

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA  
VETERINÁRIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE SOLOS  
SILTOSOS SOB PLANTIO DIRETO**

**DJULIA TAÍS BROCH**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Passo Fundo, março de 2016

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA  
VETERINÁRIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE SOLOS  
SILTOSOS SOB PLANTIO DIRETO**

**DJULIA TAÍS BROCH**

**Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Passo Fundo, março de 2016

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

“PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE SOLOS SILTOSOS SOB PLANTIO DIRETO”

Elaborada por

Djulia Taís Broch

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em  
Agronomia – Produção e Proteção de Plantas

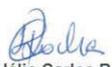
Aprovada em: 20/04/2016  
Pela Comissão Examinadora

  
Dr. Wilson Antonio Klein  
Presidente da Comissão Examinadora  
Orientador

  
Dr. Clovis Dalri Marcolin  
IFRS

  
Dr. Michael Mazunara  
IFRRS

  
Dra. Eunice Oliveira Calvete  
Coord. Prog. Pós-Graduação em Agronomia

  
Dr. Hélio Carlos Rocha  
Diretor FAMV

CIP – Catalogação na Publicação

---

B863p Broch, Djulia Taís

Propriedades físico-hídricas de solos siltosos sob  
plantio direto / Djulia Taís Broch. – 2016.

84 f. : il., color. ; 25 cm.

Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein.

Mestrado (Mestre em Agronomia) – Universidade  
de Passo Fundo, 2016.

1. Solos – Degradação. 2. Solos - Densidade.

---

\_Catalogação: Bibliotecária Cristina Troller - CRB 10/1430

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo apoio, incentivo e carinho.

Ao meu orientador, professor Vilson Antonio Klein, pela oportunidade, conhecimento transmitido, amizade e apoio.

A todos os colegas do LAFAS, especialmente Délcio, André e Manuelli, pela ajuda e apoio em todos os momentos.

Aos professores do PPGAgro, pelos ensinamentos e troca de experiências,

À UPF e a Capes, pelo apoio financeiro com bolsa de estudos.

Aos meus amigos, especialmente à Larissa pelo companheirismo nestes anos.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	x
<b>RESUMO</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
1 <b>INTRODUÇÃO</b> .....	4
2 <b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	6
2.1 Neossolos.....	6
2.2 Propriedades físico-hídricas de solos sob plantio direto.....	10
2.3 Qualidade do solo.....	11
2.4 Compactação do solo.....	12
2.5 Textura e matéria orgânica do solo.....	15
2.6 Densidade do solo, densidade máxima e densidade relativa do solo.....	16
2.7 Umidade do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente.....	19
2.8 Porosidade total e distribuição do diâmetro dos poros.....	20
3 <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	22
3.1 Escolha dos locais de coleta.....	22
3.2 Localização e amostragem dos solos.....	22
3.3 Análise granulométrica.....	25
3.4 Matéria orgânica.....	25
3.5 Densidade do solo.....	25
3.6 Densidade máxima e densidade relativa do solo.....	26
3.7 Densidade dos sólidos do solo e porosidade total.....	27
3.8 Umidade do solo na capacidade de campo.....	27
3.9 Umidade do solo no ponto de murcha permanente.....	27
3.9.1 Calibração do psicrômetro.....	28
3.10 Distribuição do tamanho dos poros.....	30
3.11 Análise estatística.....	30
4 <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	31
4.1 Composição granulométrica.....	31
4.2 Densidade dos sólidos do solo.....	32
4.3 Densidade do solo.....	34
4.4 Densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação.....	38

4.5	Densidade relativa do solo .....	46
4.6	Porosidade total e distribuição do diâmetro dos poros .	48
4.7	Água disponível no solo .....	54
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	60
6	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
1 Localização, coordenadas geográficas e altitude de 18 solos sob plantio direto. Passo Fundo, 2015.....	24
2 Composição granulométrica e matéria orgânica (MO) de 18 solos coletados sob plantio direto no RS. Passo Fundo, 2015.....	32
3 Densidade dos sólido do solo de 18 solos coletados sob plantio direto no RS. Passo Fundo, 2015.....	33
4 Densidade do solo de 18 solos coletados sob plantio direto no RS. Passo Fundo, 2015.....	35
5 Umidade ótima de compactação, densidade máxima e equação obtidos através de ensaio de Proctor. Passo Fundo, 2015.....	39
6 Densidade do solo máxima obtida no ensaio de Proctor e estimada pelo teor de argila, densidade relativa obtida pela $D_{smáx}$ real e $e$ DR calculada pela $D_{smáx}$ estimada pelo teor de argila. Passo Fundo, 2015.....	47
7 Porosidade total, macro, micro e criptoporos de 18 solos coletados sob plantio direto . Passo Fundo, 2015. ....	49
8 Umidade volumétrica de 18 solos na capacidade de campo e ponto de murcha permanente e água disponível. Passo Fundo, 2015.....	55
9 Equações logarítmicas de ajustes da umidade gravimétrica em função do potencial de água do solo no WP4 e os respectivos coeficientes de determinação.....	58

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1 Distribuição dos Neossolos e suas associações no Estado do RS (Sturmer, (2008), adaptado de BRASIL, 1973 e Streck et al, 2008).....	7
2 Ocorrência dos neossolos no Brasil. Adaptado de Prado (2007).....	8
3 Teor de silte dos solos do RS mapeado por meio dos resultados das análises LAFAS – UPF.....	23
4 Curva de calibração do psicrômetro WP4 com solução de KCl a 20° C.....	29
5 Densidade dos sólidos do solo em função do teor de matéria orgânica.....	34
6 Densidade do solo em função do teor de matéria orgânica.....	36
7 Densidade do solo em função do teor de silte.....	37
8 Densidade do solo máxima em função do teor de matéria orgânica do solo.....	40
9 Densidade do solo máxima em função do teor de silte do solo.....	40
10 Densidade do solo máxima em função do teor de argila do solo.....	41
11 Densidade do solo máxima em função do teor de silte + argila do solo.....	41
12 Densidade do solo máxima em função do teor da densidade de sólidos do solo.....	42
13 Densidade do solo máxima em função do teor de silte e matéria orgânica.....	43
14 Densidade do solo máxima em função do teor de silte obtida pelo ensaio de Proctor e estimada pelo teor de argila.....	44
15 Umidade ótima de compactação em função do teor de matéria orgânica do solo.....	45
16 Densidade relativa do solo e estimada pelo teor de argila.....	48
17 Porosidade total em função da densidade do solo.....	51
18 Microporosidade em função da densidade do solo.....	53

