturas.

Os Cambissolos são os solos mais representativos no estado de Santa Catarina, ocupando grande parte do território, e bastante utilizados para produção de pastagens principalmente na região serrana. Os Latossolos e Nitossolos são os solos mais utilizados para a agricultura no Brasil, também em Santa Catarina, pois localizam-se geralmente em áreas mais planas e são mais profundos, o que facilita a mecanização. Conseqüentemente, esta intensa utilização torna estes mais sujeitos a degradação física, demandando pesquisas para definir um indicador de qualidade do solo. Este deve permitir que os agricultores tomem decisões sobre o uso e manejo do solo, bem como de práticas que podem ser necessárias para melhorar os atributos do solo e o crescimento das culturas.

Sabe-se que diferentes solos, com diferente granulometria e teor de matéria orgânica não se comportam de maneira igual, resistindo mais ou menos a pressões externas que causam a compactação, e atingem limites críticos de qualidade em densidades distintas, o que torna difícil a comparação entre eles. Por isso, o estudo do GC é importante, pois é um atributo menos dependente da granulometria e teor de matéria orgânica do solo.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes graus de compactação (GC) em atributos físicos de quatro solos e nas características de crescimento e bromatológicas da aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb), bem como o efeito da forrageira na descompactação do solo.

1.1.1 Objetivos específicos

Avaliar o efeito de cinco graus de compactação na porosidade, capacidade de aeração, retenção de água, condutividade hidráulica e resistência a penetração.

Avaliar o efeito de diferentes graus de compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular bem como nas características nutricionais da aveia-preta.

Avaliar o potencial da cultura da aveia na recuperação física dos solos através dos atributos físicos analisados.

1.2 HIPÓTESES

A cultura tem melhor crescimento no solo com densidade até a correspondente ao GC90, e a partir deste tem seu desenvolvimento afetado negativamente em todos os solos.

O sistema radicular da aveia preta reduz a densidade do solo, atuando como agente de descompactação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMAS DE MANEJO

O Sistema de manejo preparo convencional é caracterizado pelo preparo do solo com revolvimento, herança vinda dos colonizadores europeus, que utilizavam destas técnicas a muito tempo, porém eram regiões temperadas, diferente do Brasil que possui regiões tropicais e subtropicais. Este sistema predominou no Brasil para a implantação das culturas, e deixava o solo com pouca ou nenhuma cobertura no desenvolvimento inicial das plantas. Esta prática demonstrou-se a principal causa de degradação dos solos no país (MIELNICZUK et al. 2003). O intenso revolvimento e ausência de práticas conservacionistas causaram graves problemas de erosão do solo, intensificando processos de degradação e perda da camada superficial, sendo um fator de empobrecimento do solo e baixa produtividade das culturas (BERTOL & MIQUELUTI, 1993).

Objetivando avaliar os efeitos do preparo no solo e nas culturas, estudos relacionados a física do solo foram iniciados no início do século passado. Considerou-se a compactação subsuperficial consequência deste sistema de manejo para a cana-de-açúcar (GIBB, 1939), devido ao uso de máquinas no preparo do solo, pois os agregados eram destruídos adensando o solo cada vez mais (BODMAN & RUBIN, 1948). Laws & Evans (1949) também observaram redução da macroporosidade e aumento da micro em profundidade, como consequência do preparo. Diversos estudos foram publicados visando o uso consciente do solo, de modo a preservar as características produtivas e ambientais (BENNETT, 1947; KOHNKE & BERTRAND, 1959; GREENLAND & LAL, 1975).

Os efeitos do manejo com revolvimento do solo foram observados no mundo todo, gerando discussões sobre a necessidade da modificação deste modo de preparo. Assim, na estação experimental de Rothamsted, Inglaterra, surgiram os primeiros trabalhos utilizando sistemas de plantio direto, caracterizado pelo menor revolvimento do solo e manutenção dos resíduos na superfície. Seguindo estes estudos, na década de 1960, na Europa, EUA e Canadá, diversas fazendas também iniciaram testes com o novo sistema.

No Brasil, há registros de operação sem revolvimento do solo em 1969, no Posto Agropecuário do Ministério da Agricultura, em Não-Me-Toque, RS, considerada a primeira operação em escala experimental (BORGES, 1993). Na década de 1970, em propriedades rurais do estado do Paraná, foram relatados sua aplicação em lavouras (BORGES, 1993) posteriormente expandindo pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (CORRÊA, 1985). Nestas regiões, problemas de erosão,

perda de nutrientes eram frequentes, então, buscou-se introduzir um sistema para melhorar a qualidade física do solo e amenizar esta degradação.

Na década de 1990, após alguns anos de testes, o plantio direto expandiu significativamente. Em 1975/76 ocupava 32.500 ha; meados dos anos 90 aumentou para 5.500.000 há; em 2005/06 eram 25.500.000 ha (FEBRAPD, 2018); e atualmente é de 32.878.660 ha (IBGE, 2018). Este sistema consolidou-se e hoje é a principal prática de manejo conservacionista do solo

Esse sistema de manejo traz benefícios e é visto como unanimidade entre agricultores, técnicos e pesquisadores. Entretanto, a resposta quanto aos efeitos sobre atributos do solo e produtividade das culturas precisa ser melhor estudada regionalmente, visto que os efeitos do plantio direto na qualidade do solo têm relação com tipo de solo, clima, relevo e cultura (SIDIRAS & VIEIRA, 1984).

Nas lavouras de grãos, ainda existe a possibilidade de integração com outras atividades, principalmente em áreas sob semeadura direta. Um sistema denominado Integração Lavoura-Pecuária (iLP) vem sendo amplamente utilizado pelos produtores rurais no Brasil que exploram grãos e gado (de corte ou de leite). Consiste num conjunto de atividades dentro da propriedade agrícola numa mesma área, porém em diferentes épocas, e de forma harmônica, tendo como objetivo mudar o sistema de uso da terra e integrar componentes para maximizar efeitos desejáveis ao meio ambiente. Possibilita que o solo seja explorado economicamente durante todo o ano, favorecendo a oferta de grãos, de carne e de leite a um custo mais baixo, devido ao sinergismo que se cria entre lavoura e pastagem (ALVARENGA & NOCE, 2005).

No Rio Grande do Sul, a iLP existe desde o início do século 20, onde o gado bovino pastejava a resteva do arroz irrigado. A partir da década de 70, modelos integrando soja e milho com pastagens de inverno ganharam importância (BALBINO et al., 2012). Entretanto, diversos trabalhos demonstram o potencial de degradação física do solo por compactação no plantio direto integrado (ALBUQUERQUE et al., 2001). Este processo se dá pelo fato da ausência de movimentação do solo, exceto na linha de plantio e vem se intensificando em função do maior tamanho das máquinas agrícolas, que consiste no principal fator de alteração das propriedades físicas do solo neste sistema (TORMENA, 1998a). O manejo inadequado e uso intensivo do solo trouxe consequências insustentáveis, como degradação dos solos e baixos índices produtivos.

Essa degradação dos solos é grave, pois prejudica tanto as culturas de grãos quanto a pecuária. Segundo o Censo Agropecuário do IBGE (2007), o Brasil soma 9,9 milhões de ha de pastagens degradadas, daí a necessidade de se conhecer os níveis em que o solo pode ser

considerado um fator restritivo às culturas e realizar modificações no sistema de uso e/ou manejo.

2.2 INFLUÊNCIA DO MANEJO NA FÍSICA DO SOLO

O plantio direto surgiu para trazer maior sustentabilidade do ambiente e do sistema produtivo. Entretanto, devido ao tráfego de máquinas e implementos pesados, têm surgido problemas de degradação física dos solos, em especial a compactação. Neste sistema o solo é submetido a menor tráfego, mas não é revolvido por longos períodos (VIEIRA, 1981). Calcula-se que 80-90% da compactação potencial ocorre logo nas primeiras entradas das máquinas nas áreas (MEEK et al., 1988; BLACKWELL et al., 1989).

Solos de textura argilosa são os mais utilizados na agricultura por serem encontrados geralmente em regiões de relevo mais plano, serem mais profundos, e por ter interferência direta na retenção e disponibilidade de água (REICHERT et al., 2009b), na capacidade de troca de cátions (CTC) (CIOTTA et al., 2003), entre outros atributos. Ao mesmo tempo são mais suscetíveis à compactação, devido ao tamanho das partículas favorecer a reorganização das partículas, aumentar a coesão e elevar o adensamento (BAVER et al., 1972). Deve-se ter atenção especial para a umidade do solo durante as operações agrícolas. Este mesmo cuidado deve-se ter em áreas de pastagens, nas quais os animais permanecem nas áreas durante longos períodos e com solos com umidades variadas.

Um indicador importante da qualidade do solo é o tamanho e estabilidade de agregados, quanto maiores e mais estáveis melhor é a qualidade (COSTA, 2001; VEZZANI & MIELNICZUK, 2009), apesar de alguns solos compactados apresentarem alta estabilidade, gerada pela coesão das partículas. A ação do pisoteio e pastejo intensivo, em sistemas conservacionistas, pode reduzir o aporte de material orgânico e o estoque de matéria orgânica, com consequências na agregação do solo (BORTOLINI et al. 2016), principalmente em solos de textura mais arenosa. Este efeito ocorre a longo prazo, pois mudanças no teor de matéria orgânica demandam tempo para ocorrer. A compactação associada ao pisoteio animal é descrita em alguns trabalhos, assumindo que bois de 400 a 500 kg geram pressões no solo que variam entre 0,25 e 0,49 MPa (CARVALHO, 1976; PROFFITT et al., 1993).

No processo de compactação, ocorre um fenômeno de adensamento das partículas de solo, e empacotamento destas, de forma que o volume de macroporos é reduzido, e proporcionalmente os microporos aumentam (SILVA et al., 1986, REICHERT et al, 2007; BLAINSKI et al., 2008). Observa-se aumento da densidade, pois reduz a porosidade total e,

principalmente, os poros responsáveis pela aeração, drenagem e crescimento das raízes e fauna (CARTER, 1990; REICHERT et al., 2007; ROMERO et al., 2014). Esse processo é mais intenso quando o pisoteio e o trânsito de máquinas ocorrem com solo na consistência plástica (BRAIDA et al. 2010; LUCIANO et al., 2012). Com isso, os fluxos da água, de gases (oxigênio e dióxido de carbono) e dos nutrientes, além da temperatura, podem limitar o desenvolvimento das plantas (FOLONI et al., 2006; REICHERT et al., 2007) pois prejudica transpiração e o acúmulo de matéria seca (FOLONI et al., 2003).

Segundo Xu et al. (1992), quando a porosidade de aeração é reduzida a menos de 10% do volume total de poros, a aeração no solo é muito baixa e causa anaerobiose das raízes das plantas.

Reinert et al. (2008) observaram que a camada de solo entre 0,08 e 0,15 m de profundidade é a mais afetada pela compactação no plantio direto, e a camada superficial apresenta menor densidade pelo fato de haver maior acúmulo de matéria orgânica e maior concentração de raízes, e pela ação mecânica dos discos dos implementos de semeadura (SILVA, 2003). Entretanto, dependendo do tempo de implantação do sistema de manejo, variações de solo, clima e até mesmo da forma com que se pratica as atividades, esta profundidade pode variar (TORMENA et al., 2002; COSTA et al., 2003).

2.2.1 Densidade máxima e umidade ótima de compactação

A densidade referência de um solo, ou densidade máxima, é um estado do solo em que as partículas sólidas estão arranjadas de maneira que ocupem a maior parte possível de um determinado volume, sob determinadas condições. Esta condição é dependente da energia aplicada e da umidade do solo no momento da compactação (VARGAS, 1977) e pode ser avaliada através do ensaio de Proctor Normal.

Em condições de solo seco, com a água retida sob o fenômeno da capilaridade e adsorção, o rearranjo das partículas de solo é dificultado. Em solo muito úmido, quando existe “água livre”, a energia de compactação é absorvida pela água, impedindo que as partículas se arranjam de forma a atingir altas densidades. O solo ao ser pressionado flui sem se compactar, conforme observado em lavouras de arroz irrigado. Já num ponto intermediário de umidade, o solo atingirá a máxima densidade, denominado “umidade ótima” de compactação para determinada energia aplicada (BUENO & VILAR, 1998).

O teor de matéria orgânica do solo também é fator de influência para a densidade máxima do solo. Conforme Braida et al. (2006), quanto maior a quantidade de material

orgânico, menor a susceptibilidade do solo à compactação. Via de regra, para um mesmo solo, com mesma energia aplicada, quanto mais matéria orgânica, menor é a densidade máxima atingida, e maior o teor de água necessário para atingi-la (BOUKOUNGA, 2009; LUCIANO et al., 2012). A matéria orgânica e os resíduos do solo agem como um amortecedor frente a pressão exercida e absorvem parte dessa energia (BRAIDA et al., 2006; BAYER et al., 2009), além de atuar na agregação do solo (RAUBER et al., 2012; LOSS et al., 2015).

De maneira geral, conhecer a umidade ótima de compactação é de grande valia para determinação da faixa de umidade na qual as atividades a campo são potencialmente menos prejudiciais a qualidade do solo.

2.2.2 Densidade e grau de compactação do solo

Atributos físicos indicadores de qualidade física do solo podem se mostrar ineficientes para analisar a resposta das culturas à compactação do solo (GUBIANI, 2012) quando analisados individualmente. Alguns estudos indicam intervalos de densidade considerado prejudicial ao crescimento das raízes e plantas, densidade a qual é denominada crítica (REICHERT et al., 2003; REICHERT et al., 2007, REINERT et al., 2008). A densidade crítica é dependente da textura do solo como demonstra REICHERT (2009a), e quanto maior o conteúdo de argila, menor a densidade crítica para as culturas (MARIA et al., 1999; STRECK, 2003). A densidade crítica do solo pode ser delimitada num ponto onde a qualidade física do solo é afetada, e restringe o crescimento e desenvolvimento das plantas. Resistência do solo a penetração, porosidade de aeração, densidade e intervalo hídrico ótimo são indicadores normalmente relacionado com o crescimento de plantas.

Além disso, é importante frisar que os limites críticos para o desenvolvimento de uma cultura variam de acordo com o atributo da cultura que se está avaliando (SILVA et al., 2014), e variam entre diferentes culturas. Generalizações em relação a densidade que determinado solo prejudica a cultura devem ser evitadas.

Sabendo que um valor crítico de densidade é o que gera algum prejuízo a planta, podemos relacionar a compactação do solo (densidade do solo) com o crescimento das culturas (LUCIANO et al., 2012; SILVA et al. 2014), através de um índice denominado grau de compactação. O grau de compactação é expresso em porcentagem e resulta da relação da densidade atual com uma densidade de referência (densidade máxima ou compactação máxima), obtida em laboratório, pelo teste de Proctor (CARTER, 1990; TWERDOFF et al., 1999). Suzuki (2005) avaliou alguns atributos da soja em um Argissolo e um Latossolo e

concluiu que os maiores rendimentos foram obtidos no grau de compactação de 85% para os Argissolos e 82% para os Latossolos, no Rio Grande do Sul.

Se faz importante testar os atributos de qualidade dos solos em diferentes graus de compactação e relacionar com desenvolvimento de culturas, em diferentes tipos de solo, afim de estabelecer valores críticos dos atributos.

2.2.2.1 Relação grau de compactação x culturas forrageiras

Os estudos relacionando graus de compactação com desenvolvimento de culturas forrageiras e qualidade das mesmas são incipientes no Brasil. Estudando as espécies forrageiras *Brachiaria brizantha* cv. MG-5 Vitória, *Brachiaria ruzizienses* e *Panicum maximum* cv. mombaça, Baracho (2016) não observou efeito do grau de compactação para produção de massa verde e massa seca da parte aérea, altura, volume da raiz, proteína bruta, fibra em detergente neutro, fibra em detergente ácido e lignina. Também não observou efeito do grau de compactação para a interação adubação nitrogenada e grau de compactação para a forrageira *Panicum maximum* cv. mombaça.

A qualidade de uma planta forrageira é composta pela interação da composição bromatológica, da digestibilidade e do consumo voluntário pelo animal. Sendo assim, é importante conhecer os teores de proteína bruta, de fibra em detergente neutro, de fibra em detergente ácido e da matéria seca para atingir os benefícios que uma forrageira de qualidade trará na alimentação do animal (BARACHO, 2016; GERDES et al, 2000).

2.2.3 Resistência a penetração do solo

A ação do tráfego de máquinas e implementos, acrescido do pisoteio animal em áreas mal manejadas, como visto, compacta o solo, reduz a porosidade total, de aeração, e aumenta a densidade do solo. Esta consequência gera outras modificações indesejáveis, como a elevação da resistência mecânica do solo à penetração (RP) (COSTA et al., 2003), que é um fator de avaliação de qualidade física do solo (DORAN & PARKIN, 1994) e pode limitar o crescimento das raízes e distribuição das mesmas no perfil do solo.

A RP é relacionada ao conteúdo de água no solo, a granulometria e a mineralogia do mesmo (MORAES et al., 2014), e diversos autores estudam RP crítica para o desenvolvimento das culturas em diferentes classes de solo (GERARD et al., 1982; EHLERS et al., 1983; ASSIS et al., 2009).

O conteúdo de água no solo exerce uma relação indireta com a RP, importante na quantificação desta (KLEIN, 2008; SILVEIRA et al., 2010), pois age como lubrificante ao redor das partículas e reduz a coesão entre partículas (ALMEIDA et al., 2008). A granulometria tem relação com energia de atração das partículas, quanto mais argiloso o solo, mais coeso será, principalmente em baixas umidades, e a matéria orgânica tem relação com a agregação e a estrutura (SÁ & SANTOS JÚNIOR, 2005), e afetam a RP.

O sistema radicular de algumas plantas apresenta alguma tolerância à compactação. Ameniza o efeito da RP através da busca por rotas preferenciais, de menor impedimento, e forma canais pelos quais incorpora matéria orgânica, e esse rompimento é mais uniforme do que com o uso de implementos agrícolas, como observado por Camargo & Alleoni (1997). Jimenez et al. (2008) observaram que algumas monocotiledôneas têm habilidade de se desenvolver quando da ocorrência de camadas compactadas abaixo delas, e as dicotiledôneas são mais sensíveis a esta característica (BRUSSAARD & VAN FAASSEN, 1994). As espécies com habilidade de atingir profundidades abaixo da compactada absorvem nutrientes e liberam na camada mais superficial e são importantes em sistemas de rotação de culturas.

De maneira geral, considera-se de 2,0 a 2,5 MPa a faixa crítica de resistência do solo com redução importante no crescimento radicular (TAYLOR, 1971). Valores excessivos de RP podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular (IIJIMA & KONO, 1991). Além disso, estudos indicam que a resistência à penetração das raízes tem efeitos diretos no crescimento da parte aérea das plantas (MASLE & PASSIOURA, 1987).

2.2.4 Porosidade do solo

A ação das máquinas e implementos agrícolas e do pisoteio intensivo em sistemas conservacionistas pode degradar o solo, reduzir o aporte de matéria orgânica e a agregação, e favorecer a compactação, com isso aumenta a densidade e a resistência a penetração e reduz a porosidade total, principalmente a macroporosidade (COLLARES, 2005; MOREIRA et al., 2014).

Modificações significativas que ocorrem em decorrência da compactação provocarão alterações na relação solo-água-ar, e conseqüentemente do crescimento e desenvolvimento dos vegetais (KIM et al., 2010; WEISSKOPF et al., 2010). As alterações na porosidade são das mais significativas neste processo, e este atributo é utilizado para avaliar o impacto dos sistemas de preparo e manejo do solo (CARNEIRO et al., 2009).