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
19 Macroporosidade em função da densidade do solo.....	53
20 Criptoporosidade em função da densidade do solo....	54
21 Ponto de murcha permanente do solo em função do teor de silte.....	57
22 Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente em função do teor de silte.....	57
23 Umidade gravimétrica de 18 solos na capacidade de campo e umidade ótima de compactação.....	59

**LISTA DE SIGLAS**

Dsmáx: densidade do solo máxima

DS: densidade do solo

DSS: densidade dos sólidos do solo

DR: densidade relativa

MO: matéria orgânica

PT: porosidade Total

PMP: ponto de murcha permanente

CC: capacidade de campo

UOC: umidade ótima de compactação

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE SOLOS  
SILTISOS SOB PLANTIO**

**Djulia Taís Broch<sup>1</sup>**

**RESUMO** - A compactação é uma das causas de degradação física em solos agrícolas. Para mensuração do grau de compactação de um solo, somente sua análise de densidade (DS) é insuficiente. Isso é justificado em razão de que sua composição granulométrica e seu teor de matéria orgânica (MO) são muito variáveis. A densidade relativa (DR) do solo é um indicador que permite a identificação do grau de compactação e, por conseguinte, possibilita a comparação de solos e manejos. A DR é obtida pelo quociente entre a DS e a sua densidade máxima (Dsmáx). O objetivo do trabalho consiste em verificar a influência do silte nas propriedades físico-hídricas em Neossolos. Foram coletadas amostras com estrutura preservada e não preservada de 18 solos do Rio Grande do Sul, sob sistema plantio direto. Determinaram-se a composição granulométrica, o teor de MO, a DS, a Dsmáx, a DR, a umidade na capacidade de campo (CC) e, no ponto de murcha permanente (PMP), a porosidade e a distribuição do diâmetro dos poros. Os resultados mostraram que a Dsmáx decresceu com o acréscimo de silte e de MO e que a argila e a argila+silte não apresentaram efeito significativo. O teor de MO exerceu influência sobre a densidade dos sólidos do solo (DSS) e a umidade ótima de compactação (UOC). A DS diminuiu com o aumento de silte e MO. A DR não foi influenciada pela composição granulométrica e teor de MO, tendo havido diferença entre a DR determinada a partir da

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade de Passo Fundo.

Dsm<sub>max</sub> real e a calculada pela Dsm<sub>max</sub> estimada pelo teor de argila. O aumento da DS reduziu a porosidade total, macroporosidade e microporosidade e aumentou a criptoporosidade. O teor de silte afeta as propriedades físico-hídricas de solos siltosos de forma distinta do que o que se percebe em solos argilosos.

**Palavras-chave:** Ensaio de Proctor, silte, densidade relativa.

### **PHYSICAL AND HYDRO PROPERTIES OF SILTY SOIL UNDER NO TILLAGE**

**ABSTRACT** - Compression is one of the causes of physical degradation in agricultural soils. To measure the soil's compaction degree, only its density analysis (DS) is insufficient. This is explained on the grounds that its granulometric composition and its organic matter content (OM) are very variable. The soil relative density (RD) is an indicator that allows the compaction degree identification, and, therefore, enables comparison of soil and handlings. The DR is obtained by the ratio between the DS and its maximum density (DSMax). The objective is to verify the influence of silt on physical and hydraulic properties in Neossolos. Were collected samples with preserved and not preserved structure from 18 soil under no-tillage system of Rio Grande do Sul. It was determined the granulometric composition, MO content, DS, DSMax, DR, moisture in the field capacity (FC) and, in permanent wilting point (PWP), the porosity and pore diameter distribution. The results showed that DSMax reduced with the addition of silt and OM and that the clay and the clay+silt had no significant effect. The OM content influenced upon density of soil

solids (DSS) and upon the optimum moisture content (OMC). The PDS decreased with silt and OM increasing. PAIN was not influenced by granulometric composition and OM content, and there was noticed differences among the DR determined from the real DSMax and the DR calculated by Dmax estimated by the clay content. The increase in DS reduced the total porosity, macroporosity and the microporosity and increased cryptoporosity. The silt content affects the silty soil physical and hydraulic properties differently than what is perceived in clayey soils.

**Keywords:** Proctor test, silt, relative density.

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é componente fundamental do ecossistema terrestre, já que é o principal substrato utilizado pelas plantas para o seu desenvolvimento, fornecendo às raízes suporte, água, oxigênio e nutrientes. Por ser a base da produção agropecuária, seu manejo adequado é de vital importância. O uso inadequado tem proporcionado inúmeros problemas, dentre os quais a erosão e compactação do solo, que tem gerado perdas em produtividade e a necessidade de cada vez mais insumos.

A compactação é uma das maiores causas da degradação física de solos agrícolas, com consequências sobre o desenvolvimento das plantas. Ocorre devido ao não revolvimento do solo, tráfego intenso, máquinas e implementos cada vez maiores e mais pesados, pisoteio animal e práticas agrícolas sem considerar a umidade do solo no momento do tráfego. A compactação aumenta a DS, diminui a aeração, impede que as raízes explorem regiões mais profundas do solo, além de diminuir a infiltração de água, diminui a disponibilidade desta para as plantas e torna o solo mais vulnerável a erosão.

Certos tipos de solos são mais vulneráveis à compactação, fazendo-se necessário determinar o grau de compactação, identificando níveis críticos. Para mensuração do grau de compactação de um solo somente a análise da DS não é suficiente por ser muito afetada pela composição granulométrica e teor de MO. A densidade relativa do solo (DR) é um índice que permite a identificação da compactação e comparação entre diferentes solos e manejos, sendo obtida pela relação entre a DS e a sua densidade máxima ( $D_{smáx}$ ).