A redução da porosidade total em decorrência do uso e manejo do solo, afeta principalmente os macroporos (TORMENA et al., 2004), e isso interfere diretamente em outras características como aeração, fluxo e disponibilidade de água e resistência a penetração, prejudicando o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas. Um limite de porosidade de aeração de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ é atribuído aos solos como sendo um mínimo de porosidade necessária para o crescimento e desenvolvimento radicular que mantenha as necessidades fisiológicas da planta (VOMOCIL & FLOCKER, 1966; BELTRAME et al., 1981; XU et al., 1992), e abaixo deste limite resulta em anaerobiose.

Em áreas manejadas sob sistema onde não se utiliza o revolvimento do solo, o volume de microporos é maior e a porosidade total e macroporosidade menor que num solo onde há revolvimento (STONE & SILVEIRA, 2001). Entretanto, nos sistemas que preservam a cobertura do solo, favorece o aumento do teor de matéria orgânica (LOVATO et al., 2004) com efeito positivo sobre a estrutura, na estabilidade dos agregados e benefícios as raízes das culturas (ALBUQUERQUE et al., 2005).

2.2.5 Condutividade hidráulica do solo

A condutividade hidráulica saturada (K_s) é um parâmetro que mede o deslocamento de água no solo, como um método indireto para quantificar a infiltração de água à campo. Diversos métodos são empregados para esta avaliação, porém todos com grande variabilidade, como relatado por Teixeira (2001). O valor máximo é registrado quando o solo está saturado, denominado de condutividade hidráulica saturada (REICHARDT, 1990).

Esta propriedade tem estreita relação com a distribuição do tamanho de poros e sua continuidade, textura, porosidade drenável e densidade do solo, sendo a principal correlação com a macroporosidade do solo (SORACCO et al., 2012). Gonçalves e Libardi (2013) destacam um solo argiloso pode ter K_s semelhante à de um solo arenoso, devido ao efeito da estrutura do solo e a formação de macroporos.

2.3 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO ATRIBUTO DE QUALIDADE FÍSICA

Como já visto, as práticas de manejo aplicadas de maneira errônea podem alterar as propriedades físicas do solo e reduzir a qualidade, que influencia na produtividade das culturas. Dexter e Youngs (1992) já diziam que para um sistema agrícola ser sustentável, a compreensão e quantificação destas práticas sobre a qualidade física é essencial. Individualmente, os fatores variam grandemente de acordo com a densidade, e o fato desta variar no tempo e espaço, fica

difícil relacionar esses fatores com produtividade. Deste modo, é interessante conhecer a variação dos atributos físicos de acordo com diferentes densidades que o solo possa atingir.

Os atributos que mais se tem estudos da relação com desenvolvimento de plantas são resistência do solo a penetração, retenção de água e aeração do solo (LETEY, 1985), o segundo atributo representado pela capacidade de campo e ponto de murcha permanente e o último pela macroporosidade.

A literatura tem citado valores limitantes destas características em relação ao crescimento de plantas, como 2 MPa definido como resistência a penetração que restringe o crescimento e bom funcionamento do sistema radicular (TORMENA et al., 1998b; SILVA et al., 2008; LIMA et al., 2012), uma macroporosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para que a difusão de oxigênio ocorra de maneira satisfatória (VOMOCIL & FLOCKER, 1966; BELTRAME et al., 1981; XU et al., 1992), e um intervalo de umidade entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente, denominado água disponível, usado para definir estratégias de manejo (CASSEL & NIELSEN, 1986).

A umidade é um fator que interfere diretamente nas características do solo, e deve ser levada em consideração para avaliar as condições físicas e para tomar decisões sobre práticas de manejo, visto que modificações na sua quantidade magnificam o impacto na estrutura do solo.

Todos estes atributos citados exercem influenciam na produtividade e qualidade das plantas, e, portanto, há necessidade de quantifica-los, mas pelo fato da grande variação, dependendo da densidade e umidade do solo, procurou-se uni-los em uma variável em que todas as condições interagissem (DEXTER, 1988). Letey (1985) propôs o conceito de uma única variável, denominado “Non Limiting Water Range” (NLWR), conceito esse aprimorado por Silva et al. (1994) como Last Limiting Water Range (LLWR) e empregado por Tormena et al. (1998) como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

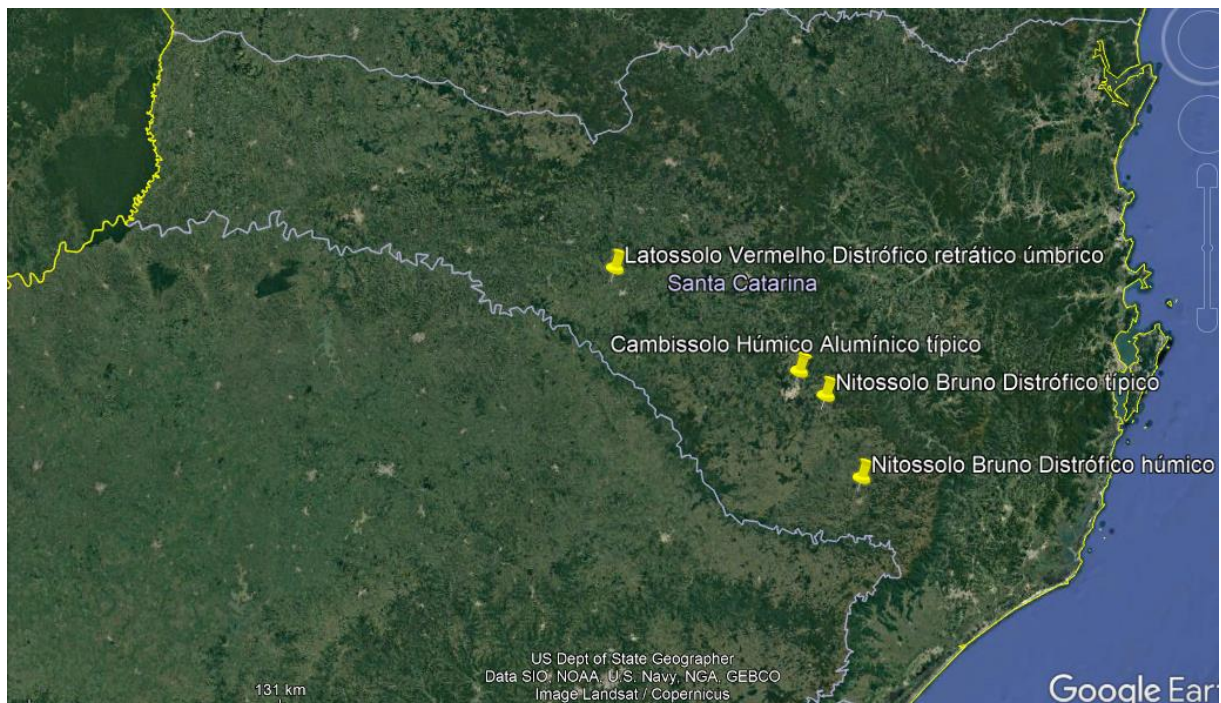
A umidade que representa o IHO é delimitada no limite superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo ou a umidade do solo na qual a porosidade de aeração atinge 10%. O limite inferior equivale a umidade na qual, para cada densidade, a resistência a penetração atinge o valor crítico de 2 MPa, ou a umidade no ponto de murcha permanente. Há um ponto em que os limites superior e inferior tangem, este, por sua vez, é o ponto denominado densidade crítica, onde teoricamente as plantas são severamente afetadas. Na densidade crítica, portanto, diz-se que a modificação dos atributos fez com que o solo perdesse sua qualidade totalmente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SOLOS

O estudo foi realizado utilizando quatro solos, representando classes de textura argilosa e muito argilosa, coletados no estado de Santa Catarina (Figura 1), e que possuem atributos físicos e químicos distintos entre si. Na tabela 1 é informada a classe, a localização e a altitude dos solos, e na tabela 2, as características químicas e físicas dos mesmos.

Figura 1 - Mapa de localização dos quatro solos amostrados para realização do trabalho.



Fonte: Retirada do Google Earth®, 2018. Adaptado pelo autor, 2019.

Tabela 1 - Classe, localização, coordenadas e altitude dos quatro solos amostrados para realização do trabalho.

Classe	Localização	Coordenadas	Altitude (m)
Cambissolo Húmico Alumínico típico (CHLG)	Lages	27°47'02"S 50°18'22"O	915
Latossolo Vermelho Distrófico retrático (LVCN)	Campos Novos	27°21'27"S 51°17'16"O	885
Nitossolo Bruno Distrófico típico (NBPA)	Paineira	27°53'15S 50°09'40" O	1080
Nitossolo Bruno Distrófico húmico (NBSJ)	São Joaquim	28°15'12"S 49°57'04"O	1260

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Tabela 2 - Caracterização física e química, na camada de 0 a 0,2 m, dos solos coletados.

Solo	Argila	Silte	Areia	MO	pH H ₂ O	SMP	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC _{ef}	CTC _{pH7}
	g kg ⁻¹			cmol _c /dm ³								
CHLG	510	170	320	40	5,1	4,5	2,6	1,9	4,1	24,4	9,0	29,3
LVCN	620	90	290	34	4,9	4,9	0,6	0,9	2,3	15,4	3,9	17,0
NBPA	720	80	200	53	4,6	4,6	1,1	0,9	2,9	21,8	5,1	23,9
NBSJ	570	210	220	50	4,6	4,3	1,0	0,7	4,2	30,7	6,0	32,6

Nota: CHLG - Cambissolo Húmico aluminico típico; LVCN – Latossolo Vermelho distrófico retrático; NBPA - Nitossolo Bruno Distrófico típico e NBSJ - Nitossolo Bruno distrófico húmico.

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

3.2 COLETA DOS SOLOS

Em cada um dos perfis, foram coletadas amostras (aproximadamente 100 kg) com estrutura alterada na camada arável (0-20 cm), com auxílio de pá de corte, acondicionadas em tambores plásticos de 50 litros e transportadas ao laboratório de Física e Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV), em Lages-SC. Ao atingir a friabilidade foi peneirado em malha de 4,75 mm.

3.3 DETERMINAÇÕES DE LABORATÓRIO

3.3.1 Ensaio de Proctor Normal

A densidade do solo máxima (Dsm) e a umidade ótima de compactação (Ugo) foram obtidas pelo teste de Proctor normal, regido e padronizado no Brasil pela ABNT através da NBR 7.182/86 (ABNT, 1986). Para realizar este teste, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas com peneira de malha 4,76 mm. Durante o peneiramento, buscou-se eliminar o material orgânico não decomposto (raízes e restos de parte aérea). Cerca de 20 kg de solo de cada local com umidade inicial determinada foram divididos em dez sacos plásticos. Destes, um saco de cada solo foi separado e teve o solo umedecido até atingir a friabilidade e determinou-se o teor de água adicionado. Para as demais amostras, adicionou-se água misturando bem para uniformizar, com adicionais de 0,02 kg kg⁻¹ entre elas (partindo da umidade do solo friável). Para determinar o teor de água a ser adicionado, utilizou-se a equação 1.

$$Va = \frac{Msu}{1+Ugi} x (Ugd - Ugi) \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo, Va: volume de água a ser adicionado (mL); Msu: massa de solo úmido (g); Ugi: umidade gravimétrica inicial (g g^{-1}) e Ugd: umidade gravimétrica desejada (g g^{-1}).

Um aparelho da marca Soiltest, modelo CN 4230 foi utilizado para a realização do ensaio de Proctor Normal. Cada amostra, com diferentes umidades, foi compactada em um anel metálico com 1.000 cm^3 de volume, em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete metálico de 2,5 kg, caindo de uma altura de aproximadamente 30 cm, conforme descrito na norma ABNT, gerando uma energia de $5,625 \text{ kgf.cm}^{-2}$. A energia aplicada é calculada através da equação 2.

$$E = \frac{p*L*n*N}{V} \quad (\text{Eq. 2})$$

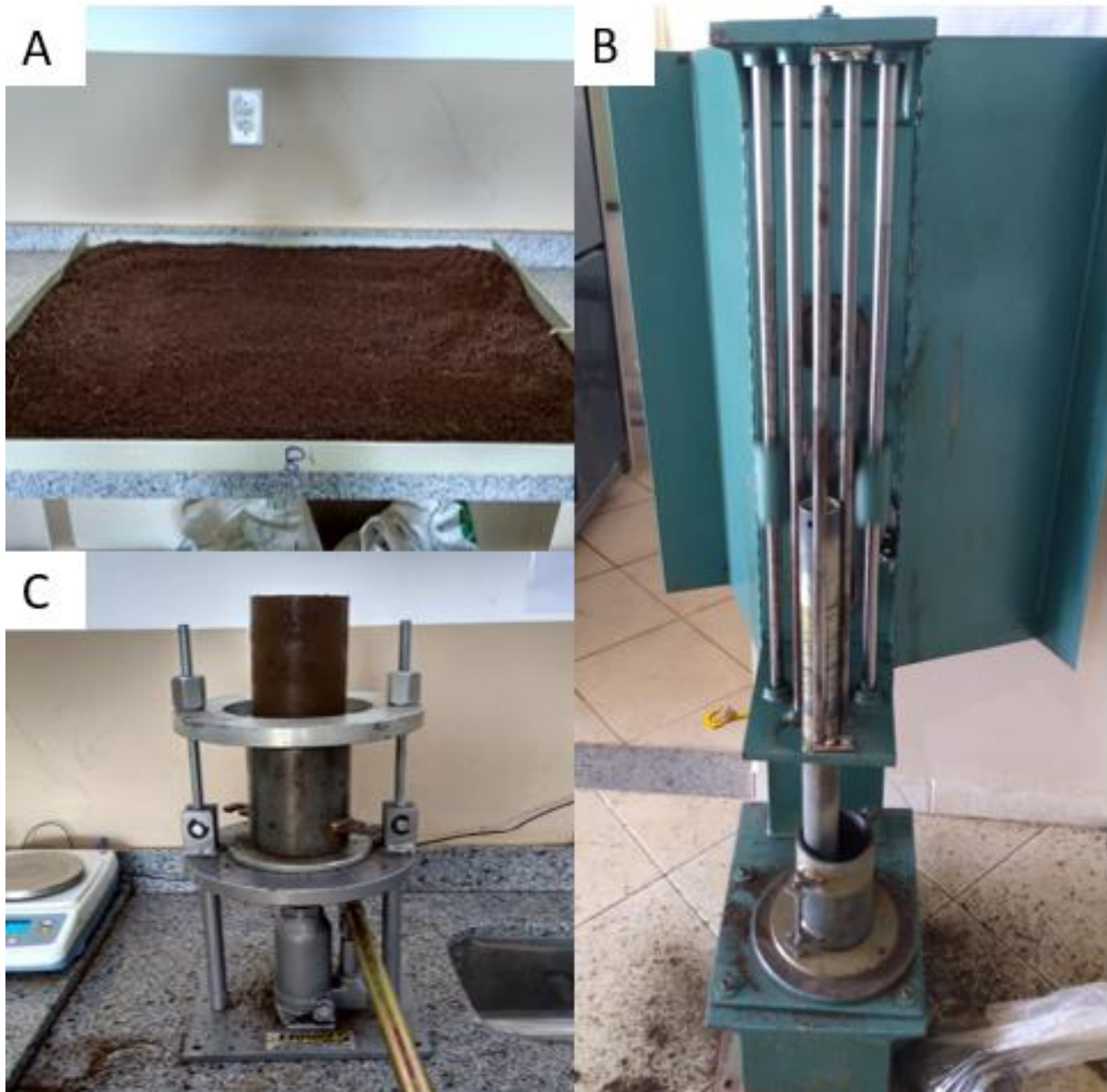
Sendo, E: energia aplicada (kgf cm^{-2}); p: peso do soquete (kg); L: altura de queda do soquete (cm); n: número de camadas; N: número de golpes aplicado por camada e V: volume do cilindro (cm^3).

O ensaio com as dez amostras de cada solo, em duas repetições, sem reuso, totalizou 80 determinações. Após cada ensaio, a amostra de solo foi retirada do cilindro, medida a massa e posteriormente retirado três subamostras (topo, meio e fundo) para determinação da umidade gravimétrica (Figura 2). Com estes dados foi calculada a massa de solo seco (equação 3).

$$Mss = \frac{Msu}{1+Ug} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo, Msu: massa de solo úmido (g); Mss: massa de solo seco (g) e Ug: umidade gravimétrica (g g^{-1}).

Figura 2 - Execução do teste de Proctor Normal. A) Solo seco ao ar, destorroado e peneirado; B) Aparelho Soiltest CN4230 e; C) Amostra extraída do cilindro com auxílio de um extrator de amostra tipo macaco hidráulico.



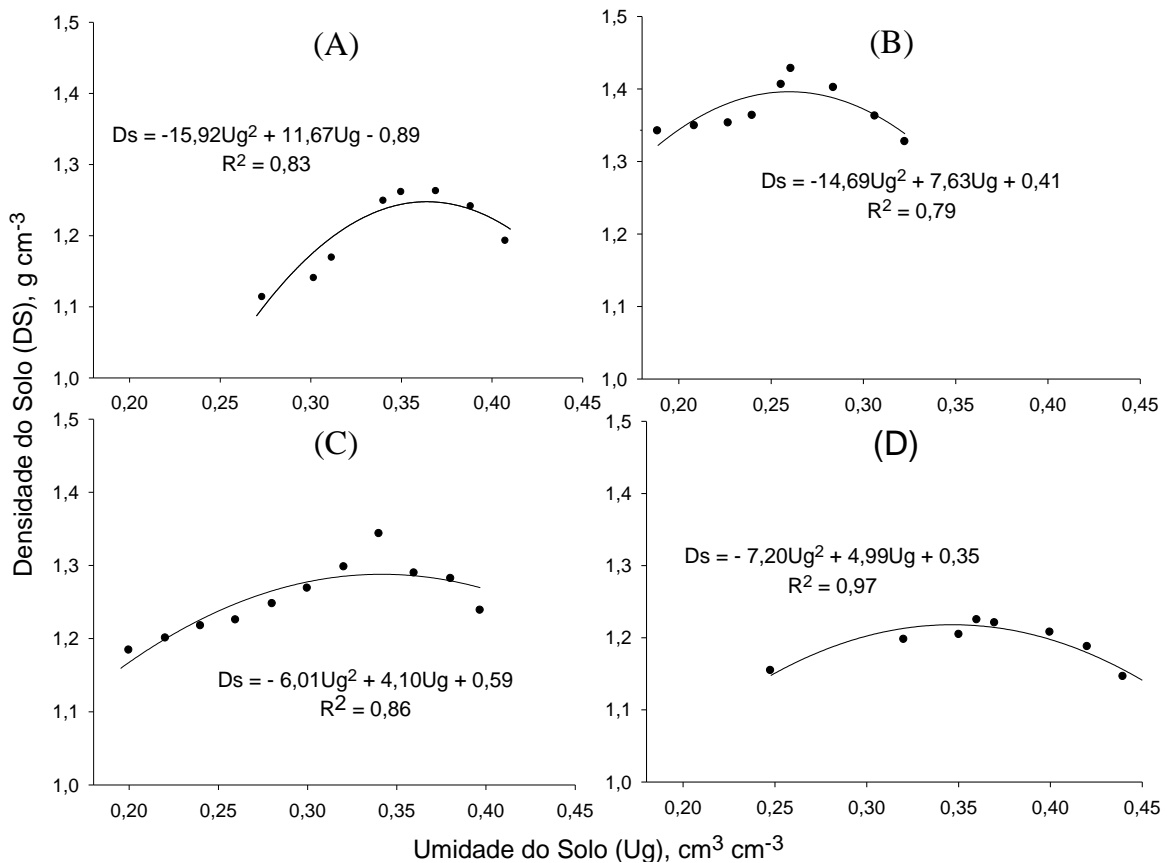
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A curva de compactação do solo, com resultados da D_s para cada U_g , foi ajustada através de uma equação polinomial de segundo grau (Figura 3). A partir da equação $y = ax^2 + bx + c$, foi calculada a U_{go} e a D_{sm} utilizando as equações 4 e 5, respectivamente.

$$U_{go} = \frac{-b}{2.a} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$D_{sm} = \frac{-(b^2 - 4.a.c)}{4.a} \quad (\text{Eq. 5})$$

Figura 3 - Curva de compactação do solo para Latossolo Vermelho distrófico retrático (LVCN) (A), Cambissolo Húmico aluminico típico (CHLG) (B), Nitossolo Bruno distrófico típico (NBPA) (C) e Nitossolo Bruno distrófico húmico (NBSJ) (D).