Marcolin & Klein (2011), determinaram uma função para  $D_{smáx}$ , baseada nos teores de MO e argila, concluindo que a densidade relativa do solo pode ser estimada através do uso da  $D_{smáx}$  estimada. Porém, tal função não se adequa para utilização em solos siltosos.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da composição granulométrica, sobre as propriedades físico-hídricas de solos sob plantio direto com elevado teor de silte. A hipótese que se formula é que o teor de silte tem efeito sobre as propriedades físico-hídricas de Neossolos.

Para verificar a hipótese, avaliaram-se a textura (teor de argila, silte e areia), teor de matéria orgânica, densidade do solo, densidade máxima e relativa do solo, distribuição do diâmetro dos poros, umidade do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente e, a partir desses, por meio de regressões avaliou-se o efeito das frações granulométricas sobre as propriedades destes solos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Neossolos

No RS aproximadamente 20% do território é constituído por Neossolos Litólicos e Regolíticos e suas associações (BRASIL, 1973) (Figura 1). São solos pouco pesquisados por serem considerados de baixo potencial, porém, nas últimas décadas, a pressão de uso agrícola e urbano vem justificando a demanda por conhecimentos mais específicos em relação à sua gênese, mineralogia, química, física e morfologia, a fim de se evitar a degradação das áreas exploradas (PEDRON et al., 2009). O conhecimento das diferenças físicas, químicas e mineralógicas dos Neossolos, é fundamental para o entendimento do comportamento desses solos quando submetidos ao uso agrícola (PEDRON et. al.,2012).

No Rio Grande do Sul ocorrem quatro classes de Neossolos: os Litólicos, os Regolíticos, os Flúvicos e os Quartzarênicos, que são distribuídos na paisagem conforme a situação do relevo local e material de origem (STRECK et al., 2008).

Os principais solos ocorrentes na Região Noroeste do RS são normalmente pouco profundos, com baixo a moderado teor de argila e alguns com elevado índice de pedregosidade (STRECK et al., 2008). Essas são características comuns de solos jovens, pouco intemperizados, como os Neossolos.

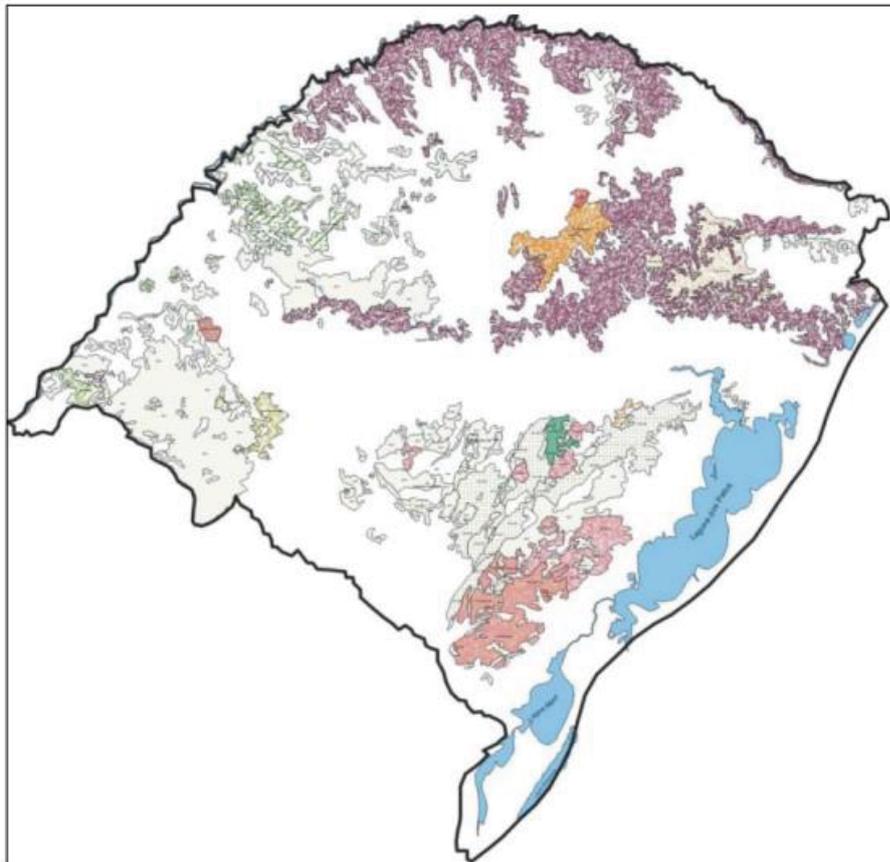


Figura 1. Distribuição dos Neossolos e suas associações no Estado do RS. (Fonte: STURMER, 2008, adaptado de BRASIL (1973) e de STRECK et al. (2008)).

Já no Brasil (Figura 2), cerca de 13% da área total é composta por Neossolos, um total de aproximadamente 1.122.603 km<sup>2</sup>. A ocorrência dos Neossolos regolíticos é maior, apresentando um total de 54% da área total de Neossolos. Em média, os Neossolos

Quartzarênico representam um total de 42%, já os Neossolos Litólicos e Flúvicos apresentam um valor de 2% (PRADO, 2007).

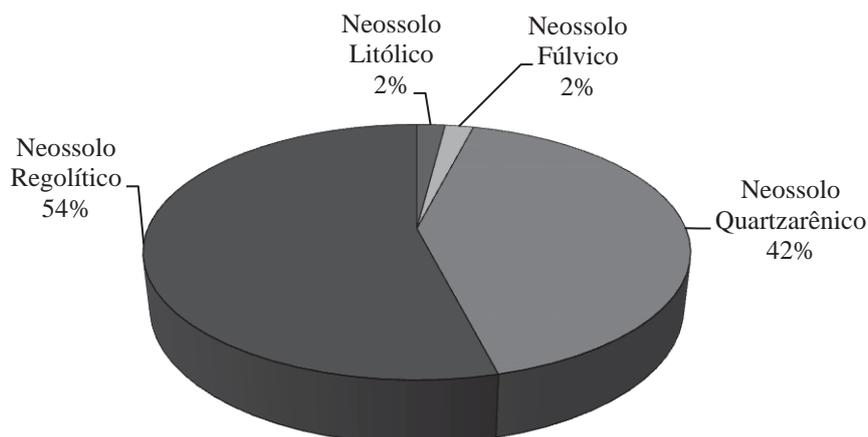


Figura 2. Ocorrência dos Neossolos no Brasil. Adaptado de Prado (2007).