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

3.3.2 Montagem dos anéis volumétricos em laboratório

Para determinar os atributos físicos do solo, foram confeccionadas amostras em anéis volumétricos metálicos através de uma quantidade de solo com estrutura alterada. As amostras estiveram de acordo com os GC pré-estabelecidos, partindo de que a densidade máxima do solo (D_{sm}) equivale a 100%. Portanto, uma quantidade conhecida de solo com umidade conhecida e corrigida foi inserida dentro de um anel volumétrico de volume também conhecido, de modo a atingir 80, 85, 90, 95 e 100% da D_{sm} , para cada um dos quatro solos.

Os anéis volumétricos de aço inoxidável têm dimensões de 0,05 m de altura, 0,06 m de diâmetro e volume de $141,40 \text{ cm}^3$. O solo que já estava peneirado e seco ao ar, com umidade conhecida, foi separado em porções que correspondessem às diferentes densidades. O cálculo da densidade é feito sempre em relação à base seca, ou seja, descontando a massa de água contida do solo. Na montagem, foi utilizada uma prensa hidráulica. Na parte inferior do anel volumétrico, um conjunto borracha elástica + tecido permeável foi acoplada para impedir a

perda de solo. O solo foi colocado no anel e comprimido gradativamente na prensa, até que o volume de solo correspondesse exatamente ao volume do anel (Figura 4).

Figura 4 - Anéis volumétricos artificialmente compactados com solo de estrutura alterada, representando densidades que correspondem aos tratamentos de diferentes GC.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

3.3.3 Densidade, porosidade e curva de retenção de água

As amostras de solo montadas no laboratório foram saturadas em bandeja com água por um período de 48 horas, por meio da capilaridade, com elevação gradual de água até atingir cerca de dois terços da altura do anel volumétrico. Após este processo, a massa dos conjuntos anel + material de proteção + solo saturado foram pesados em balança de precisão de duas casas e levadas à mesa de tensão submetendo às tensões de 1, 6 e 10 kPa (GUBIANI, 2009), e posteriormente às câmaras de Richards, sob tensões de 33, 100, 300, 500, 1000 e 1500 kPa (LIBARDI, 2005) por determinado tempo até cessar a drenagem. Nas transições de cada tensão, a massa das amostras era determinada para calcular a retenção de água. Após a última tensão (1500 kPa), o conjunto foi levado à estufa de circulação de ar com temperatura constante de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para determinação da massa de solo seco.

A porosidade total (PT) foi calculada pela diferença entre a massa de solo saturado (m_{Saturado}) e a massa de solo seco (m_{SS}) em estufa num volume conhecido, demonstrado na equação 6, o volume de microporos determinado por meio da massa da amostra submetida a tensão de 6 kPa (m_{S60}) em mesa de tensão de areia, conforme equação 7 (EMBRAPA, 1997) e o volume de macroporos obtido pela diferença entre a PT e microporosidade (Equação 8). A quantificação da porosidade foi útil para também para a determinação da porosidade de aeração,

usada como limite superior do intervalo hídrico ótimo de cada solo. Apesar das amostras terem sido montadas com densidade correspondente aos GC, a D_s foi computada novamente pelo método do anel volumétrico, através da relação massa/volume (Equação 9), em base seca (105° C) (BLAKE & HARTGE, 1986).

$$PT = \frac{(m_{\text{Saturado}} - m_{SS})}{V} \quad (\text{eq. 6})$$

$$Micro = \frac{(m_{S60} - m_{SS})}{V} \quad (\text{eq. 7})$$

$$Macro = PT - Micro \quad (\text{eq. 8})$$

$$D_s = \frac{m_{SS}}{V} \quad (\text{eq. 9})$$

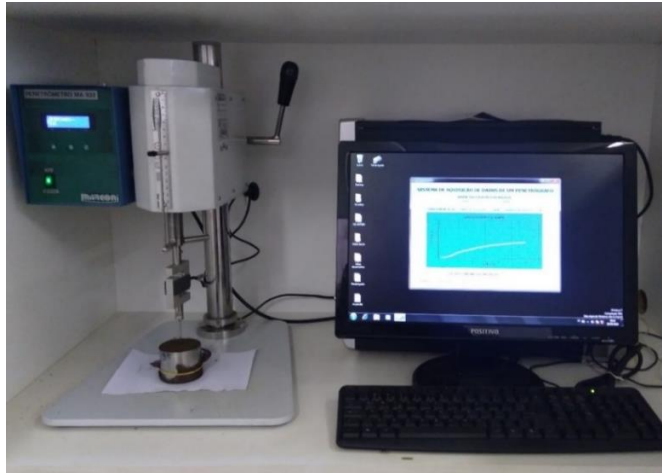
A Capacidade de Campo (CC) e o Ponto de Murcha Permanente (PMP) foram calculados como sendo o volume de poros drenados na tensão de 10 kPa e na tensão de 1500 kPa, respectivamente, considerados também como limite superior e inferior na determinação do intervalo hídrico ótimo de cada solo.

Ao término da pesagem dos anéis volumétricos, em cada tensão estabelecida, a curva de retenção de água no solo (CRA) foi elaborada ajustando a equação de Van Genuchten (LIBARDI, 2005) aos resultados com uso do software SWRC (Soil Water Retention Curve Beta 3.0) (DOURADO NETO et al., 2000).

3.3.4 Resistência a Penetração do Solo

Durante a obtenção da curva de retenção de água, nas tensões de 10, 100, 300, 500 e 1500 kPa, três amostras correspondentes a cada um dos cinco GC dos quatro solos, foram utilizadas para medição da resistência à penetração (RP) num aparelho de bancada marca Marconi, modelo MA 933 (Figura 5), equipado com cone de 3,0 mm de diâmetro, o qual foi introduzido nas amostras até uma profundidade de 5,0 cm, mantendo velocidade de medição constante em 30 mm min⁻¹ e leituras a cada 1s. Por conta do efeito da borda do anel foi calculada a RP média para a camada de 1 a 4 cm, descartando as leituras entre 0 e 1 cm e 4 e 5 cm. Obtidos os dados de RP para cada umidade gravimétrica do solo e diferentes densidades, que correspondem aos cinco graus de compactação, foi determinado o limite inferior do intervalo hídrico ótimo de cada solo.

Figura 5 - Realização de teste de RP em penetrômetro de bancada Marconi (MA 933).



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

3.3.5 Condutividade Hidráulica Saturada

Amostras de solo adicionais às utilizadas para análise da curva de retenção de água e resistência a penetração foram confeccionadas para determinar a condutividade hidráulica, em três repetições para cada GC e cada solo, totalizando sessenta amostras. Inicialmente, estas amostras foram saturadas por capilaridade através de elevação gradual da lâmina de água, e após isso, foi feita a determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s) em permeâmetro de carga variável (Figura 6), utilizando-se a metodologia descrita em Gubiani et al. (2008).

Figura 6 - Realização do teste K_s em permeâmetro de carga variável.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

3.4 EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO

O experimento com plantas foi conduzido em casa de vegetação no Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC), na cidade de Lages - SC, durante 4 meses, de 17 de maio à 17 de setembro de 2018.

Amostras foram separadas para analisar os seguintes atributos químicos dos solos: pH em H₂O e SMP, alumínio trocável, acidez potencial [H+Al], N, P, K, Ca e Mg. Com estes dados foi calculada a capacidade de troca de cátions (CTC), a saturação por bases (V%) e as relações entre cátions, conforme as metodologias descritas por EMBRAPA (1999) e Raij et al. (2001). Trinta dias antes da montagem do experimento, o pH do solo foi corrigido para 6,0 com calcário dolomítico (CaO: 29%, MgO: 19% e PRNT: 100%) e acondicionado até data próxima a montagem dos vasos, quando então recebeu a adubação conforme recomendação do Manual de Calagem e Adubação para os estados do RS e SC (CQFS – RS/SC, 2016) para a aveia-preta.

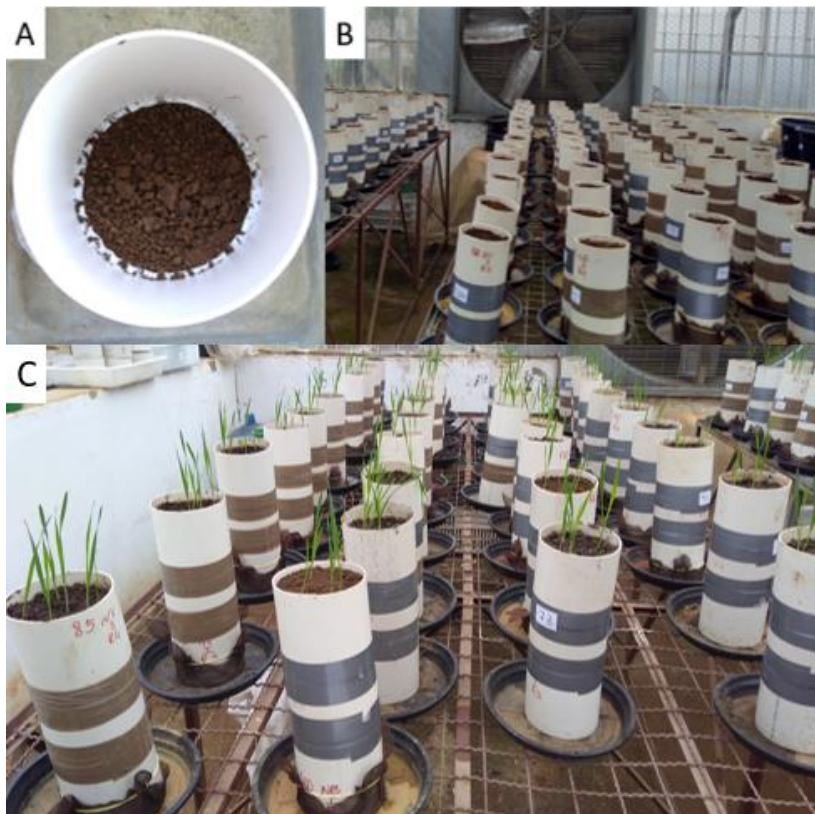
3.4.1 Montagem dos vasos

Os vasos consistiram em três tubos de PVC DN100 sobrepostos e preenchidos com solo. O tubo inferior possuía altura de 100 mm, o central 70 mm e o superior 100 mm, sendo que o solo no tubo superior ocupou 80 mm de altura, possibilitando a rega nos vasos. Os tubos superior e inferior receberam massa de solo correspondente a 80% da Dsm. Os diferentes tratamentos foram aplicados no anel central dos vasos, com massa de solo correspondente a 80, 85, 90, 95 e 100% da Dsm. Cada tratamento foi repetido cinco vezes, totalizando 25 vasos por solo, e 100 vasos para os quatro solos. A base do vaso foi protegida com um tecido permeável preso com borracha elástica ao vaso somado a um prato plástico, para evitar perda de solo. Na borda superior dos anéis central e inferior, uma fita adesiva foi aplicada para impedir o crescimento preferencial das raízes por onde havia menor restrição, ou seja, pela borda interna do vaso, obrigando as mesmas a penetrar na camada de solo que recebeu o tratamento. O vaso foi montado unindo as três partes com fita adesiva “Silver Tape”. A formatação dos vasos foi assim elaborada para simular uma condição existente a campo: a compactação subsuperficial, numa profundidade de 5-10 cm abaixo da superfície do solo.

3.4.2 Implantação da cultura

A aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) foi semeada em 17 de maio de 2018, na densidade de 80 kg ha⁻¹ (FONTANELI et al., 2012), com profundidade de semeadura de 5 mm. Assim que as plantas alcançaram aproximadamente 10 cm de altura, realizou-se o raleio, mantendo 4 plantas/vaso (Figura 7). Ao atingirem altura entre 20 – 25 cm, iniciou-se o manejo da cultura, com um corte inicial a 10 cm da superfície do solo.

Figura 7 - A) Demonstração da fita na junção dos anéis impedindo o crescimento periférico das raízes; B) Vasos montados com cultura semeada; e C) Plantas emergindo nos vasos.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

3.4.3 Evapotranspiração e atributos produtivos da aveia preta

Durante todo o período de condução do experimento a evapotranspiração foi quantificada através do controle da umidade do solo mediante pesagens em balança de precisão e reposição da água até umidade correspondente a 85% da CC a cada tríduo. A umidade foi calculada de acordo com a densidade e a classe de solo, pois a retenção de água varia com estes fatores.

Durante a condução do experimento, foram feitos cortes das plantas, simulando o pastejo. Estes ocorreram assim que as plantas atingiam altura entre 20 e 25 cm, sendo estas seccionadas a uma altura de 10 cm da superfície do solo. O material coletado de cada repetição foi acondicionado em sacos de papel e levados imediatamente ao laboratório de física e manejo do solo, da mesma instituição de ensino, onde foram pesados em balança de precisão de 4 casas para obtenção da massa verde de parte aérea (MVPA). Após, o material foi colocado em estufa de circulação de ar a 65°C até atingir massa constante e novamente pesado para determinar a massa seca de parte aérea (MSPA). Todo o material coletado nos cortes durante o período de avaliação do experimento foi acondicionado em potes plásticos com tampa para posterior análise bromatológica.

Simultaneamente aos cortes, a altura individual das plantas era medida com uma régua, da base do solo até a última folha. A altura dividida pelo número de dias decorrido do último corte resulta na taxa de crescimento diária das plantas (Equação 10).

$$TC(\text{cm. dia}^{-1}) = \frac{(APx - 10\text{cm})}{n} \quad (\text{eq. 10})$$

Sendo, TC: taxa de crescimento; APx: comprimento removido da planta no corte; e n: número de dias decorridos desde o último corte.

Após decorrido o tempo de avaliação do experimento, as colunas de PVC foram levadas até o laboratório de física e manejo do solo. Os anéis de cada vaso foram separados e ficaram em repouso ao ar livre por 4 dias para equilibrar a umidade. Após este período foi determinada a massa do conjunto central (anel PVC + solo), a resistência a penetração (RP) (três repetições por amostra) e a umidade gravimétrica. Este procedimento foi realizado para quatro das cinco repetições de cada tratamento, escolhidas aleatoriamente. A densidade do solo no anel central dos vasos, ao fim do experimento, foi determinada para comparar com a densidade inicial, antes da implantação da cultura.

3.4.4 Avaliação de raízes

Logo após a separação das unidades formadoras do vaso e das avaliações citadas anteriormente, foi realizada a separação das raízes para os três anéis de PVC formadores de cada vaso, com o intuito de verificar o efeito dos diferentes GC na distribuição das raízes em profundidade. A separação das raízes foi feita através da lavagem do solo com auxílio de jatos d'água e uma peneira de malha 2mm. As raízes permaneciam retidas, enquanto o solo era

lavado para um recipiente contido abaixo da peneira. O material radicular coletado foi separado, lavado novamente para retirada do excesso de partículas de solo e colocado em sacos de papel, secos em estufa de circulação de ar a 65°C até atingir massa constante, a qual foi determinada em balança de precisão de 4 casas. Esta determinação foi realizada com três das cinco repetições, escolhidas aleatoriamente.

3.5 ANÁLISES BROMATOLÓGICAS

As análises de Fibra em Detergente Neutro (FDN) e Fibra em Detergente Ácido (FDA) foram realizadas no Laboratório de Análises Bromatológicas da UDESC/CAV, no período de 19 a 23 de novembro de 2018. Para estas determinações, as amostras foram secas e homogeneizadas em suas respectivas frações por solos e tratamentos, formando uma amostra composta. A quantificação das fibras seguiu metodologia proposta por Van Soest (1994).

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados obtidos foram submetidos à teste de homogeneidade de variância e normalidade, e a análise de variância foi executada no programa estatístico SAS (2007). A verificação da significância das diferenças entre as médias dos tratamentos foi aplicada aos atributos físicos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Às características relacionadas as plantas, aplicou-se análises de regressão em função dos graus de compactação pelo programa SigmaPlot 11.0 testando modelos quadráticos com níveis de significância de 1, 5 e 10%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Ao analisar as amostras com diferentes GC, observou-se que com o aumento da densidade do solo reduziu a porosidade total, especialmente os macroporos (Tabelas 4, 5, 6 e 7) e aumentou a retenção de água na tensão de 1500 kPa (Figura 8). Este resultado é atribuído a formação de poros muito pequenos pela aproximação das partículas, com maior energia de retenção de água, corroborando o que foi relatado por Magalhães et al. (2009) em estudo da recuperação estrutural de um Argissolo Vermelho argiloso com diferentes densidades cultivado com Capim-Tifton 85. Essas alterações na estrutura diminuem a declividade das curvas, nos tratamentos com grau de compactação (GC) elevados e, assim, reduz a quantidade de água disponível às plantas (AD), que é a diferença entre a umidade na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP).

A principal modificação na retenção de água é observada entre as tensões de 0 a 10 kPa em todos os solos, que corresponde a poros de drenagem da água. A maior perda de água ocorreu para os solos onde o GC é menor (Figura 8). Após 10 kPa, as curvas dos diferentes tratamentos mantiveram um certo paralelismo entre as mesmas, podendo ser explicado pela maior atuação dos microporos sobre a água nesta região da curva e, como observado nas tabelas 4, 5, 6 e 7, este atributo sofre pequena modificação com o aumento da Ds.

Os extremos quanto à quantidade de água disponível no Latossolo (LVCN) foram observados nos tratamentos GC90 e GC100, com 0,141 e 0,113 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ respectivamente. Os tratamentos GC80 e GC85 possuem, em número, menor quantidade de AD que o GC90 pois, possuem menor teor retido na capacidade de campo (Tabela 3). O decaimento no início desta curva é mais proeminente (Figura 8A), ocasionado pela superioridade de macroporos comparativamente aos demais tratamentos, fazendo com que o solo perca maior quantidade de água mesmo numa baixa tensão aplicada, porém não diferem estatisticamente. Nos GC mais elevados, a curva de retenção de água é mais linear, demonstrando maior energia de retenção nas tensões mais elevadas, em parte, pela formação de poros de tamanho diminuto, com isso, o teor de AD diminui.

No Cambissolo Húmico, maior teor de água disponível foi no GC95 (0,153 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), o qual não diferiu do GC85, 90 e 100, mas foi superior ao GC80 (0,137 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Isto ocorreu porque o teor de água retida na CC é menor que no solo com maior densidade. A maior quantidade de areia deste solo reduziu a capacidade de retenção, principalmente em baixas

densidades. A areia apresenta baixa capacidade de reter a água, por ter baixa área específica e cargas, comparada com a fração silte e argila, além da menor quantidade de microporos formados nestes solos.

Tabela 3 - Teor de água disponível às plantas para quatro solos do estado de Santa Catarina compactados artificialmente.