Os Neossolos geralmente apresentam seqüência de horizontes A - C - R ou A - R, podendo apresentar horizonte B, mas sem requisitos para caracterizar qualquer horizonte B diagnóstico (EMBRAPA, 2013).

São solos rasos e ocorrem geralmente em áreas de declividade acentuada (encostas), sob relevo ondulado a montanhoso (8 a 75% de declividade). Enquanto os Neossolos Litólicos apresentam essa camada com até 50 cm de profundidade, os Neossolos Regolítico tendem a apresentar uma camada saprolítica com a rocha posicionada em profundidades variáveis, mas geralmente abaixo de 100 cm (PEDRON et al., 2011). A fragilidade das áreas com Neossolos Litólicos associada à falta de informações

detalhadas sobre as características responsáveis pelo comportamento dos solos, justificam esforços no sentido de se entender melhor essa classe de solos que, embora marginal, vem sendo cada vez mais utilizada (MEDEIROS et al., 2007).

Os Neossolos Regolíticos, devido a sua pequena profundidade efetiva, à grande pedregosidade e/ou rochiosidade e à presença de contato lítico próximo à superfície, são solos que possuem potencial de uso fortemente influenciado pelo grau de intemperismo e pela presença de camada saprolítica no perfil (PEDRON et al., 2009).

O aumento da pressão de uso das terras de encostas no RS e a carência de informações específicas sobre o comportamento dos Neossolos Regolíticos e Litólicos têm demandado pesquisas que são fundamentais para o uso e manejo adequado destes solos (PEDRON, 2007). Sendo assim, estes são os Neossolos abrangidos neste trabalho.

Pelo fato de os Neossolos serem pedogeneticamente pouco desenvolvidos, apresentam grandes variações nos seus atributos químicos e físicos (PEDRON, 2007). Stürmer et al. (2009), estudando infiltração de água em Neossolos, demonstrou que estes apresentaram grandes diferenças em seus atributos físicos e morfológicos, mesmo quando comparados os perfis de uma mesma área de coleta. Como os Neossolos são pedogeneticamente pouco desenvolvidos, é de se esperar que esse tipo de solo apresente grandes variações nos seus atributos químicos e físicos (PEDRON, 2007). Os Neossolos Regolíticos possuem teor de silte em geral elevado (STRECK, 2008).

Essas áreas, embora consideradas marginais do ponto de vista agrícola, devido ao baixo potencial de uso aparente, representam uma porção significativa do estado que vem sendo

explorada com atividades agrosilvipastoris, e mais recentemente, por empreendimentos turísticos e na expansão de áreas urbanas, as quais, muitas vezes, aceleram a degradação do ambiente, devido à falta de conhecimento da sua aptidão de uso (MEDEIROS et al., 2007).

Os Neossolos Litólicos ocorrem frequentemente associados com os Neossolos Regolíticos, diferenciando-se desses, de maneira geral, pela profundidade do contato lítico (EMBRAPA, 2013). Os Neossolos, considerados solos com baixo potencial de uso agrícola são, muitas vezes, principalmente em áreas pequenas associadas a agricultura familiar, utilizados com culturas anuais. Maiores estudos sobre essa classe de solos são fundamentais para a sua compreensão. Medeiros et al. (2007) verificaram que alguns Neossolos são de fato, solos com baixo potencial de uso, enquanto outros apresentam capacidade de suporte a diversas culturas, desde que manejados corretamente.

## **2.2 Propriedades físico-hídricas de solos sob plantio direto**

O sistema plantio direto (SPD) consiste de um sistema de manejo com mínimo revolvimento do solo, mantendo cobertura permanente do solo, com a prática de rotação de culturas, o que favorece o acúmulo de material orgânico pela menor taxa de decomposição e menores perdas por erosão. O não revolvimento e o acúmulo de matéria orgânica provocam alterações nos atributos físico-hídricos do solo (SILVA, 2011), que podem lhe ser benéficas.

Em áreas sob SPD, onde a mobilização é realizada somente na linha de plantio, são a atividade biológica e as propriedades físicas do solo que determinam o condicionamento do solo (DENARDIN, 2012), sendo o SPD capaz de reduzir em 75% às perdas de solo e em 20% as perdas de água, em relação às áreas onde há revolvimento do solo em sua totalidade (OLIVEIRA et al., 2002).

Muitas práticas inadequadas de manejo vem sendo adotadas em solos sob SPD, como incipiente rotação de culturas, insuficiente cobertura de solo, manejo inadequado do sistema integração lavoura-pecuária, uso de máquinas cada vez maiores, operações sem considerar a umidade adequada do solo, ausência de práticas mecânicas para manejo de enxurrada, abandono da semeadura em contorno, entre outros. Tais práticas ocasionam problemas como o aumento da DS e da resistência do solo à penetração, redução da porosidade e da taxa de infiltração de água no solo, deformação morfológica de raízes e concentração de raízes na camada superficial do solo, ocorrência de erosão, com arraste de nutrientes, fertilizantes e corretivos pela enxurrada e prematura expressão de déficit hídrico, por ocasião de déficit hídrico (DENARDIN, 2012).

### **2.3 Qualidade do solo**

Qualidade do solo é o conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas que lhe confere a capacidade de exercer as funções de sustentar a produtividade, manter ou melhorar a qualidade ambiental e contribuir para a sanidade das plantas, dos animais e dos homens (SANTANA, 2002).

A qualidade do solo é importante para manutenção da produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (IMHOFF et al., 2000). As plantas exigem uma boa estruturação do solo, que permite o desenvolvimento das raízes (RESENDE et al., 2002), podendo esta característica ser entendida como uma forma de avaliar a qualidade do solo.

A qualidade pode ser avaliada considerando a capacidade do solo em suprir nutrientes para as plantas, suportar o crescimento e desenvolvimento de raízes, proporcionar uma adequada atividade biológica, adequada estabilidade estrutural, resistir a erosão e reter água para as plantas, entre outros (CASALINHO et al., 2007). Está associada à infiltração, à retenção e disponibilização de água às plantas, à resposta ao manejo e resistência à degradação, permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas e permite o crescimento das raízes (REICHERT et al., 2003).

A deterioração da qualidade do solo tem sido amplamente estudada e debatida pela ciência do solo, devido principalmente, a retirada da cobertura vegetal e/ou uso intensivo da mecanização agrícola nas operações de preparo e cultivo do solo (ASSIS & LANÇAS, 2005).

## **2.4 Compactação do solo**

A compactação é uma das maiores causas da degradação de solos agrícolas, comprometendo a qualidade destes, com consequências negativas sobre o desenvolvimento das plantas. Certos tipos de solos são mais vulneráveis à compactação, fazendo-se

necessário determinar o grau de compactação, identificando níveis críticos (RICHART et al., 2005).

É caracterizada pela diminuição do volume de vazios ocupados pela água ou pelo ar, limitando a infiltração e a redistribuição de água no solo, reduzindo as trocas gasosas e a disponibilidade de oxigênio. Isto afeta o crescimento das raízes em busca de água e nutrientes e limita o crescimento radicular por impedimento mecânico, culminando com a redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas (VIEIRA, 2006). Por elevar a densidade e reduzir o volume de poros no solo, a compactação do solo acelera a erosão hídrica, por condicionar menor condutividade hidráulica, sobrando mais água em superfície (SHI et al., 2012).

A compactação pode ocorrer devido a processos pedogenéticos ou a operações mecanizadas realizadas sem considerar o teor de umidade do solo no ponto de friabilidade (RICHART et al., 2005). Pode ocorrer ainda devido ao tráfego dos animais, destacando-se como a maior causa da degradação dos solos sob pastagem (RIBON & TAVARES FILHO, 2004). Devido à elevada pressão exercida sobre o solo pelas patas dos animais, em função da elevada massa corporal aplicada em uma pequena área de contato (IMHOFF et al., 2000).

Por depender de vários fatores, como a variabilidade temporal e espacial da umidade do solo na zona do crescimento das raízes, o efeito da compactação na produção das culturas é difícil de ser quantificado (FREITAS, 1994). Isso ocorre porque uma maior umidade do solo diminui a resistência do mesmo a penetração das

raízes. Ou seja, em ausência de déficit hídrico os efeitos da compactação sobre a produtividade pode não ser observado.

A compactação do solo geralmente reduz a quantidade de água disponível para as plantas, pois provoca a redução dos macro e dos microporos, levando à diminuição da PT, o que dificulta o aproveitamento de água pelas raízes (BRADY & WEIL, 2008).

A utilização de diferentes sistemas de manejo, como o SPD, proporciona principalmente alterações na estrutura do solo podendo formar camadas compactadas (LIMA et al., 2013). A adoção de sistemas de manejo conservacionista, como o plantio direto, visa preservar a qualidade do solo e do ambiente, juntamente com a obtenção de elevadas produtividades das culturas de interesse econômico (CARVALHO et al., 2004). No entanto, Stone et al. (2002) relataram em várias situações a ocorrência do aumento da DS e diminuição da macroporosidade em SPD, o que tem sido diagnosticado como compactação, ou seja, quando o solo recebe pressões que excedem a sua capacidade de suporte de carga.

Em pesquisas realizadas na região do planalto do Rio Grande do Sul (RS), Amado et al.(2005) concluíram que a compactação é um dos fatores mais limitantes nas lavouras conduzidas no SPD nesta região.

Diversos trabalhos indicam aumento da compactação dos solos submetidos a SPD (TORMENA et al., 1998; SECCO, 2003; SILVA, 2003). Klein & Boller (1995) encontraram, na camada superficial, DS maior no solo manejado com SPD em relação ao sistema convencional. Bertol et al. (2004) concluíram que na camada de 0-0,10 m a densidade do solo é maior e o volume de macroporos é

menor no SPD do que no preparo convencional e no campo nativo. Bilibio et al. (2010), avaliando atributos físicos do solo em diferentes sistemas de manejo, concluíram que o uso intensivo do solo promove compactação subsuperficial, com redução da relação macro/microporos, acompanhada pelo aumento da DS.

## **2.5 Textura e matéria orgânica do solo**

A textura de um solo corresponde a distribuição relativa das partículas minerais do solo, conforme seu tamanho, denominadas de areia, de silte e de argila (KLEIN, 2014).

As partículas minerais do solo apresentam propriedades e comportamentos bastante distintos. A fração areia é maior e permite maior permeabilidade à água e ao ar no solo, retendo menos água por ser menos coesiva, tendo ausência de cargas elétricas. Partículas de silte, por sua vez, possuem poros menores e mais numerosos, retendo mais água e tem menor taxa de drenagem do que areia, por apresentar maior área superficial específica do que a areia, e assim menor macroporosidade e maior microposidade. A argila, em função do reduzido diâmetro, apresenta grande área superficial específica, com grande presença de cargas elétricas, o que acarreta elevada retenção de água (BRADY & WEIL, 2008).

As partículas do solo classificadas como silte são aquelas que apresentam diâmetro entre 0,002 mm e 0,05 mm, apresentando sensação de sedosidade ao tato. Os poros entre partículas de silte são menores, e mais numerosos que os entre partículas de areia, deste

modo, o silte retém mais água e permite uma menor drenagem (BRADY & WEIL, 2008).

O teor de MO é um dos fatores responsáveis pela manutenção das condições físicas do solo e também influencia a vulnerabilidade dos solos à compactação (DIAS JUNIOR, 2000). A principal propriedade física do solo afetada pela MO é a agregação do solo e, através desta, são afetadas a DS, a PT, a aeração, a capacidade de retenção e a infiltração de água, entre outras (BAYER & MIELNICZUK, 2008).