GC %	LVCN			CHLG			NBPA			NBSJ		
	CC	PMP	AD	CC	PMP	AD	CC	PMP	AD	CC	PMP	AD
	cm ³ cm ⁻³											
80	0,427	0,290	0,137a ¹	0,384	0,247	0,137b	0,423	0,295	0,128ab	0,404	0,302	0,102ab
85	0,451	0,323	0,128ab	0,415	0,265	0,150ab	0,435	0,308	0,127b	0,455	0,332	0,123a
90	0,464	0,323	0,141a	0,442	0,294	0,148ab	0,464	0,329	0,135ab	0,466	0,376	0,090b
95	0,476	0,347	0,129a	0,457	0,304	0,153a	0,486	0,343	0,143a	0,474	0,381	0,093b
100	0,487	0,374	0,113b	0,461	0,321	0,140ab	0,495	0,361	0,134ab	0,477	0,386	0,091b

Nota: ¹ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste Tukey a 5%. (GC) grau de compactação; (LVCN) Latossolo Vermelho distrófico retrático; (CHLG) Cambissolo Húmico aluminico típico; (NBPA) Nitossolo Bruno distrófico típico; (NBSJ) Nitossolo Bruno distrófico húmico; (CC) capacidade de campo; (PMP) ponto de murcha permanente; e (AD) água disponível no solo.

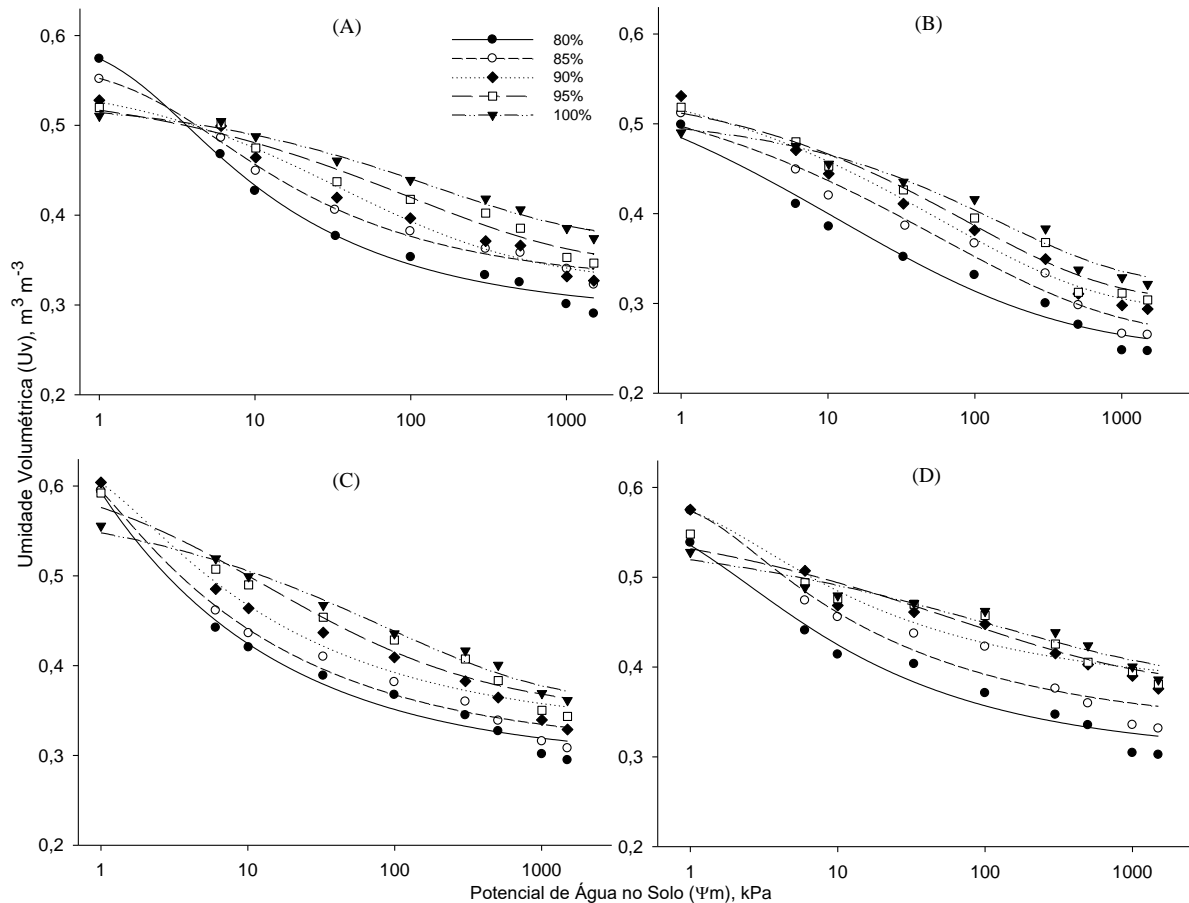
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A densidade que promove a maior disponibilidade de água no NBPA corresponde ao GC95 (0,143 cm³ cm⁻³), que diferiu do GC85 (0,127 cm³ cm⁻³). Nos tratamentos com menor Ds a redução na retenção de água na CC foi maior que a redução no PMP.

O NBSJ teve maior teor de AD no GC85 e no GC80. A diferença para os demais GC é explicada pelo fato do solo com maior densidade reter água com mais energia, principalmente no PMP. Este solo teve menos água disponível do que os demais solos. Esta afirmação representa maior energia de retenção da água para o NBSJ, fator diretamente relacionado com o alto teor de MO e maior quantidade de silte, comparado aos outros solos. Essa distribuição das partículas gera um empacotamento que reduz tanto a macro quanto a microporosidade com conseqüente menor disponibilidade de água.

As curvas estimadas pelo modelo Van Genuchten mostram que o aumento da densidade e conseqüente redução da porosidade total e macroporosidade (Tabelas 4, 5, 6 e 7) modificam a retenção de água. Há redução da umidade volumétrica (U_v) na saturação e elevação na CC e no PMP, o que pode ser um problema em áreas cultivadas onde não há disponibilidade de sistema de irrigação. A mudança na quantidade de água retida próximo à saturação não necessariamente significa maior disponibilidade desta às plantas, como mencionado por Klein e Libardi (2002), pois esta água é facilmente drenável, enquanto o aumento no PMP diminui a AD (Tabela 3).

Figura 8 - Curvas de retenção de água para o Latossolo Vermelho distrófico retrático (LVCN) (A), Cambissolo Húmico aluminico típico (CHLG) (B), Nitossolo Bruno distrófico típico (NBPA) (C) e Nitossolo Bruno distrófico húmico (NBSJ) (D) para cada GC, determinado em nove tensões, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

4.2 LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO RETRÁTICO ÚMBRICO

O aumento do grau de compactação do solo de 80 para 100% elevou a resistência a penetração do solo a 10 kPa (RP), a microporosidade (micro), a massa verde (MVPA) e massa seca da parte aérea (MSPA), entretanto diminuiu a porosidade total (PT), a macroporosidade (macro), a porosidade de aeração (PA), a condutividade hidráulica do solo (Ks) e a taxa de crescimento das plantas (TC) (Tabela 4 e Figuras 9 e 10). A RP do solo aumentou de 1,7 a 9,7 MPa, respectivamente para GC de 80 e 100% (Tabela 4). O limite crítico de 2 MPa vem sendo usado para caracterizar a qualidade física do solo (TORMENA et al., 1998b; SILVA et al., 2008; LIMA et al., 2012). A RP no GC80 (densidade de $1,00 \text{ g cm}^{-3}$) esteve abaixo deste índice crítico, e foi inferior aos demais tratamentos, valor semelhante ao encontrado neste tratamento (GC80) foi observado por Silva et al (2014) num GC de 83% e por Suzuki et al. (2007) em GC

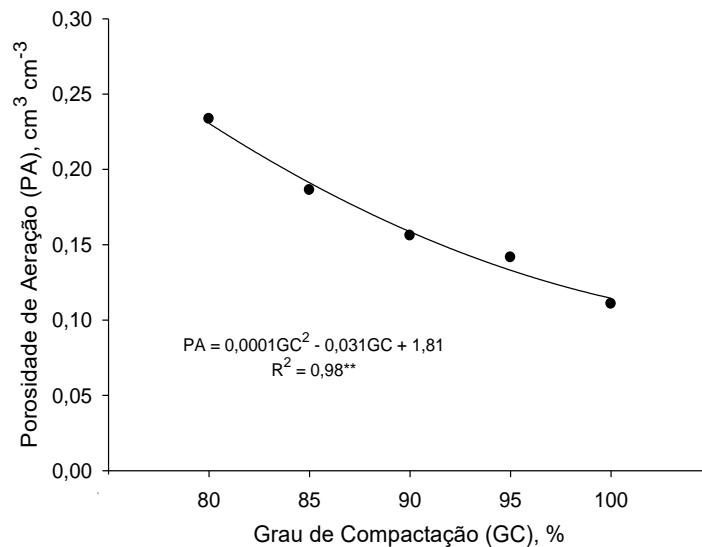
de 84%, ambos estudos com Latossolo. Também se aceita acréscimo neste limite em áreas com SSD consolidada, até 3,5 MPa (TORMENA et al., 2007; BETIOLI JÚNIOR et al., 2012), limite que somente será ultrapassado no GC90.

No GC mais alto, este solo teve resultado semelhante ao NBPA, cujo textura é similar. Ambos tiveram RP maior que nos demais solos, que por sua vez possuem menor teor de argila. Fica, portanto, explícita a importância da textura do solo na resistência à penetração de raízes nas camadas compactadas. As partículas mais finas se aproximam mais, e diminuem os canais responsáveis pelo crescimento das raízes, o que exige maior energia para romper a camada compactada por parte das raízes.

A macroporosidade do solo reduziu de 0,13 para 0,02 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tabela 4) com o aumento do GC de 80 para 100%. Ao considerar um limite de macroporos de 0,10 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (VOMOCIL & FLOCKER, 1966; BELTRAME et al., 1981; XU et al., 1992), o GC 80%, somente, demonstrou estar dentro desse limite de qualidade do solo para o bom crescimento e desenvolvimento das plantas, e dentro de um padrão para solos argilosos, podendo admitir que mesmo em densidades baixas, a aeração do solo pode estar comprometida. Suzuki et al. (2007), obtendo a densidade de referência do solo pelo teste de compressão uniaxial, obteve um GC acima de 76% como restritivo, num Latossolo Vermelho com 650 g kg^{-1} de argila, e Silva et al. (2014), em Latossolo Bruno (570 g kg^{-1} de argila), encontrou grau de compactação acima de 84% como restritivo. A macroporosidade é tida como o espaço onde ocorre o crescimento das raízes, o habitat da maioria dos organismos do solo e o principal espaço por onde ocorre o fluxo de gases, daí a importância de ser superior a 0,10 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

A porosidade de aeração foi calculada como a diferença entre a porosidade total e a umidade mantida neste experimento (85% da CC). Com o aumento do GC a PA diminuiu de 0,224 a 0,108 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Figura 9), portanto próximo do limite crítico ao crescimento das raízes. Assim, neste solo somente no GC100 a aeração pode restringir o crescimento radicular. A campo, em períodos de maior disponibilidade hídrica a umidade supera 85% da CC, período em que ocorre restrição as culturas pela aeração deficiente.

Figura 9 - Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho distrófico retrático em diferentes graus de compactação.



Nota: *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo.
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Tabela 4 – Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico retrático para diferentes graus de compactação.

SOLO	GC %	Ds g cm ⁻³	RP MPa	Ks mm h ⁻¹	CC	CA	PT cm ³ cm ⁻³	Micro	Macro
LVCN	80	1,00	1,7 d ¹	175a	0,43	0,17	0,60 a	0,47 b	0,13 a
	85	1,07	3,2 c	87 b	0,45	0,12	0,57 ab	0,49 a	0,08 b
	90	1,13	3,9bc	45 c	0,46	0,09	0,55 b	0,50 a	0,05 c
	95	1,19	4,6 b	20 c	0,48	0,06	0,54 b	0,50 a	0,04 c
	100	1,26	9,7 a	10 c	0,49	0,04	0,53 c	0,51 a	0,02 d

Nota: ¹ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste Tukey a 5%. (Ds) Densidade do solo; (RP) Resistência a penetração; (Ks) Condutividade hidráulica do solo saturado; (CC) Capacidade de campo; (CA) Capacidade de aeração; (PT) Porosidade total; (Micro) Microporos; (Macro) Macroporos.
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A Ks variou sensivelmente em baixa densidade e foi diretamente relacionada com a macroporosidade, pois nestes poros a força gravitacional tem maior influência na movimentação da água em profundidade. Na tabela 4 está demonstrada a redução da Ks de 175 para 10 mm h⁻¹, do GC80 ao GC100. A água é um fluido de baixa viscosidade e segue a lei de Poiseville que afirma que a vazão varia diretamente com a quarta potência do raio do poro. Assim, uma pequena redução nos poros grandes reduz grandemente a condutividade. Em densidades mais elevadas, com macroporosidade já comprometida, diferenças não foram significativas. Silva et al. (2009) analisaram dois Latossolos Vermelhos com estrutura alterada e com 612 e 609 g kg⁻¹ de argila e relataram Ks variando de 19 a 268 mm h⁻¹, respectivamente

nas densidades de 1,38 a 1,58 g cm⁻³. Afirmaram que a continuidade dos poros favorece o fluxo de água na amostra com menor densidade.

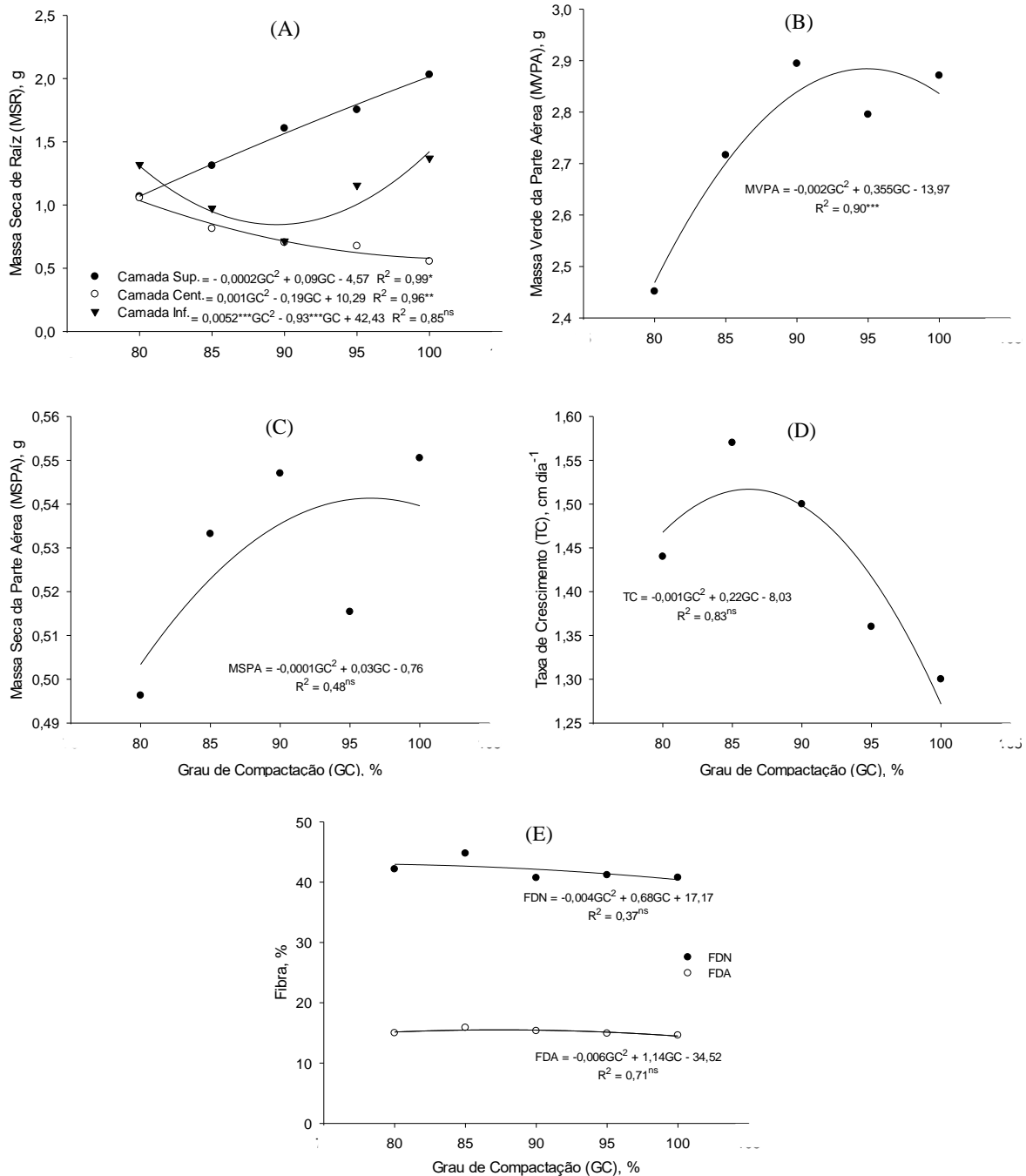
Sobre o desenvolvimento do sistema radicular da cultura, observa-se que nos GC mais elevados as raízes se concentram mais na camada superior do vaso, com menor massa de raízes na camada compactada (Figura 10A). Esta afirmação é verificada pela equação das curvas da primeira e segunda camada dos vasos, as quais demonstram que o aumento dos GC explicam 99 e 96% respectivamente, da variação da MSR. A aleatoriedade dos pontos de MSR na camada inferior do vaso não permitiu visualizar diferenças na distribuição das raízes .

Foi observado, ao final do experimento, que existiam algumas raízes na região entre o solo e o vaso (Anexo A), o que demonstra que procuraram locais de menor impedimento e retomam seu crescimento e desenvolvimento quando alcançaram a camada inferior, não compactada, solução encontrada pela planta para superar a dificuldade em romper o solo compactado e explorar maior volume de solo. Conforme Queiroz-Voltan et al. (2000), isto se dá pela dificuldade das raízes se desenvolverem na camada compactada, o que induz a compensação na camada menos compactada. Logo, verifica-se que o solo degradado restringe o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, quando em alta Ds.

Houve redução de MVPA e MSPA a partir do GC95 e GC96, respectivamente (Figuras 10 B e C), entretanto, somente a curva de MVPA foi significativa, não podendo afirmar que a MVPA diferiu. A TC das plantas foi crescente do GC80 ao GC85 e decaiu a partir deste o que representa que existe alguma restrição ao crescimento da aveia a partir deste ponto (Figura 10D), restrição que pode ser atribuída à RP, que ficou acima do limite de 2 MPa. Silva et al. (2006), analisando o efeito de diferentes GC no crescimento e desenvolvimento de *Brachiaria brizantha* e outras plantas “não gramíneas”, em um Latossolo Vermelho do cerrado, concluíram que gramíneas são mais tolerantes à compactação, com redução da MSPA quando a Ds supera 1,50 g cm⁻³, densidade superior a do tratamento com GC100 (1,26 g cm⁻³).

Com o aumento do GC a MVPA da aveia aumentou até GC90, mas a TC diminuiu a partir do GC85 (Figura 10), isto se deu pelo fato de as plantas terem compensado o menor crescimento em altura, com maior perfilhamento, conforme foi visualizado durante a condução do experimento.

Figura 10 – Massa seca de raízes (A), Massa verde da parte aérea (B), Massa seca da parte aérea (C), Taxa de crescimento das plantas (D) e teor de fibra (E), em diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho distrófico retrático.



Nota: *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo.
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os teores de FDN e FDA permaneceram constantes em todos os tratamentos (Figura 10E), não havendo, portanto, efeito da compactação dentro dos limites estudados do solo sobre estas características nutricionais da planta.