Solos com maior conteúdo de argila têm maior poder de conservação e estabilização da MO, o que ocorre devido a argila proteger a MO diminuindo sua decomposição, não se tendo maiores informações de tal propriedade em solos com maior teor de silte. Uma das formas de se incrementar a qualidade estrutural do solo é por meio da conservação e adição de material orgânico no solo (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012). A MO pode reduzir a DS, elevar o volume de poros, favorecendo a infiltração e aeração para desenvolvimento das plantas (CUNHA et al., 2011), tornando-o assim menos suscetível à compactação.

## **2.6 Densidade do solo, densidade máxima e densidade relativa do solo**

A DS é uma propriedade muito utilizada para caracterizar fisicamente a estrutura do solo, constituindo um indicador de sua compactação (ASSIS & LANÇAS, 2005).

Os solos apresentam variações de  $D_s$  de acordo com suas características mineralógicas, de textura e de teor de matéria orgânica (BRADY & WEIL, 2008). Solos arenosos apresentam  $D_s$  do solo superior aos argilosos enquanto que solos siltosos apresentam  $D_s$  intermediária (LIBARDI, 2005). Conforme Klein (2014), a densidade dos solos agrícolas pode variar de 0,9 a 1,8 g cm<sup>-3</sup>, e é influenciada fortemente pela textura e teor de MO. Solos arenosos apresentam  $D_s$  elevada, diferente dos solos argilosos onde que sua  $D_s$  vai ser menor. Isto porque os solos argilosos apresentam agregação das partículas de argila, da qual resulta a porosidade intra-agregados, que aumenta o volume do espaço poroso, principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido (BRADY & WEIL, 2008).

Por ser uma característica variável no tempo, espaço e profundidade, o uso de seus valores como indicativo de problemas físicos é questionável. Neste sentido, em 1933, Ralf Proctor publicou uma série de artigos nos quais pela primeira vez se enuncia um dos mais importantes princípios da mecânica dos solos, o de que a compactação do solo é dependente da energia aplicada e da umidade do solo no momento da compactação (VARGAS, 1977). Desses estudos surgiu o ensaio de Proctor normal que é uma metodologia usual (FIGUEIREDO et al., 2000), que consiste em compactar amostras de solo com diferentes umidades a fim de se obter uma relação entre  $D_s$  e  $U_g$ . Com a equação da curva de compactação do ensaio de Proctor normal é possível obter matematicamente a  $D_{s\text{máx}}$ , e a UOC. Por ser muito trabalhoso e necessita de grande quantidade de solo para determinação da curva de compactação, o que dificulta

sua realização. O uso equações de pedotranferência podem ser uma ferramenta útil para facilitar a determinação de tais propriedades.

Em função disto, somente a DS não fornece informações suficientes para se quantificar o grau de compactação de um solo agrícola. Visando normalizar os limites de Ds, em função da textura e outras propriedades do solo, tem sido utilizado o conceito de densidade relativa do solo (DR) ou grau de compactação (BEUTLER et al., 2005) que é a relação da Ds com sua  $D_{smáx}$  obtida pelo ensaio de Proctor normal (KLEIN, 2006) . O estudo da DR do solo surgiu da necessidade de se encontrar um indicador para caracterizar o estado de compactação do solo que independesse de sua composição granulométrica e teor de MO.

O aumento dos teores de argila e de MO reduz a densidade e a  $D_{smáx}$  e aumenta a UOC (MARCOLIN & KLEIN, 2011) pelo fato da argila e a MO reterem mais água do que as frações silte e areia (SILVA et al., 1986), e ainda pela baixa densidade específica da MO.

Marcolin & Klein (2011), determinaram uma função para  $D_{smáx}$ , baseada nos teores de MO e argila, concluindo que a DR pode ser estimada através do uso da  $D_{smáx}$  estimada. Porém tal função foi construída basicamente para latossolos, encontrando dificuldade para utilização em solos siltosos, como os Neossolos, por subestimar sua  $D_{smáx}$ .

## **2.7 Umidade do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente**

Pelo conceito tradicional, a água no solo disponível às plantas encontra-se entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A CC é a água retida pelo solo depois que o excesso tenha drenado. Já o PMP é o teor de água de um solo no qual as plantas atingem um murchamento irrecuperável, sendo esse o teor mínimo de água disponível no solo para o desenvolvimento das plantas (VIEHMEYER & HENDRICKSON, 1949).

Quando o solo se encontra na CC, os macroporos estão livres de água e os microporos cheios. Os macroporos são esvaziados no potencial matricial de  $-0,006$  MPa, e este pode ser utilizado para estimar a CC. O PMP é uma grandeza física de um solo, estimada pelo teor de água retida no potencial matricial de aproximadamente  $-1,5$  MPa (ROMANO & SANTINI, 2002).

A determinação do PMP é complexa e seu valor é estimado como uma referência, já que o murchamento das plantas ocorre antes que a tensão da água no solo atinja o PMP, no entanto a atividade fisiológica só para após atingir esse ponto, podendo variar conforme a espécie de planta em questão (JONG VAN LIER, 2000).

Para determinação do PMP podem ser utilizadas câmaras de Richards, ou o psicrômetro, sendo o modelo WP4-T o mais usado. O princípio da determinação do potencial da água na amostra de solo é obtido pelo somatório de potencial mátrico e osmótico (SCANLON et al., 2002). O potencial da água em uma amostra sólida ou líquida pode ser obtido relacionando-se o potencial de água da amostra com a

pressão do vapor do ar em equilíbrio com a amostra. A pressão de vapor do ar pode ser medida utilizando-se um espelho resfriado, e a saturação da pressão de vapor em dada temperatura pode ser determinada por meio de um sensor ótico (DECAGON, 2010). Este método de determinação é utilizado para determinar o potencial de água pelo WP4-T, que permite uma adequada estimativa do PMP e disponibilidade hídrica às plantas (KLEIN et. al., 2006).