A composição bromatológica do alimento oferecido aos animais é de suma importância para seu valor nutricional e oferta de melhores condições para atingir altos índices zootécnicos e econômicos. O conteúdo de FDN é o fator mais associado ao consumo voluntário animal (SILVA, 2010) e de fundamental importância ser inferior a 60% para certificar a qualidade da forragem (VAN SOEST, 1994). A figura 10E demonstra que a FDN não demonstrou mudança em relação aos diferentes GC, e estão dentro do limite ideal citado acima, assemelhando-se aos publicados por Gomes e Stumpf (2001), que encontraram uma média de 45% de FDN, e de Cecato et al. (2001) que relataram 41% de FDN, ambos estudando doses de N sobre cultivares de aveia forrageira em um Latossolo Vermelho.

A análise da quantidade de FDA na aveia cultivada nos diferentes GC também não demonstrou variação entre os tratamentos, e encontram-se dentro do limite preconizado por Mertens (1994) que é de até 30% de FDA nas forragens. A digestibilidade da matéria seca é analisada a partir da concentração de FDA, pois se correlacionam negativa e linearmente com a mesma (VAN SOEST, 1994).

De modo geral, a modificação dos atributos físicos do LVCN, causadas pelo incremento dos graus de compactação, de 80 a 100%, não foram suficientes para prejudicar o aspecto produtivo e nutricional da aveia-preta, presumindo que limites físicos restritivos possam ser encontrados numa densidade acima da Dsm obtida pelo teste de Proctor.

4.3 CAMBISSOLO HÚMICO ALUMÍNICO TÍPICO

No Cambissolo Húmico o aumento do GC elevou RP e a microporosidade, mas reduziu a PT, macroporosidade, PA e Ks (Tabela 5 e Figura 11). A RP aumentou de 1,0 para 4,9 MPa do GC80 ao GC100, quando a umidade estava na CC. Com o GC95 a RP foi superior ao limite de 2 MPa (TORMENA et al., 1998b; SILVA et al., 2008; LIMA et al., 2012) e com GC100 superior a 3,5 MPa (TORMENA et al., 2007; BETIOLI JÚNIOR et al., 2012). A menor quantidade de argila e maior de areia que os demais solos, combinado com alto teor de matéria orgânica (Tabela 2), confere a este solo melhor comportamento para este atributo.

A macroporosidade reduziu de $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no GC80 para $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no GC100 (Tabela 5). O maior volume de macroporos observado no GC80, diferiu dos demais. Para este mesmo solo, Bertol et al. (2004) e Brown et al. (2018), relataram macroporosidade de $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ quando a densidade estava em $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ numa área sob SSD consolidado, similar ao obtido neste estudo, o que demonstra que a qualidade deste solo num sistema muito difundido sofre restrições em épocas chuvosas, quando a umidade atinge ou ultrapassa a CC, e aí permanece, ativando processos de anaerobiose da planta. Os macroporos são os principais

responsáveis pela infiltração de água e aeração. A aeração do solo quando menor que $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ é limitante ao desenvolvimento das plantas (BELTRAME et al., 1981; XU et al., 1992). Neste solo a porosidade de aeração variou entre 0,25 a $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente, para o GC80 e GC100 (Figura 11), não sendo, portanto, fator limitante à aveia.

Tabela 5 - Atributos físicos de um Cambissolo Húmico aluminico típico para diferentes graus de compactação.

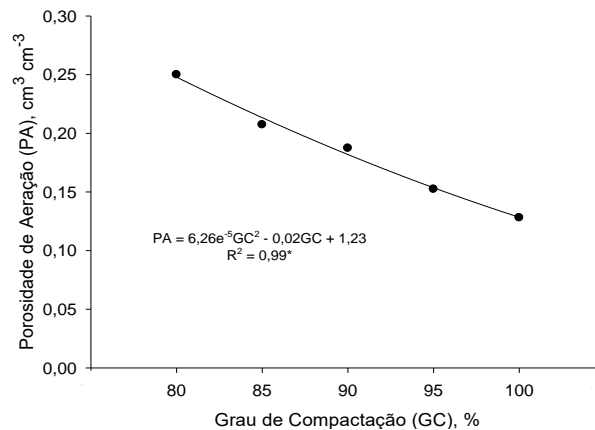
SOLO	GC %	Ds g cm^{-3}	RP MPa	Ks mm h^{-1}	cm ³ cm ⁻³				
					CC	CA	PT	Micro	Macro
CHLG	80	1,13	1,0 c ¹	124 a	0,39	0,19	0,58 a	0,41 c	0,16 a
	85	1,21	1,6 c	13 ab	0,42	0,14	0,56 a	0,45 b	0,11 b
	90	1,28	1,7 bc	2 b	0,43	0,13	0,56 a	0,47 ab	0,09 bc
	95	1,35	2,5 b	0,4 b	0,46	0,08	0,54 ab	0,49 a	0,06 cd
	100	1,42	4,9 a	0,1 b	0,46	0,06	0,52 b	0,48 a	0,04 d

Nota: ¹ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste Tukey a 5%. (Ds) Densidade do solo; (RP) Resistência a penetração; (Ks) Condutividade hidráulica do solo saturado; (CC) Capacidade de campo; (CA) Capacidade de aeração; (PT) Porosidade total; (Micro) Microporos; (Macro) Macroporos.

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A Ks diminuiu com a compactação, com redução a partir do GC90, a maior Ks, obtida no GC80 foi de 124 mm h^{-1} , e a menor no GC100 e igual a $0,1 \text{ mm h}^{-1}$. Em trabalho realizado com este Cambissolo Húmico, Bertol et al. (2000) justificam a redução da taxa de infiltração pela redução da macroporosidade e PT no SSD, corroborando com este estudo. Esta condutividade alta, que reduz drasticamente com a compactação ocorre em função do empacotamento das partículas, que bloqueiam a porosidade maior, e impede a passagem de água para a profundidade. Este fenômeno aumenta a suscetibilidade à erosão hídrica, e perda da camada superficial do solo, gerando além de prejuízos econômicos, um dano ambiental irreparável.

Figura 11 – Porosidade de aeração de um Cambissolo Húmico alumínico típico em diferentes graus de compactação.



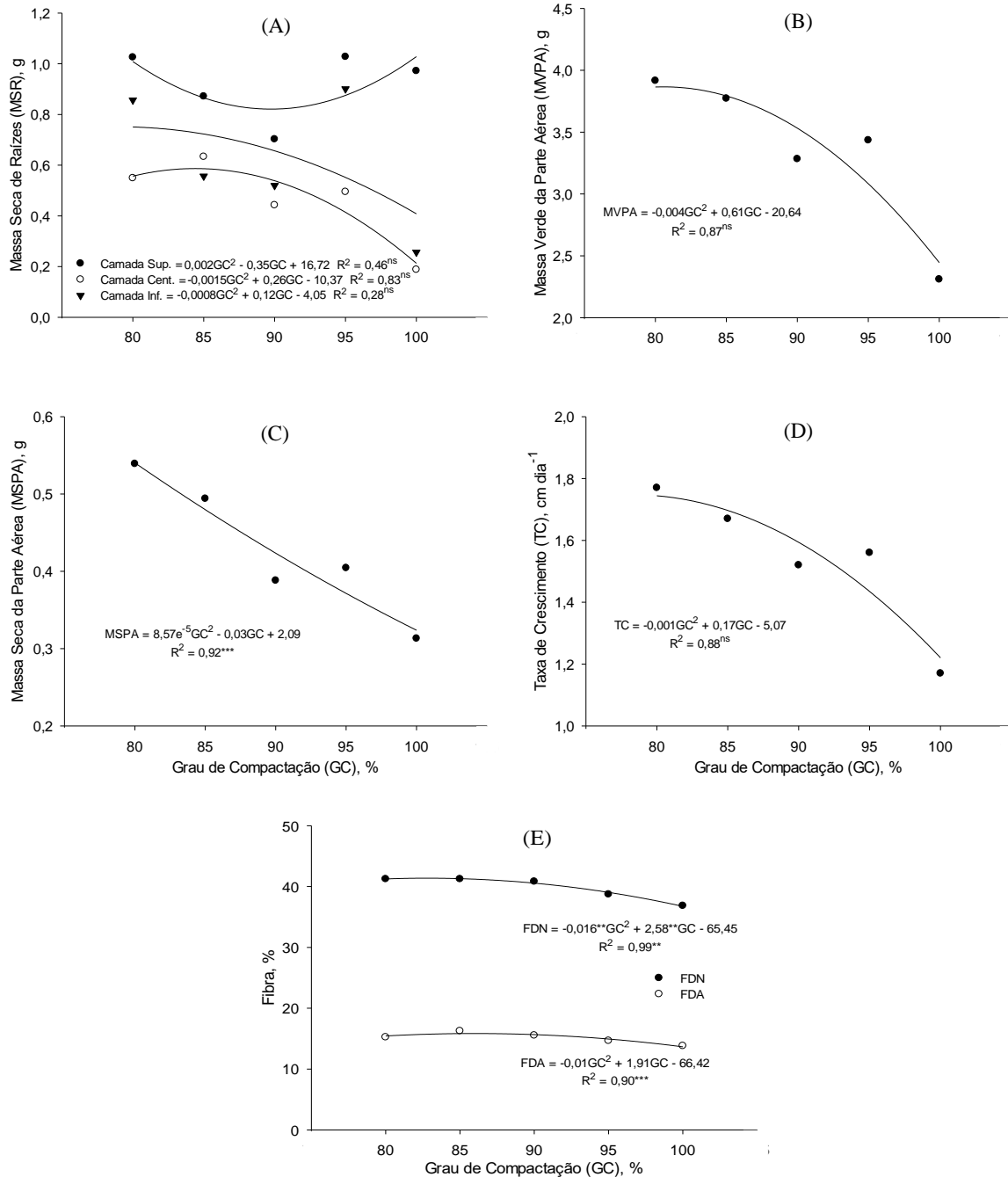
Nota: *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo.
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

No que se refere às raízes, a estatística não demonstrou acúmulo na camada superficial para os diferentes GC, nem redução significativa de MSR como resultado do aumento dos GC (Figura 12A). Sendo as raízes responsáveis pela absorção de água e nutrientes, menor crescimento destas causados pela degradação física do solo, pode indicar restrição a planta, e isto é discutível observando a não significância das curvas de MSR em relação aos GC na Figura 12A, e a significativa redução de MSPA (Figura 12C). Visualmente as plantas cultivadas sobre o solo com uma camada compactada apresentaram pouca diferença de produção, em massa, entretanto, isto pode ser um resultado da presença de camadas não compactadas no vaso, que permitiram o bom desenvolvimento das plantas num curto período, o fornecimento de água a cada pouco tempo também não exigiu que as raízes se aprofundassem buscando este recurso. A distribuição das raízes da aveia no perfil pode ser visualizado no anexo B.

A maior MVPA (3,86 g), MSPA (0,54 g) e TC ($1,75 \text{ cm dia}^{-1}$) foram observadas no GC80, (Figuras 12B, C e D), mas somente a curva de MSPA foi significativa, reduzindo conforme aumentou-se o GC do Cambissolo, o que demonstra um início de restrição neste momento, mesmo com a presença de camadas não compactadas no vaso.

Levando em conta que a produção de MSPA foi a média de 8 cortes realizados no período de avaliação, ao final, a produção no GC80 resultaria num total de $5,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, produtividade superior as encontradas por Jochims et al. (2017) num experimento conduzido na região oeste de Santa Catarina com diferentes genótipos de aveia branca e amarela forrageira, as quais variaram de $3,0$ a $5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$. Contudo, a planta apresenta potencial para superar a produtividade atingida neste experimento, se comparado com outros estudos que atingiram picos de produtividade de até 7 Mg ha^{-1} no Planalto Catarinense (ROSA et al., 2008).

Figura 12 – Massa seca de raízes (E), Massa verde da parte aérea (F), Massa seca da parte aérea (G), Taxa de crescimento das plantas (H) em diferentes graus de compactação de um Cambissolo Húmico aluminico típico.



Nota: *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo.

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Para o teor de fibra, tanto FDN quanto FDA da forrageira foi observado decréscimo com o aumento do GC (Figura 12E). Os teores de FDN e FDA deste estudo são menores que os encontrados por Marques et al. (2016) para a aveia-preta, que obtiveram média próxima de 45 e 26%. O teor de FDA observado por Mondardo et al. (2011) foi de 34%, acima dos observados

no presente trabalho, entretanto, todos estes teores estão dentro dos limites recomendados para FDN (VAN SOEST, 1994) e FDA (MERTENS, 1994), de até 60 e 30%, respectivamente.

A menor concentração de fibra pode ser atribuída à maior relação folha x colmo, já que as fibras concentram-se mais nas estruturas de sustentação. Como a planta produziu menor quantidade de massa seca nos tratamentos com maior densidade, produziu menor quantidade de fibras. Neste caso, não foi um fator positivo, pois foi um resultado consequente do menor desenvolvimento da aveia.

As MSPA foi decrescentes desde a menor Ds trabalhada (Figura 12C), mesmo não havendo a teórica limitação de RP e de PA. MVPA e MSPA reduziram em quase 50% da menor para a maior Ds, uma grande representatividade a nível de campo. Este resultado pode ser atribuído ao aumento da degradação nos crescentes GC, como a menor condutividade hidráulica do GC90 em diante, acumulando água no vaso sobre a camada compactada em tempo suficiente para desencadear processos metabólicos indesejáveis nas raízes, afetando a nutrição da planta.

4.4 NITOSSOLO BRUNO DISTRÓFICO TÍPICO

Neste Nitossolo foram observadas modificações nos atributos físicos do solo com a compactação: redução da Ks, PT, macroporosidade e PA e aumento da RP e microporosidade (Tabela 6 e Figura 13).

Tabela 6 - Atributos físicos de um Nitossolo Bruno distrófico típico para diferentes graus de compactação.

SOLO	GC %	Ds g cm ⁻³	RP MPa	Ks mm h ⁻¹	cm ³ cm ⁻³				
					CC	CA	PT	Micro	Macro
NBPA	80	1,05	1,6 d ¹	177 a	0,42	0,23	0,65 a	0,44 d	0,21 a
	85	1,13	2,8 d	79 ab	0,44	0,20	0,64 a	0,46 c	0,18 ab
	90	1,19	3,8 c	25 b	0,46	0,18	0,64 a	0,49 b	0,15 b
	95	1,26	7,0 b	1,4 b	0,49	0,13	0,62 a	0,51 a	0,11 c
	100	1,32	9,8 a	0,1 b	0,50	0,08	0,57 b	0,51 a	0,06 d

Nota: ¹ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste Tukey a 5%. (Ds) Densidade do solo; (RP) Resistência a penetração; (Ks) Condutividade hidráulica do solo saturado; (CC) Capacidade de campo; (CA) Capacidade de aeração; (PT) Porosidade total; (Micro) Microporos; (Macro) Macroporos.

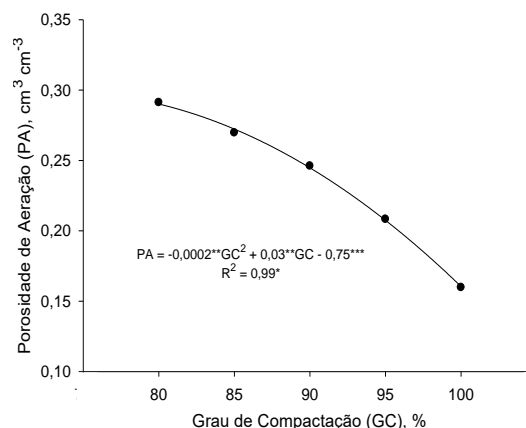
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Avaliando a porosidade do solo, a variação da macroporosidade foi mais sensível ao aumento da densidade, decaindo de 0,21 a 0,06 cm³ cm⁻³ da menor para a maior densidade. Seguindo a tendência dos macroporos, a CA também tende a reduzir, o que reduz a qualidade física, pois a difusão de gases é importante às raízes manterem seu metabolismo aeróbico ativo. Tormena et al. (2002) relataram que para solos argilosos, a capacidade de aeração

segue em ordem crescente nos sistemas de preparo, plantio direto>preparo mínimo>preparo convencional, sendo então o revolvimento do solo uma das possíveis soluções para problemas com deficiência de aeração do solo, em casos severos de degradação. Contudo, sabendo que a porosidade de aeração de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ é citada como restritiva ao desenvolvimento das plantas por afetar a difusão de gases (VOMOCIL & FLOCKER, 1966; BELTRAME et al., 1981; XU et al., 1992) e desencadear anaerobiose nas raízes, e sendo os macroporos o principal fluxo de gases no solo, este limite tornar-se-ia crítico quando os macroporos são inferiores a $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e tal valor foi obtido somente no GC100 (Tabela 6). Porém, quando avaliada a PA na Ug em que foi mantido o solo nos vasos no decorrer do experimento, essa restrição não foi observada (Figura 13).

A melhor distribuição da porosidade pode ser explicada por este solo ter poucas partículas na granulometria do silte, e maior teor de matéria orgânica dentre os quatro solos analisados, esta, juntamente com a argila forma microagregados estáveis que junto com a areia mantém a macroporosidade. Campos et al. (1995) deduziram que solos argilosos, como este, geralmente possuem boa estrutura, os microagregados conferem boas condições físicas, especialmente somado a altos teores de MO, mantendo uma porosidade satisfatória mesmo em alto GC, pela melhoria que a MO promove na estrutura do solo e na agregação.

Figura 13 – Porosidade de aeração de um Nitossolo Bruno distrófico típico em diferentes graus de compactação.



Nota: *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo.
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Apesar da macroporosidade ser considerada suficiente para suprir a aeração do solo, a Ks indica que o fluxo de água foi prejudicado, pois diminuiu de 177 para $0,1 \text{ mm h}^{-1}$ (Tabela 6), mesma tendência do relatado por Romero et al. (2014) em um Latossolo Vermelho-Amarelo com 740 g kg^{-1} de argila, onde houve redução de 142 para 5 mm h^{-1} , respectivamente nas

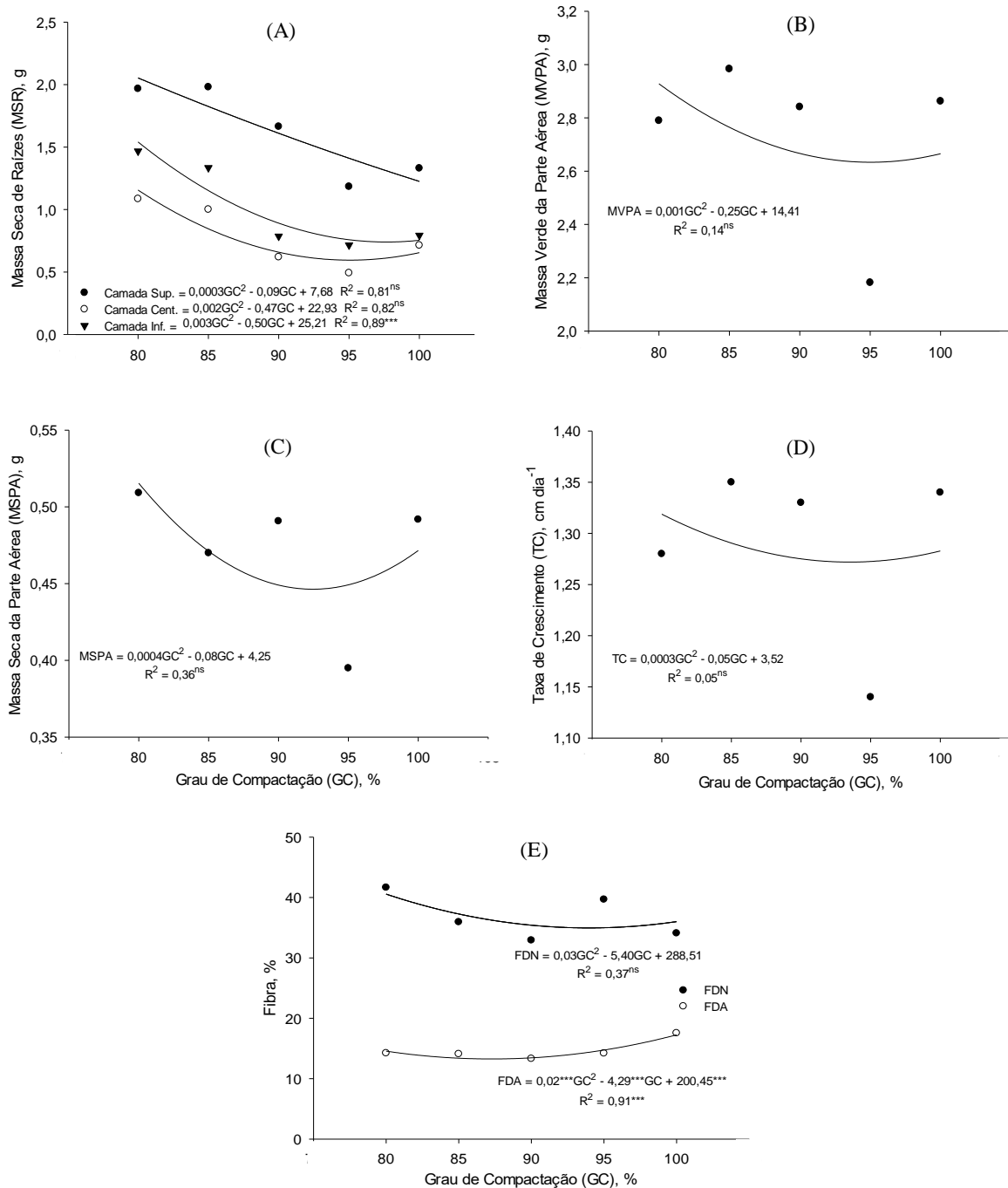
densidades 0,96 e 1,37 g cm⁻³. Estatisticamente, os GC85, 90, 95 e 100 não diferiram, assim como os GC80 e 85. Nos GC mais elevados a movimentação da água no solo foi altamente afetada pelo aumento da densidade do solo, havendo a possibilidade de que, mesmo um pequeno volume de água adicionada por irrigação ou precipitação pluviométrica seja prejudicial quando acumulado sobre a camada compactada. A condutividade da água depende, além da porosidade, da continuidade dos poros, e com o manejo antrópico este fator é alterado num sistema degradado, e prejudica o movimento de água no perfil.

Conforme a elevação do GC de 80 a 100%, a RP variou de 1,6 a 9,8 MPa, sem diferença nos GC 80 e 85, e diferiu a partir destes. Portanto, os limites deste atributo que determina a qualidade física do solo necessária para o bom crescimento das plantas de 2 MPa (TORMENA et al., 1998b; SILVA et al., 2008; LIMA et al., 2012) e 3,5 MPa (TORMENA et al., 2007; BETIOLI JÚNIOR et al., 2012) são superados no GC90. Estes resultados demonstram que o primeiro atributo a limitar as plantas neste solo é a RP, e ocorre numa Ds intermediária. A RP obtida para este solo foi a maior dentre todos, encontrando-se muito próximo ao resultado do Latossolo Vermelho, solo cuja textura é bastante semelhante. Isto demonstra que a resistência a penetração, além de sofrer grande influência do teor de umidade, é responsiva à textura do solo. A matéria orgânica provavelmente não teve relação com a RP pois estes dois solos que responderam de forma semelhante a esta análise representam os extremos opostos, o Nitossolo típico com 53 g kg⁻¹ e o Latossolo com 34 g kg⁻¹.

A distribuição das raízes em profundidade seguiu em ordem decrescente conforme a Ds era incrementada (Figura 14A) para as três camadas. Apesar da regressão não ser significativa para a os tratamentos, visivelmente há menor quantidade de raízes na camada central (Anexo C) com o aumento dos GC, e a significância da curva de MSR na camada inferior dos vasos mostra que houve dificuldade para atingirem a camada de solo mais profunda. Este resultado pode atrelar-se a alta RP obtida para este solo a partir do GC90, a qual ultrapassou os 3,5 MPa.

As características produtivas da aveia MVPA, MSPA e TC não apresentam significância para regressão quadrática e coeficiente de determinação consideravelmente baixo (Figura 14B, C e D), demonstrando pequena relação destes atributos com os crescentes GC. Também demonstra o comportamento anormal do tratamento GC95, o qual teve MVPA, MSPA e TC fora do padrão dos demais. A manutenção da umidade e camadas sem restrição física no experimento auxiliou na não responsividade dentro do tempo que a aveia foi cultivada nos vasos.

Figura 14 – Massa seca de raízes (A), Massa verde da parte aérea (B), Massa seca da parte aérea (C), Taxa de crescimento das plantas (D) e teor de fibras (E) em diferentes graus de compactação de um Nitossolo Bruno distrófico típico.



Nota: *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo.

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os teores encontrados para FDN na aveia cultivada nos cinco GC do NBPA atingiram média de 36,8% (Figura 14E), sem significância entre os tratamentos, e os valores mantiveram-se dentro do limite crítico para uma forragem de qualidade, que é de 60% para esta variável, citado por Van Soest (1994).

A FDA apresentou significância para a variação dos GC, aumentou de 14,2 para 17,5% do menor para o maior GC (Figura 14E). Esta mudança ocorre pelo fato da necessidade de manutenção da estatura e arquitetura do dossel. Porém, a mudança neste atributo de qualidade da forrageira não foi suficiente para ditar como de baixa qualidade bromatológica ou palatabilidade, visto que a média geral do teor de FDA da aveia para este solo (14,7%) é metade do teor máximo recomendado para este atributo da planta (MERTENS, 1994) que garante uma boa qualidade bromatológica da forragem em todos os GC testados.

Como analisado anteriormente, a aeração e a disponibilidade de água estavam adequadas e não foram considerados fatores limitantes para o crescimento da aveia, e RP foi posta como limitante a partir do GC90, teoricamente interferindo nas características produtivas da planta. Entretanto, as únicas mudanças ocorridas na planta foram quanto ao teor de FDA e a massa de raízes na camada inferior dos vasos, e estas não afetaram diretamente a produtividade da aveia, nem a qualidade nutricional, visto que FDA permaneceu num limite ideal. Deste modo, não se pode afirmar que a elevação dos GC para o NBPA nos limites testados exerceu influência à cultura.

4.5 NITOSSOLO BRUNO DISTRÓFICO HÚMICO

Os atributos físicos do NBSJ foram semelhantes aos dos demais solos com o aumento do GC de 80 a 100% houve aumento da microporosidade e da RP e redução da PT, macroporosidade e K_s (Tabela 7).

A macroporosidade é um atributo que teve alteração sensível com a compactação do solo, diferindo em quase todos os GC analisados. No GC90, observa-se que a macroporosidade é inferior a $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, crítico à aeração das raízes (VOMOCIL & FLOCKER, 1966; BELTRAME et al., 1981; XU et al., 1992). Apesar da macroporosidade atingir o nível crítico, a CA do solo atingiu este nível crítico no GC95. Durante a condução do experimento, a porosidade de aeração não foi um fator impeditivo ao bom crescimento e desenvolvimento da aveia, pois se manteve acima do limite crítico em todos os tratamentos (figura 15), variando de 0,24 a $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Isto ocorreu porque a umidade do solo foi mantida sempre próximo de 90% da CC. Entretanto, no campo, períodos de maior fornecimento hídrico podem tornar esta característica restritiva ao desenvolvimento das culturas.

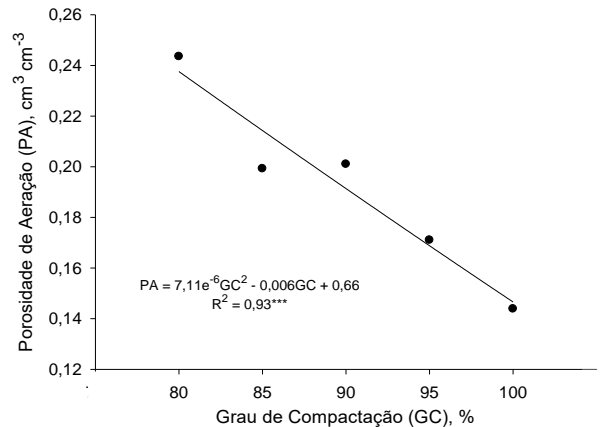
Tabela 7 - Atributos físicos de um Nitossolo Bruno distrófico húmico para diferentes graus de compactação.

SOLO	GC %	Ds g cm ⁻³	RP MPa	Ks mm h ⁻¹	CC		PT	Micro		Macro
					CA	CA		cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	
NBSJ	80	0,97	2,2 d ¹	483 a	0,41	0,18	0,59 a	0,44 b	0,15 a	
	85	1,03	3,1 cd	395 a	0,46	0,13	0,59 a	0,48 ab	0,11 b	
	90	1,09	3,3 c	146 b	0,47	0,13	0,60 a	0,51 a	0,09 c	
	95	1,16	5,5 b	15 b	0,48	0,10	0,58 ab	0,50 a	0,08 c	
	100	1,24	6,8 a	13 b	0,48	0,07	0,55 b	0,49 a	0,06 d	

Nota: ¹ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste Tukey a 5%. (Ds) Densidade do solo; (RP) Resistência a penetração; (Ks) Condutividade hidráulica do solo saturado; (CC) Capacidade de campo; (CA) Capacidade de aeração; (PT) Porosidade total; (Micro) Microporos; (Macro) Macroporos.

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Figura 15 – Porosidade de aeração de um Nitossolo Bruno distrófico húmico em diferentes graus de compactação.



Nota: *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo.

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A RP variou de 2,2 a 6,8 MPa entre os GC80 e GC100, demonstrando elevada RP mesmo em menor GC, superior ao limite de 2 MPa considerado restritivo ao crescimento normal das raízes. O outro limite citado por Tormena et al. (2007) e Betioli Júnior et al. (2012) para cultivos em SSD é 3,5 MPa, o qual foi ultrapassado quando o GC superou 90%. Neste solo percebe-se um aumento mais gradual, fator que agronomicamente é menos prejudicial que as variações mais bruscas, semelhante a observada nos solos LVCN e NBPA, os quais são mais argilosos e propensos a compactação. A textura do NBSJ, com melhor distribuição no tamanho das partículas (570 g kg⁻¹ de argila, 210 g kg⁻¹ de silte e 220 g kg⁻¹ de areia) e alto teor de MO (50 g kg⁻¹) torna-o menos suscetível à compactar em comparação aos mais arenosos, fornecendo melhores condições ao desenvolvimento radicular.

A Ks variou de 483 a 13 mm h⁻¹, com maior Ks no GC80 e GC85. Maior Ks pode estar associada a textura e ao teor de MO, constituintes que favorecem a estruturação e a drenagem da água no solo.

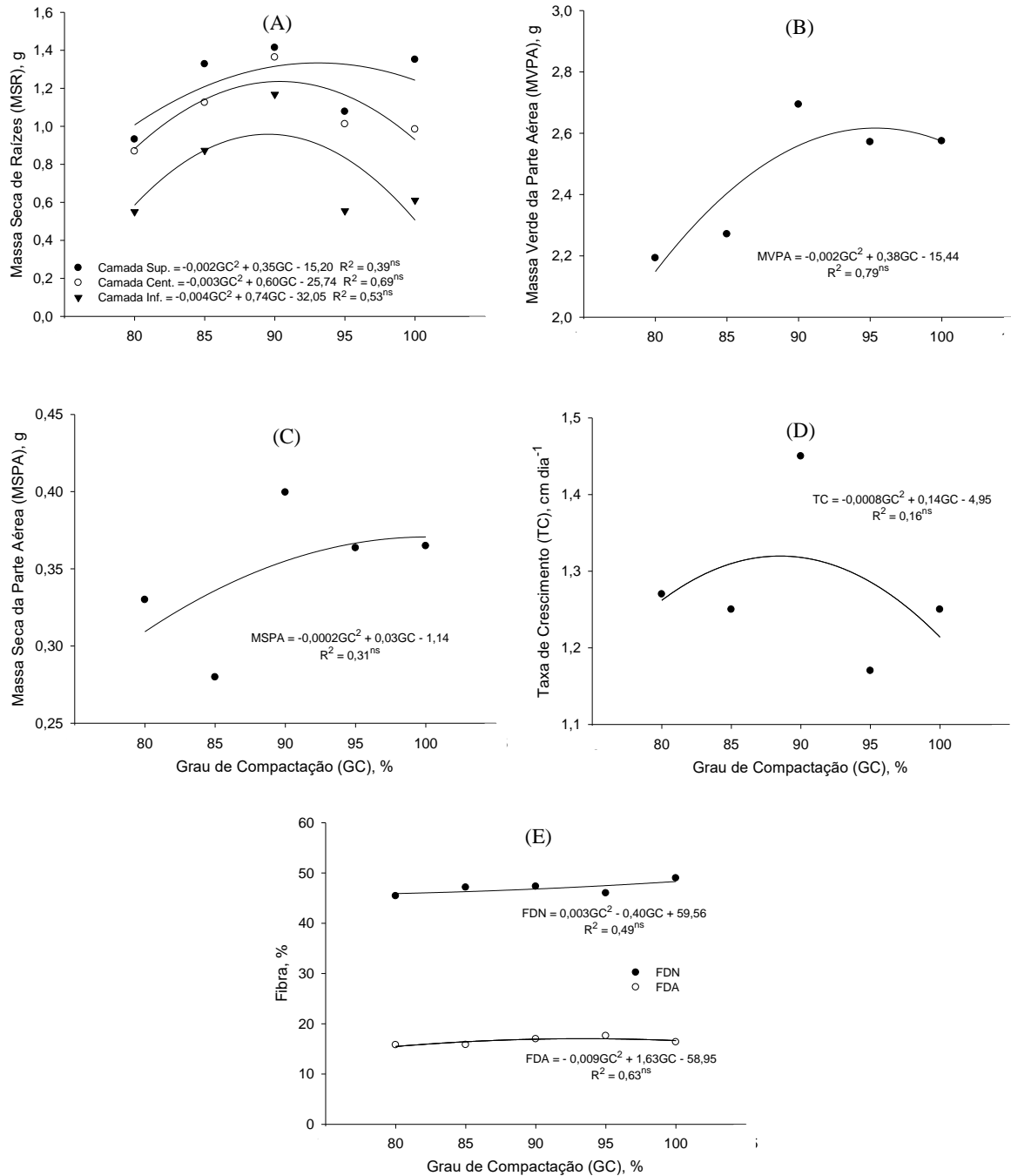
A variação da MSR em função dos GC não foi significativa pelo modelo quadrático. Entretanto, maior massa ocorreu no GC90, que coincide com a maior TC e produtividade da planta. A partir daí, houve redução de MSR nas três camadas e acúmulo das mesmas na camada superficial (Figura 16A). O anexo D ilustra a distribuição do sistema radicular no solo. O crescimento das raízes neste solo diferiu dos demais pelo fato da massa de raízes na camada inferior ser menor que na camada central em todos os GC, e pode ser explicado pela restrição do solo ao sistema radicular na camada compactada, com acúmulo destas naquela região. O menor crescimento e produção de massa da aveia neste solo é uma consequência da reduzida massa de raízes. A campo, seria um efeito indesejado, visto que com menor taxa de crescimento e menor massa de planta, o produtor teria menor rotatividade com gado, num sistema de pastagem, e produziria menor massa de plantas se a finalidade fosse cobertura do solo.

A equação de regressão para a MVPA e MSPA não indica a interferência dos GC na aveia, o coeficiente de determinação demonstra que apenas 31 e 16% da variação desses respectivos atributos da aveia podem ser explicados pelos crescentes GC, e as maiores produtividades ocorreram nos vasos com densidade intermediária a alta (Figura 16B e C).

Em média, a MSPA foi de 0,35 g por vaso, em cada um dos cortes realizados, e teve a menor média dentre os quatro solos estudados. Teoricamente, a produtividade final resultaria em 3,5 Mg ha⁻¹, assemelhando-se ao observado por Jochims et al. (2017) para algumas variedades menos produtivas de aveia forrageira, onde obtiveram produtividades próximas de 3,0 Mg ha⁻¹, porém inferior às 4,7 Mg ha⁻¹ relatadas por Córdova et al. (2017) e metade da produtividade que Rosa et al. (2008), obtiveram em seu experimento, ambos no planalto serrano catarinense. Essa baixa produtividade em todos os GC, mesmo onde não houve restrições físicas, indica que é uma limitação intrínseca ao solo, e não possível de detectar nas condições experimentais testadas.

Seguindo os padrões dos demais solos, o teor de FDN e FDA não foi modificado com o aumento da Ds nos diferentes GC (Figura 16E), e apresentou média em conformidade com os limites de 60% (VAN SOEST, 1994) e 30% (MERTENS, 1994), para FDN e FDA respectivamente, o que torna possível considerar a forrageira como sendo de qualidade, apesar da baixa produtividade.

Figura 16 - Massa seca de raízes (A), Massa verde da parte aérea (B), Massa seca da parte aérea (C), Taxa de crescimento das plantas (D) e teor de fibra (E) em diferentes graus de compactação de um Nitossolo Bruno distrófico húmico.



Nota: *, ** e *** significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo.
 Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Em resumo, a produtividade em todos os tratamentos para o NBSJ pode ser considerada baixa para o potencial da região, demonstrando que desde a menor Ds testada, a planta sentiu dificuldade em se desenvolver. A RP superior ao 2 MPa no GC80, e seu aumento com a compactação, pode estar relacionada com essa baixa produtividade, mas é pouco provável, visto

que nos demais solos estudados a RP não teve relação com o crescimento da aveia. A baixa quantidade de AD neste solo (Tabela 3) é outro fator importante que exerce influência na produtividade e deve ser considerada. Este fator pode ser mais restritivo para casos em que as raízes se concentram na camada superficial, como observado no GC95 e GC100.