## **2.8 Porosidade total e distribuição do diâmetro dos poros**

O espaço do solo não ocupado por sólidos e ocupado pela água e ar compõem o espaço poroso, definido como sendo a proporção entre o volume de poros e o volume total de um solo, estando sempre em torno de 50% (KLEIN, 2014), é o local onde circulam a solução água e nutrientes e o ar, é o espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e solução do solo (HILLEL, 1970).

Uma rede ideal de poros, com variação de diâmetros, influi na produtividade das culturas, interferindo nas relações entre drenagem, teor de água disponível para as plantas, absorção de nutrientes, penetração de raízes, aeração e temperatura (REZENDE et al., 1997). Nesta variação de diâmetros encontramos os macroporos, os microporos e os criptoporos.

Os macroporos são considerados os poros maiores que 0,05 mm, microporos os poros entre 0,05 e 0,0002 mm e criptoporos, poros menores que 0,0002 mm, sendo o volume de criptoporos é igual ao volume de água retida no PMP (KLEIN, 2014). Neste contexto, os macroporos são responsáveis principalmente pela aeração, enquanto

os microporos são responsáveis pela retenção de água no solo. Já criptoporos são poros em que a água fica retida fortemente, indisponível às plantas, já que seu potencial mátrico se encontra abaixo do PMP (-1500 kPa) (KLEIN, 1998).

Para que ocorra desenvolvimento adequado das plantas no solo, Erickson (1982) concluiu que para a maioria das culturas o valor mínimo porosidade de aeração deve ser ao redor de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Pedron et. al. (2011), estudando Neossolos, encontraram valores de macroporosidade semelhantes aos encontrados por Streck et al. (2004) e Lima et al. (2006) em Argissolo com textura franco-arenosa. Contudo, os valores de microporosidade obtidos por esses autores foram, em geral, inferiores ao valor mínimo encontrado para os Neossolos (33%).

Em SPD é comum ocorrer um maior número de microporos no solo, devido a maior estado de compactação (SCHERPINSKI, 2003). Para Marques (2004) o volume maior de microporos está diretamente relacionado com a capacidade de retenção da água no solo. No SPD a microporosidade é mais uniforme que no plantio convencional o que proporciona um maior armazenamento de água para a planta (GUIMARÃES, 2000). O aumento da microporosidade favorece a retenção de água no solo (REICHERT et al., 2007), ao mesmo tempo em que compromete o transporte de ar e água e o desenvolvimento radicular (TORMENA et al., 1998).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Escolha dos locais de coleta**

Os locais para coleta das amostras de solos foram definidos a partir das análises granulométricas realizadas no Laboratório de Física e Água do Solo da UPF (LAFAS).

Foram identificados dentre cerca de 38400 análises realizadas nos últimos anos, os municípios com maior frequência de amostras com alto teor de silte, mapeados (Figura 3) e então realizadas coletas nestas localidades dos respectivos municípios.

#### **3.2 Localização e amostragem dos solos**

Amostras de dezoito solos, sob SPD, foram coletadas, no Estado do Rio Grande do Sul (Tabela 1). Buscou-se solos com elevados teores de silte, classificados como Neossolos (STRECK, 2008). Foram coletadas amostras com estrutura preservada, com 5 (cinco) repetições (cilindros) em cada solo, descartou-se a camada mais superficial do solo (1 a 2 cm) e coletou-se logo abaixo desta, e cerca de 15 kg de solo com estrutura não preservada com profundidade de coleta entre 0-10 cm.

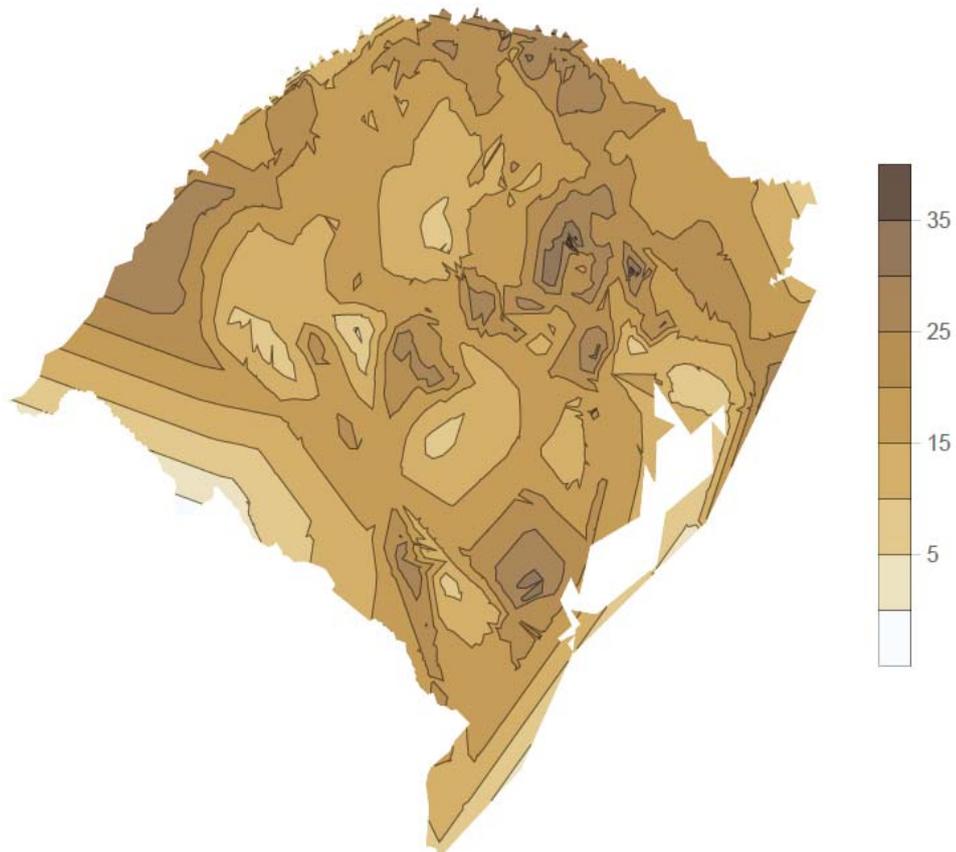


Figura 3. Teor de silte dos solos do RS mapeado por meio dos resultados das análises LAFAS – UPF.