4.6 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO

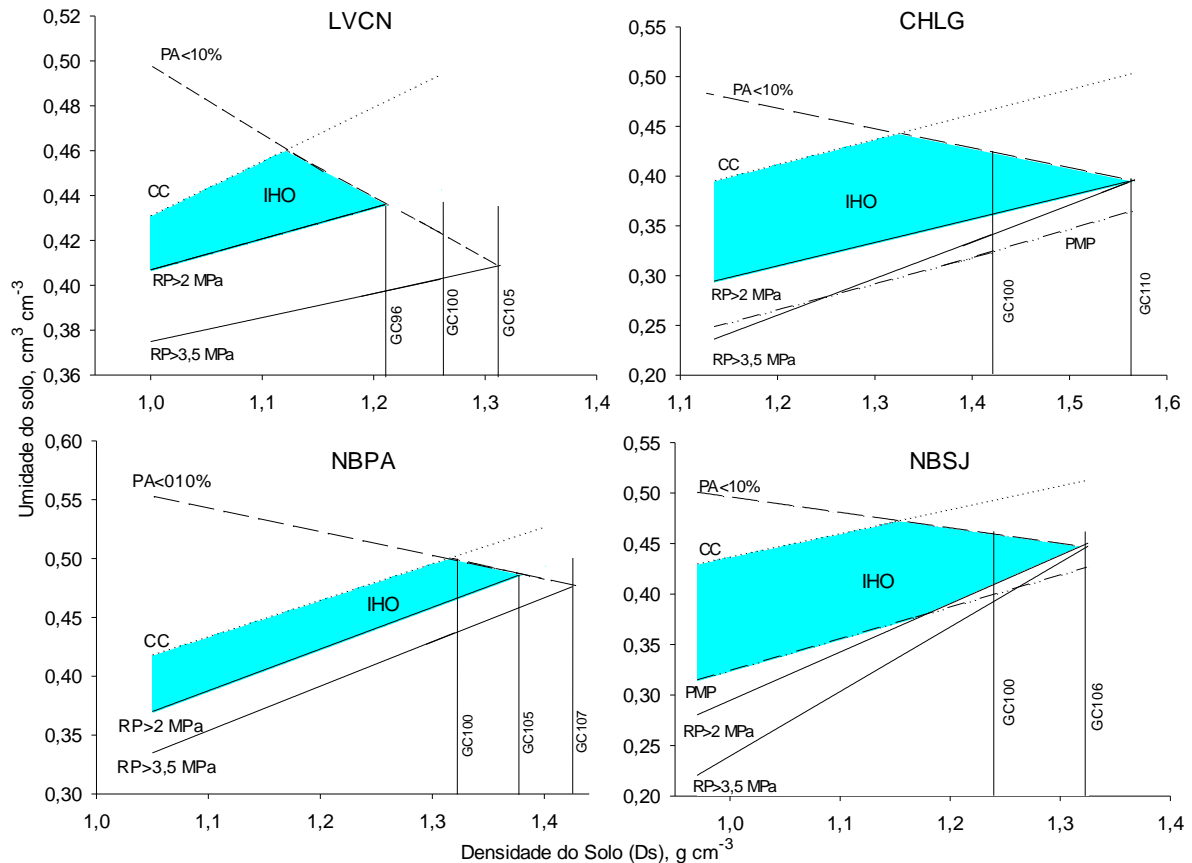
Os atributos físicos limitantes ao desenvolvimento de culturas agrícolas são muito variáveis e dependentes de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos, como o manejo adotado na área, nutrição (fertilidade química), teor de matéria orgânica, classe textural, umidade do solo entre outros. Torna-se, portanto, importante conhecer as variáveis que limitam o cultivo afim de maximizar a produtividade e o rendimento da cultura.

A figura 17 demonstra como a aeração, a água disponível e a RP variaram em função da Ds determinada pelos Graus de Compactação crescentes. O IHO é representado pela área colorida no gráfico e o ponto em que ocorre o cruzamento das linhas dos limites superior e inferior indica sua densidade crítica.

Como as características produtivas da aveia não sofreram redução com os crescentes GC, também foi plotada a linha de RP igual a 3,5 MPa (Tormena et al., 2007 e Betioli Júnior et al. 2012), procurando conhecer qual o GC crítico quando este limite é considerado como a RP crítica.

O IHO do LVCN, a densidade crítica considerando RP de 2,0 MPa foi de 1,21 g cm⁻³, abaixo do GC máximo testado. Já admitindo como limite inferior uma RP de 3,5 MPa, a densidade crítica aumenta para 1,32 g cm⁻³, o que corresponde a um GC de 105%, e informa que densidades abaixo desta não restringiriam o crescimento das plantas. Tormena et al. (2007), em um Latossolo Vermelho distrófico com 870 g kg⁻¹ de argila, encontraram densidade crítica de 1,30 g cm⁻³. Neste solo, o PMP não foi responsável pela restrição no IHO, sendo a RP a principal restrição encontrada pelas plantas. Analisando, portanto, a não diferenciação da produtividade, pode-se concluir que a RP de 2 MPa não foi limitante para a aveia-preta neste Latossolo, e sugere-se testes com maiores densidades para determinar indicadores físicos limitantes a esta cultura.

Figura 17 – Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), determinado pela densidade do solo nos níveis críticos de indicadores físicos de qualidade do solo para Latossolo Vermelho distrófico típico (LVCN), Cambissolo Húmico alumínico típico (CHLG), Nitossolo Bruno distrófico típico (NBPA) e Nitossolo Bruno distrófico húmico (NBSJ).



Nota: PA: porosidade de aeração limitante (10%); CC: capacidade de campo; RP 2: resistência a penetração limitante (2 MPa); RP 3,5: resistência a penetração limitante (3,5 MPa); PMP: ponto de murcha permanente
 Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

O IHO do CHLG também demonstrou uma densidade crítica superior àquela correspondente ao GC100, tanto para os limites inferiores de RP de 2,0 como de 3,5 MPa. Neste solo, com D_s menores que $1,25 \text{ g cm}^{-3}$, o PMP é o limite inferior restritivo e acima de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$. A D_s em que o IHO igualou a zero foi de $1,56 \text{ g cm}^{-3}$, que representa o GC de 110%. Com isso, segundo o IHO, densidades inferiores a esta não deveriam ser restritivas ao crescimento das culturas. Os Nitossolos testados também demonstraram densidade crítica superior a densidade no GC100, atingindo $1,42$ e $1,32 \text{ g cm}^{-3}$, que correspondem ao GC107 e GC106 para o NBPA e NBSJ, respectivamente. No NBSJ, até a D_s de $1,18 \text{ g cm}^{-3}$ o PMP foi o limite inferior do IHO. A partir desta densidade este limite foi dado pela RP de 2 MPa. Se considerar RP de 3,5 MPa, essa transição ocorre na D_s de $1,26 \text{ g cm}^{-3}$. Portanto, a limitação de umidade atingindo o PMP é de maior relevância neste solo nos GC testados do que a RP. No

NBPA, o limite delimitado pelo PMP não foi relevante, sendo a RP sempre considerada o limite inferior do IHO, independente se for considerada a RP de 2 ou de 3,5 MPa.

De maneira geral, o maior GC estabelecido neste estudo não foi restritivo a cultura da aveia para os quatro solos avaliados, visto a não significância das médias de produtividade, e qualidade nutricional da cultura. Portanto, testes avaliando densidades maiores devem ser realizados supondo a hipótese que o ponto zero do IHO passa a restringir a produtividade da aveia. Também é importante manter a umidade do solo em níveis mais restritivos à cultura.

4.7 POTENCIAL DA AVEIA NA RECUPERAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS

A comparação dos resultados de Ds antes da semeadura da aveia com os obtidos após seu cultivo está demonstrado na tabela 8 (amostras pareadas). Observa-se que em todos os solos a Ds foi menor ao final do cultivo da aveia, com exceção do GC85 do LVCN, NBPA e NBSJ e do GC95 do NBPA, que permaneceram iguais. Silva e Mielniczuk (1997) atribuem a melhoria estrutural do solo realizada pelas gramíneas, à alta densidade e periódica renovação radicular.

Analisando a recuperação física de um Argissolo Vermelho-Amarelo com 650 g kg⁻¹ de argila pelo cultivo de capim Tifton 85 em casa de vegetação, Magalhães et al. (2009) relataram que após o cultivo a Ds diminuiu e a macroporosidade aumentou, demonstrando sua efetividade na recuperação destes atributos. Da mesma maneira, a avaliação temporal de Ds realizada por Lima et al. (2012b) demonstrou que o cultivo da forrageira Coastcross (*Cynodon* spp.) melhorou a estrutura do solo, com redução de densidade e aumento dos macroporos de um Latossolo Vermelho-Amarelo.

Flores et al. (2008) analisaram a recuperação da qualidade de um Argissolo Vermelho pelo sistema plantio direto e relataram que a estrutura do solo se recompõe durante o tempo, muito pelo fato deste sistema manter e por vezes incrementar a matéria orgânica no solo, o que melhora a agregação. A melhoria do teor de matéria orgânica ocorre através do aporte de raízes, manutenção dos resíduos no solo e melhores condições para os organismos do solo.

Além da influência biológica na redução da Ds, devem ser considerados os ciclos de umedecimento e secamento que alteram a estrutura do solo. O efeito de umedecimento e secamento foi comprovado por Gubiani et al. (2015), quando analisaram os efeitos da contração e expansão de um Latossolo Vermelho distroférico. Relataram que este processo pode reverter o processo de compactação, e que esta resiliência é maior na camada superficial local em que a variação do conteúdo de água é maior por estar em contato direto com a incidência solar e o ar atmosférico, desenvolvendo maior efeito dos ciclos de contração e expansão. Este processo pode explicar a melhoria na estrutura do solo, pois, embora o solo tenha sido irrigado

constantemente para manter a umidade a 85% da sua capacidade de campo, a quantidade de água perdida em condição de casa de vegetação é expressiva.

Tabela 8 - Atributos físicos de quatro solos de Santa Catarina, antes e após o cultivo de aveia preta.

SOLO	GC %	Ds	
		antes	após
		g cm ⁻³	
LVCN	80	1,00 a ¹	0,98 b
	85	1,07 a	1,04 b
	90	1,13 a	1,05 b
	95	1,19 a	1,19 a
	100	1,26 a	1,22 b
CHLG	80	1,13 a	0,97 b
	85	1,21 a	1,04 b
	90	1,28 a	1,08 b
	95	1,35 a	1,24 b
	100	1,42 a	1,25 b
NBPA	80	1,05 a	0,97 b
	85	1,13 a	1,08 a
	90	1,19 a	1,08 b
	95	1,26 a	1,25 a
	100	1,32 a	1,23 b
NBSJ	80	0,97 a	0,95 b
	85	1,03 a	1,01 a
	90	1,09 a	1,05 b
	95	1,16 a	1,13 b
	100	1,24 a	1,21 b

Nota: ¹ Médias seguidas da mesma letra, na coluna em cada solo, não diferem pelo teste “t” a 5%.

GC – grau de compactação do solo; Ds – densidade do solo.

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

O caráter retrátil que os Nitossolos e o Latossolo demonstram faz com que este efeito se sobressaia, pelo fato de fendas se formarem em condição de secamento, e estas permanecerem mesmo com o molhamento do solo, mantendo locais de infiltração e crescimento de raízes, e com menor densidade comparada ao estado inicial. Deste modo, tanto o efeito do sistema radicular quanto dos ciclos de umedecimento e secamento devem ser considerados no processo de melhoria da qualidade física do solo.

5 CONCLUSÕES

As propriedades físicas são afetadas pela compactação do solo, atingindo níveis críticos de resistência a penetração e porosidade de aeração em uma densidade do solo menor que a densidade máxima (GC100). A compactação aumenta a retenção de água, tanto a capacidade de campo quanto o ponto de murcha permanente. Em relação a água disponível, seu teor é mais elevado nos graus de compactação intermediários (GC85 a GC95).

A densidade do solo em que o IHO é igual a zero, considerada crítica, é superior a densidade máxima do solo determinada pelo teste de Proctor.

A massa seca de parte aérea é reduzida com o aumento dos graus de compactação no Cambissolo Húmico. As demais características produtivas da aveia não sofreram interferência com a modificação dos atributos físicos do solo. O teor de fibra em detergente ácido aumenta de acordo com o aumento da compactação do solo no Nitossolo Bruno distrófico típico. Entretanto, a qualidade da aveia não é afetado pelo grau de compactação em nenhum dos solos.

A aveia-preta é um agente biológico eficiente para a recuperação de solos degradados, pois melhora a qualidade física dos mesmos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: **Solo: Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

ALBUQUERQUE, Jackson Adriano et al. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29 p.415-424, 2005.

ALBUQUERQUE, Jackson Adriano; SANGOI, Luís.; ENDER, Márcio. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.3, p.717-723, 2001.

ALMEIDA, Cinara Xavier et al. Funções de pedotransferência para a curva de resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2235-2243, 2008.

ALVARENGA, Ramon Costa; NOCE, Marco Aurélio. **Integração Lavoura-Pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 16 p. (Série Documentos, n. 47).

ALVES, Marlene Cristina & SUZUKI, Luís Eduardo Akiyoshi Sanches. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum**, v.26, p.27-34, 2004.

ANUALPEC. **Anuário da pecuária brasileira**. São Paulo - SP: FNP Consultoria e Comércio Ltda., 2008.

ASSIS, Renato Lara de et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.558-568, 2009.

BALBINO, Luís Carlos et al. **Integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF): região sul**. Brasília: Embrapa: 2012.

BARACHO, Ivana Pires de Sousa. **Influência da compactação do solo e adubação nitrogenada na qualidade de gramíneas forrageiras e nos atributos físicos do solo**. 2016. 59p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina.

BAVER, Leonard David; GARDNER, Walter H.; GARDNER, Wilford Robert. **Soil physics**. Nova York: John Wiley, 1972. 498 p.

BAYER, Cimélio et al. Química de solos em plantio direto. In: FONTOURA, S. M. V. & BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. 2 ed. Guarapuava, PR. Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2009, p.1-7.

BELTRAME Lawson Francisco de Souza et al. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.5 p.145-149, 1981.
BENNET, Hugh Hammond. Elements of Soil Conservation. New York: McGraw Hill Book Company. 1947. 406p.

BERTOL, Ildegardis et al. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico hálico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, v.30, p.91-95, 2000.

BERTOL, Ildegardis et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.155-163, 2004.

BERTOL, Ildegardis; MIQUELUTTI, David José. Perdas de solo, água e nutrientes reduzidas pela cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.28, p.1205-1213, 1993.

BETIOLI JÚNIOR, Edner et al. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36 p.971-982, 2012.

BLACKWELL, Paul S. et al. Evaluation of soil compaction by transverse wheeling of tillage slots. **Soil Science Society of America Journal**, v.53 p.11-15, 1989.

BLAINSKI, Everton et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.975-983, 2008.

BLAKE, G.R.; HARTGE, Karl Heinrich. Bulk density. In: KLUTE, A., (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison. American Society of Agronomy, p.363-375, 1986.

BODMAN, G. B.; RUBIN, J. Soils puddling. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.13, p.27-36, 1948.

BORGES, G.O. Resumo histórico do plantio direto no Brasil. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo, Fundação ABC / Aldeia Norte, 1993. p.13-18.

BORTOLINI, Diego 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.

BOUKOUNGA, Jean Christian. **Propriedades físico-mecânicas de um Argissolo sob diferentes sistemas de manejo e preparo do solo**. 2009. 78p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRAIDA, João Alfredo et al. Resíduos Vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.605-614, 2006.

BRAIDA, João Alfredo et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.131-139, 2010.

BROWN, Vinicius et al. Efeito no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, n.1, e5501, 2018.

BRUSSAARD, Lijbert.; VAN FAASSEN, H.G. Effects of compaction on soil biota and soil biological processes. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production. London: **Elsevier**, 1994. p.215-235 (Developments in Agricultural Engineering, II).

BUENO, Benedito de Souza; VILAR, Orenccio Monje. **Mecânica dos solos**. São Carlos: EESC-USP, 1998. 131 p.

CAMARGO, Otávio Antônio; ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú. **Compactação do Solo e o Desenvolvimento de Plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CAMPOS, Bem-Hur Costa de et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho - Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.121-126, 1995.

CARNEIRO, Marco Aurelio Carbone et al. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.147-157, 2009.

CARTER, Martin R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**. v.70, p.425-433, 1990.

CARVALHO, S.R. **Influência de dois sistemas de manejo de pastagens na compactação de uma Terra Roxa Estruturada**. 1976. 89p. Dissertação (Mestrado). Piracicaba: USP/ Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

CASSEL, D.K. & NIELSEN, D. R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2 ed. **Madison**, ASA – SSSA, 1986. P.901-926.

CECATO, Ulysses et al. Produção e composição química em cultivares e linhagens de aveia (*Avena* spp.). **Acta Scientiarum**, v.23, n.4, p.775-780, 2001.

CIOTTA, Marlise Nara et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, p.1161- 1164, 2003.

COLLARES Gilberto Loguércio. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 107p. Tese (Doutorado). Santa Maria, RS, Universidade Federal de Santa Maria.

COLLARES, Gilberto Loguércio et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.933-942, 2008.

CÓRDOVA, Ulisses de Arruda; FLARESSO, Jefferson Araújo; STRADIOTO NETO, Joseli. Ensaio Nacional de aveias de cobertura em Lages, SC, 2017. In: **XXXVIII Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Aveia**, 37, 2018, Ijuí. Anais... Ijuí: Unijuí, 2018. [online]: <https://www.unijui.edu.br/eventos/xxxviii-reunio-da-comisso-brasileira-de-pesquisa-de-aveia-467>. Acesso em 18/12/2018.

CORRÊA, José Carlos. Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do Estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.21, p.1317-1322, 1985.

COSTA, Falberni de Souza et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.527-535, 2003.

COSTA, Falberni de Souza. **Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo Bruno sob sistemas de manejo do solo em experimentos de longa duração**. 2001. 98p. Dissertação (Mestrado). Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina.

CQFS- RS/SC. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de calagem e adubação os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Núcleo Regional Sul. 2016. 376p.

CURI, Nilton et al. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.

DEXTER, A. R. & YOUNGS, I. M. Soil physic toward 2000. **Soil and Tillage Research**, v.24, p.101-106, 1992.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v.11, p.199-238, 1988.

DIAS JUNIOR, Moacir de Souza; ESTANISLAU, Wagner Tompson. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.45-51, 1999.

DIAS JUNIOR, Moacir de Souza; PIERCE, Francis John. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182, 1996.

DORAN, John W. & PARKIN, Timothy B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. et al. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America Journal**. p. 3-21, 1994.

DOURADO-NETO, Durval et al. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v.57, n.1, p.191-192, 2000.

EHLERS, Widu-Wolfgang. et al. Penetration resistance and growth root of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil & Tillage Research**, v.3 p.261-275, 1983.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 370p.

FEBRAPDP- Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. [Online]: <http://www.febrapdp.org.br/area-de-pd>. Acesso em 28 nov 2018.

FLORES, Carlos Alberto et al. Recuperação da qualidade estrutural, pelo sistema plantio direto, de um Argissolo Vermelho. **Ciência Rural**, v.38, n.8, p.2164-2172, 2008.

FOLONI, José Salvador Simoneti et al. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.1, p.49-57, 2006.

FOLONI, José Salvador Simoneti et al. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.8, p.947-953, 2003.

FONTANELI, Renato Serena; SANTOS, Henrique Pereira dos; FONTANELI, Roberto Serena. **Principais forrageiras para integração lavoura pecuária-floresta na região sul-brasileira**. 2 ed. Brasília, DF: EMBRAPA Trigo, 2012. 544p.

GERDES, Luciana et al. Avaliação de características de valor nutritivo das gramíneas forrageiras Marandu, Setária e Tanzânia nas estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, n.4, p.955-963, 2000.

GIBB, J. A preparação do solo para a cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.6, p.69-75, 1939.

GOMES, Jorge Fainé; STUMPF JR., Waldyr. Intervalos de corte e adubação nitrogenada em Aveia preta EMBRAPA 29 (GAROA). In: **Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, 38., 2001, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2001.

GONÇALVES, Adriano Dicesar Martins de Araújo; LIBARDI, Paulo Leonel. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1174-1184, 2013.

GREENLAND, Dennis James; LAL, Rattan. **Soil Conservation and Management in the Humid Tropics**. Nova Iorque: John Wiley & Sons. 1975. 283p.

GUBIANI, Paulo Ivonir et al. Permeâmetro de carga decrescente associado a programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.993-997, 2008.

GUBIANI, Paulo Ivonir et al. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.100-108, 2015.

GUBIANI, Paulo Ivonir et al. Tensão e extração de água em mesa de tensão e coluna de areia, em dois solos com elevada densidade. **Ciência Rural**, v.39, n.8, p.2535-2538, 2009.

GUBIANI, Paulo Ivonir. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. 2012. 135p. Tese (Doutorado). Santa Maria, RS, Universidade Federal de Santa Maria.

HOLTZ, Robert D. & KOVACS, William D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2006**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2017: resultados preliminares**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da pecuária municipal**. vol.44. Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

IJIMA, Morio; KONO, Yasuhiro. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. **Japanese Journal of Crop Science**, v.60, p.130-138, 1991.

JIMENEZ, Rodrigo Lobon et al. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v.12, n.2, p.116-121, 2008.

JOCHIMS, Felipe. et al. Desempenho agrônômico de genótipos crioulos de aveias forrageiras na região Oeste de Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.30, n.2, p.63-68, 2017.

KIM, HyeMin et al. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, v.160, p.244-251, 2010.

KLEIN, Vilson Antônio. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. da UPF, 2008. 212p.

KLEIN, Vilson Antônio; LIBARDI, Paulo Leonel. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.4, p. 857-867, 2002.

KOHNKE, Helmut; BERTRAND, Anson R. **Soil Conservation**. New York: McGraw-Hill Book Company. 1959. 298p.

LAWS, W. Derby; EVANS, D. D. The effects of long-time cultivation on some physical and chemical properties of two Rendzina soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.14, p.15-19, 1949.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv. Soil Sci.**, v.1, p.277-294, 1985.

LIBARDI, Paulo Leonel. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, EDUSP, 2005. 335p.

LIMA, Cláudia Liane Rodrigues de et al. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.6, p.945-951, 2004.

LIMA, Cláudia Liane Rodrigues de et al. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.124 p.190-195, 2012.

LIMA, Vico Mendes Pereira et al. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.71-78, 2012b.

LIPIEC, Jerzy et al. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.307-317, 1991.

LOSS, Arcangelo et al. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.4, p.1212-1224, 2015.

LOVATO, Thome et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.175-187, 2004.

LUCIANO, Rodrigo Vieira 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.

MAGALHÃES, Eduardo Nunes de et al. Recuperação estrutural e produção de capim-tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. **Ciência Animal Brasileira**, v.10 p.68-76, 2009.

MARIA, Isabella Clerici et al. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.3, p.703-709, 1999.

MASLE, Josette; PASSIOURA, John B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.14, p.643- 656, 1987.

MEEK, Burl D. et al. Soil compaction and its effects on alfalfa in zone productions systems. **Soil Science Society of American. Journal**, v.52:233-236, 1988.

MEROTTO Jr, Aldo; MUNDSTOCK, Claudio Mário. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.197-202, 1999.

MERTENS, D.R. Regulation of forage intake. In: FAHEY JR., G.C. (Ed). **Forage quality, evaluation and utilization**. Madison: American Society of Agronomy, p.450-493, 1994.

MIELNICZUK, João et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N. et al. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.209-248, 2003.

MONDARDO, Daniela et al. Produção e composição químico-bromatológica da aveia preta fertilizada com doses crescentes de dejetos líquido suíno. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.2, p.509-517, 2011.

MORAES, Moacir Tuzzin et al. Use of penetrometers in agriculture: A review. **Engenharia Agrícola**, v.34, p.179-193, 2014.

MOREIRA Wagner Henrique 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, p.1315-1326, 2014.

PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R.; EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red-Brown earth. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.44, n.2, p.317-331, 1993.

QUEIROZ-VOLTAN, Rachel Benetti; NOGUEIRA, Sandra dos Santos Sevá; MIRANDA, Manoel Albino Coelho de. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.929-938, 2000.

RAIJ, van B. et al. **Análise química para a fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico, p. 285. 2001.

RAUBER, Luis Paulo et al. Physical properties and organic carbon content of a Rhodic Kandiudox fertilized with pig slurry and poultry litter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.4, p.1323-1332, 2012.

REICHARDT, Klaus. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.

REICHERT, José Miguel et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Ciência Solo**, v.5, p.49-134, 2007.

REICHERT, José Miguel et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, n.2, p.242-254, 2009a.

REICHERT, José Miguel et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.3, p.310-319, 2009b.

REICHERT, José Miguel; REINERT, Dalvan José; BRAIDA, João Alfredo. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, v.27, p.29-48, 2003.

REINERT, Dalvan José et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura de Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1805-1816, 2008.

ROMERO, Euriel. Millan et al. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.10, p.1003-1009, 2014.

ROSA, José Lino; CÓRDOVA, Ulisses Arruda; PRESTES, Nelson Eduardo. **FORAGEIRAS DE CLIMA TEMPERADO PARA O ESTADO DE SANTA CATARINA**. Florianópolis: Epagri, 2008. 64 p. Epagri. Boletim Técnico, 141.

SÁ, Marcos Aurélio Carolino de; SANTOS Jr, João de Deus Gomes dos. **Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2005. 26p. Documentos, 136.

SALES, Rafael Pereira et al. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.3, p.429-438, 2016.

SECCO, Deonir. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, p.58-64, 2009.

SIDIRAS N.; VIEIRA, M. J. Comportamento de um Latossolo Roxo Distrófico compactado pelas rodas do trator na semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.10, p.1285-1293, 1984.

SILVA, Álvaro Pires da et al. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32 p.1-10, 2008.

SILVA, Álvaro Pires da; KAY, Beverley David; PERFECT, Edmund. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, Álvaro Pires; KAY, Beverley David; PERFECT, Edmund. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil & Tillage Research**, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, Álvaro Pires; LIBARDI, Paulo Leonel; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.91-95, 1986.

SILVA, Alzira Gabriela. **Fontes de fósforo produção e composição bromatológica de cultivares de milho forrageiro**. 2010. 109p. Tese (Doutorado). Escola de Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

SILVA, Franciani Rodrigues et al. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.6, p.1731-1739, 2014.

SILVA, Geovani José et al; MAIA, João Carlos de Souza e BIANCHINI, Aloísio. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.1, p.31-40, 2006.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, João. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.311-317, 1997.

SILVA, Vanderlei Rodrigues da et al. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1097-1104, 2009.

SILVA, Vanderlei Rodrigues da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171p. Tese (Doutorado). Santa Maria, RS, Universidade Federal de Santa Maria.

SORACCO, Carlos German et al. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1149-1156, 2012.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.2, p.395-401, 2001.

STRECK, Carlos Arnaldo. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83 p. Dissertação (Mestrado). Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria.

SUZUKI, Luís Eduardo Akiyoshi Sanches. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS.

SUZUKI, Luís Eduardo Akiyoshi Sanches et al. Grau de Compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1159 – 1167, 2007.

TAYLOR, H.M. **Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield**. In: BARNES, K.K., org. compaction of agricultural soils. Madison, American Society of Agricultural Engineers. p.292-305, 1971. (ASAE Monograph).

TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes. **Land use effects on Soil Physical and Hydraulic Properties of a Clayey Ferralsol in the Central Amazon**. 2001. 255p. Tese (Doutorado). University of Bayreuth. Bayreuth – Alemanha.

TORMENA, Cássio Antônio et al. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22 p.573-581, 1998b.

TORMENA, Cássio Antônio et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, Cássio Antônio et al. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.8, n.1, p.65-71, 2004.

TORMENA, Cássio Antônio et al. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.2, p.301-309, 1998a.

TORMENA, Cássio Antônio et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.211-219, 2007.

TWERDOFF, Dennis A. et al. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. **Canadian Journal of Soil Science**, v.79, n.3, p.465-471, 1999.

VAN SOEST, Peter J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2. ed. New York: Cornell University Press, 1994. 476p.

VARGAS, Milton. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo. Mcgraw-Hill do Brasil, 509p., 1977.

VEZZANI, Fabiane Machado; MIELNICZUK, João. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.330-337, 2009.

VIEIRA, M. J. Propriedades físicas do solo. In: **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina, 1981. p.19-32. (IAPAR. Circular, 23).

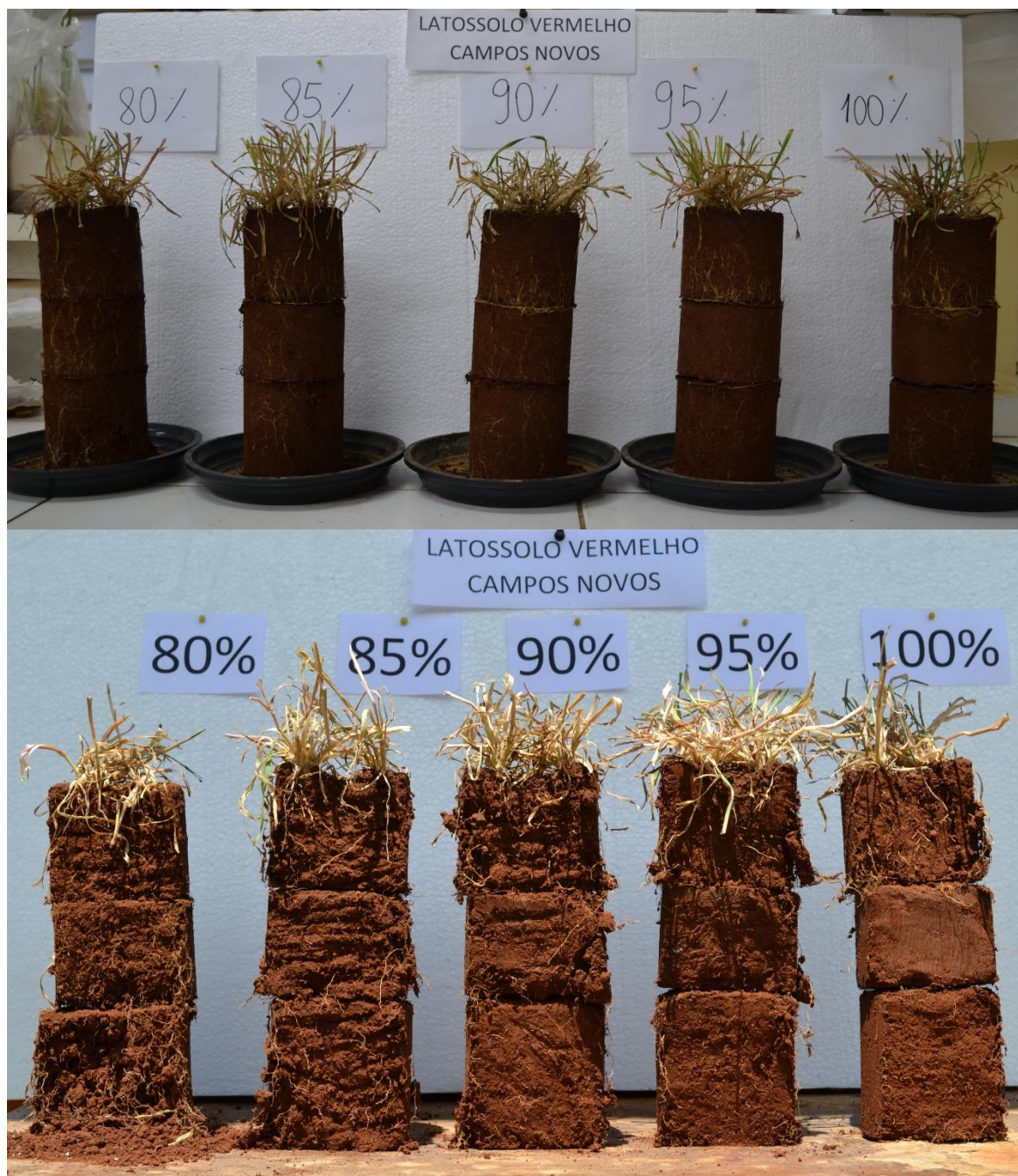
VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. Transactions of the **American Society of Agricultural Engineers**, v.4, p.242-246, 1966.

WEISSKOPF, Peter et al. Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. **Soil & Tillage Research**, v.111, p.65-74, 2010.

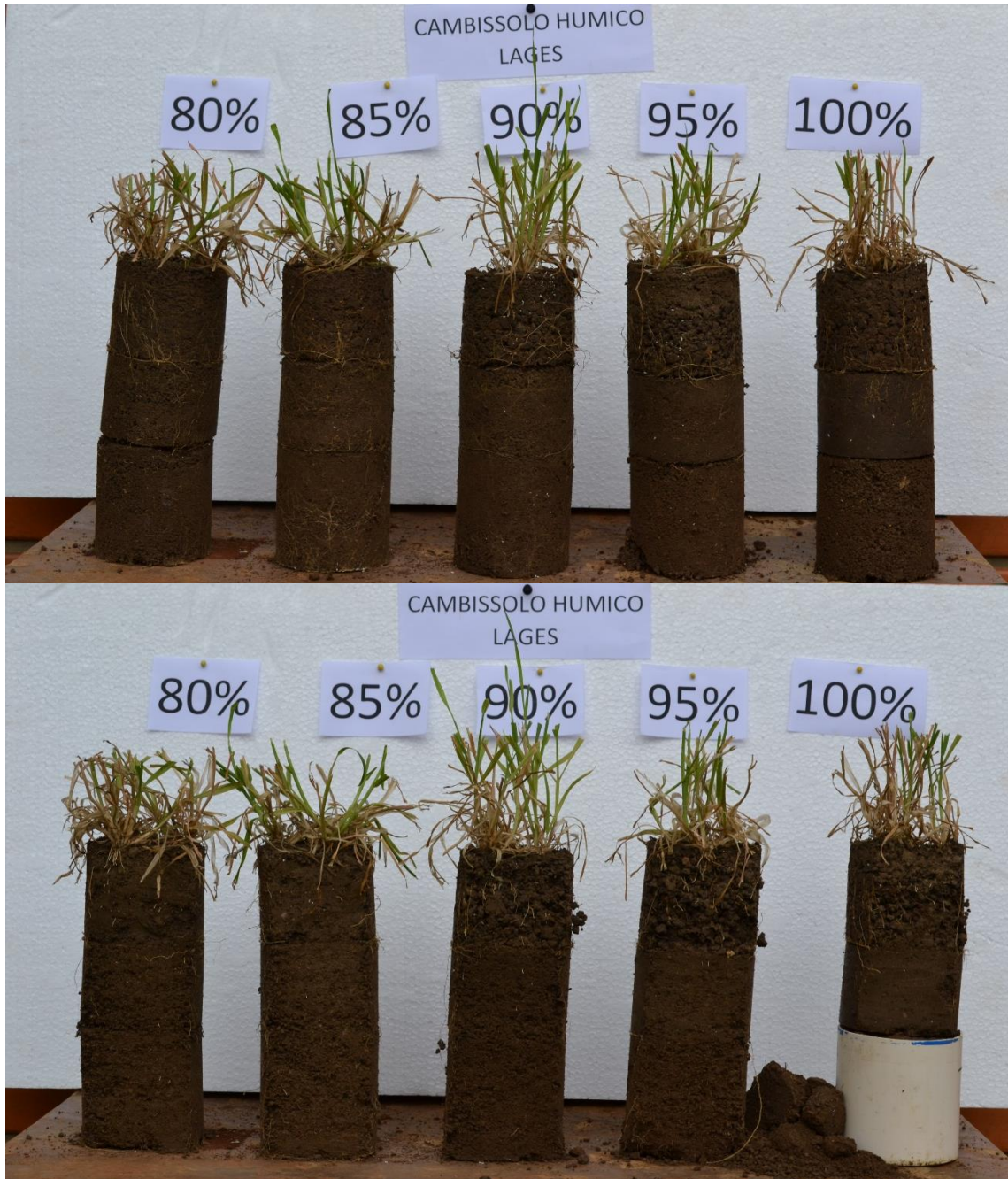
XU, Xia. et al. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, n.5, p.1743-1750, 1992.

ANEXOS

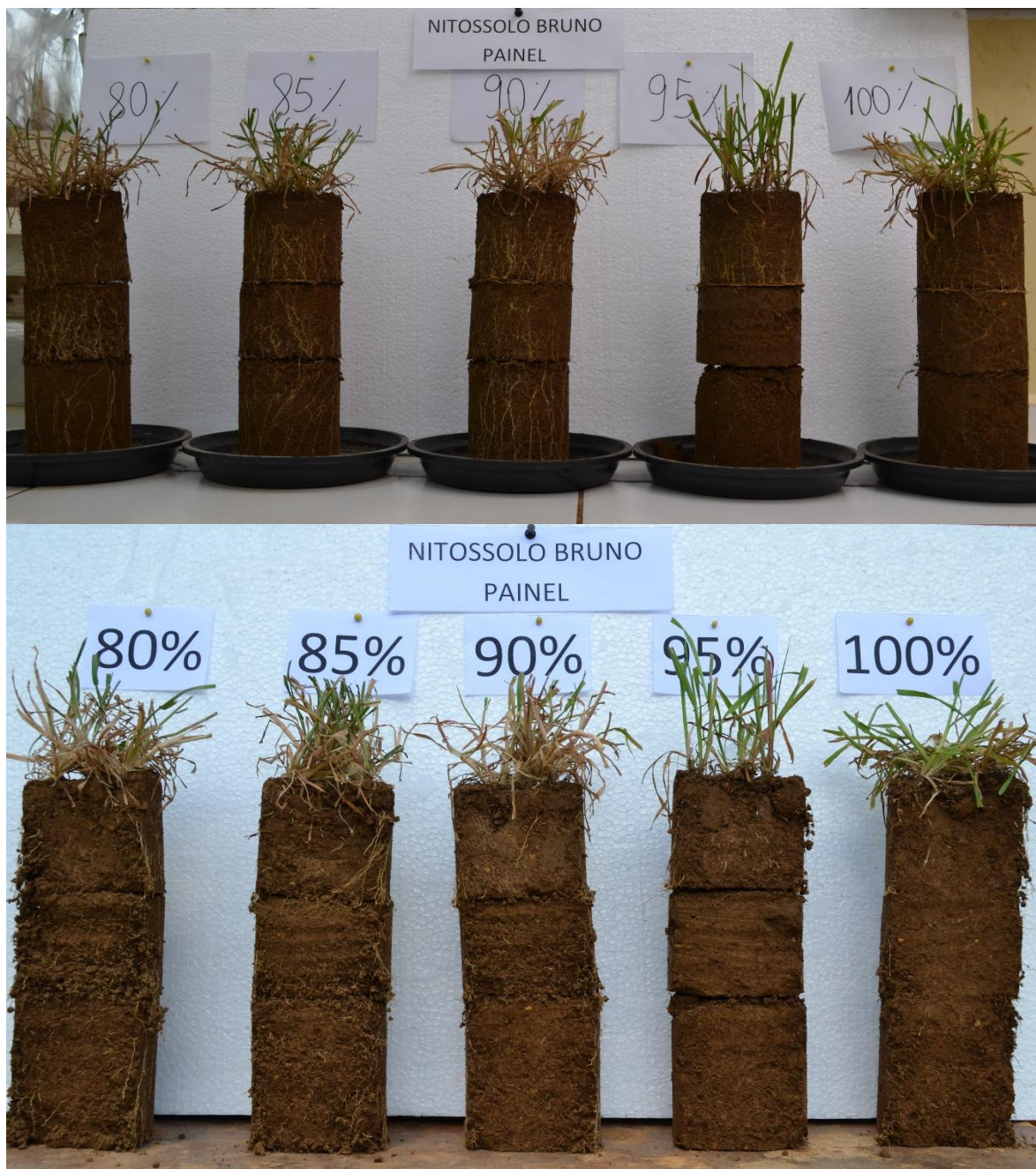
ANEXO A – Distribuição do sistema radicular no perfil experimental de um Latossolo Vermelho distrófico retrático com diferentes graus de compactação.



ANEXO B – Distribuição do sistema radicular no perfil experimental de um Cambissolo Húmico aluminífero típico com diferentes graus de compactação.



ANEXO C – Distribuição do sistema radicular no perfil experimental de um Nitossolo Bruno distrófico típico com diferentes graus de compactação.



ANEXO D – Distribuição do sistema radicular no perfil experimental de um Nitossolo Bruno distrófico húmico com diferentes graus de compactação.