Tabela1. Localização dos 18 solos amostrados sob Sistema plantio direto. Passo Fundo, 2015

Solo	Município (RS)	Coordenadas geográficas	Altitude (m)
1	Rondinha	S 27° 49'04,7'' O 52° 51'18,4''	540
2	Rondinha	S 27° 52'19,5'' O 52° 54'53,1''	532
3	Sarandi	S 27° 57'19,5'' O 52° 56'57,1''	532
4	Sarandi	S 27° 57'43,8'' O 52° 56'56,9''	518
5	Sarandi	S 27° 57'53,6'' O 52° 56'57,0''	479
6	Sarandi	S 27° 58'43,0'' O 52° 56'31,4''	509
7	Marau	S 28° 20'27,68'' O 52°18'00,98''	650
8	Alto Alegre	S 28° 49'11,44'' O 53°00'39,46''	402
9	Alto Alegre	S 28° 49'16,49'' O 53°00'43,81''	430
10	Alto Alegre	S 28° 49'59,40'' O 52°59'23,99''	483
11	Alto Alegre	S 28° 49'52,70'' O 52°59'30,04''	507
12	Alto Alegre	S 28° 49'42,28'' O 52°58'09,86''	428
13	David Canabarro	S 28° 22'47,69'' O 52°50'30,61''	793
14	Arvorezinha	S 28° 51'40,14'' O 52°07'34,54''	730
15	Arvorezinha	S 28° 51'17,51'' O 52°08'36,60''	753
16	Arvorezinha	S 28° 51'11,29'' O 52°08'25,65''	760
17	Arvorezinha	S 28° 54'19,86'' O 52°05'14,08''	728
18	Arvorezinha	S 28° 53'33,81'' O 52°07'45,66''	680

### **3.3 Análise granulométrica**

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, proposto por Embrapa (1997). Para determinação, utilizou-se 40 g de solo seco em estufa 105 °C e passado na peneira com malha de 2 mm. Após foi adicionado 100 mL de solução Calgon ( $\text{Na}_2\text{PO}_6 + \text{NaOH}$ ) e 250 mL de água, em um vidro de 600 mL, com posterior agitação mecânica recíproca por 15 horas. Após dispersão das partículas do solo, a suspensão foi passada em peneira de 0,053mm para reter toda areia, sendo as provetas preenchidas até 1 litro. Após agitação manual foram realizadas duas pipetagens de 25 mL (RUIZ, 2005), a primeira para determinação da fração de silte + argila, imediatamente após a agitação, e a segunda em tempo observado conforme a temperatura da suspensão para determinação da fração silte (KLEIN, 2014).

### **3.4 Matéria orgânica**

O teor de matéria orgânica do solo foi determinado seguindo o método WalkleyBlack, descrito por Tedesco et al. (1995).

### **3.5 Densidade do solo**

As amostras de solo com estrutura preservada foram retiradas com auxílio de um extrator acoplado a cilindros volumétricos de aço inoxidável com aproximadamente 100 cm<sup>3</sup> (5 cm de diâmetro

por 5 cm de altura). Os cilindros foram retirados do extrator, sendo ajustado o volume do solo ao volume do cilindro.

A densidade foi determinada pelo quociente da massa seca do solo pelo volume do cilindro. Para isso, os cilindros foram colocados em estufa 105° C até massa constante (em torno de 24 horas) e, posteriormente, pesados para obter o valor da massa seca do solo. (EMBRAPA, 1997).

### **3.6 Densidade máxima e densidade relativa do solo**

A densidade do solo máxima para cada solo foi determinada a partir do ensaio de Proctor normal, com 560 kPa de energia aplicada (NOGUEIRA, 1998). Esse ensaio consiste em compactar amostras de solo com diferentes umidades, passado em peneira com malha de 4,8 mm, em três camadas de aproximadamente 4 cm de espessura num cilindro de 1.000 cm<sup>3</sup>, utilizando um soquete com massa de 2,5 kg, que desce de uma altura de queda de 30 cm, sendo aplicados 26 golpes por camada. A partir dos dados obtidos, ajustou-se uma equação polinomial de 2º grau para os dados de DS em função do teor de água do solo, para cada um dos solos coletados, onde a primeira derivada da função permite estimar a UOC e a segunda, a  $D_{smáx}$  (KLEIN, 2014).

A densidade relativa foi obtida pelo quociente entre a DS no campo e a  $D_{smáx}$ .

### 3.7 Densidade dos sólidos do solo e porosidade total

A densidade de sólidos do solo foi determinada para cada solo pela metodologia do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

A porosidade total foi determinada pela equação:

$$PT = 1 - \frac{DS}{DSS}$$

Em que: PT é porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ ), DS é densidade do solo ( $kg m^{-3}$ ), e DSS é densidade dos sólidos do solo ( $kg m^{-3}$ ).

### 3.8 Umidade do solo na capacidade de campo

A umidade do solo na capacidade de campo foi obtida colocando-se os cilindros com solo saturado em funis de Haines no potencial de -6 kPa. Após obter umidade constante, os cilindros foram pesados e levados a estufa a 105° C, calculando-se a umidade gravimétrica neste ponto, que multiplicada pela densidade do solo gera a umidade volumétrica do solo na capacidade de campo.

### 3.9 Umidade do solo no ponto de murcha permanente

Para determinação do ponto de murcha permanente utilizou-se o psicrômetro modelo WP4-T, marca Decagon® Devices®. Cerca de três gramas de terra fina seca ao ar, peneiradas a 2 mm, foram colocados em cápsulas de aço inox. Dentro da cápsula, o solo foi umedecido com cerca de 1 mL de água e, em seguida, fechados com uma tampa de plástico, que permaneceram por 24 h para que ocorresse a perfeita redistribuição da água em toda a amostra (KLEIN, 2014).

Para determinação, a umidade na câmara do WP4-T entrou em equilíbrio com o potencial da água no solo, sendo este calculado com base na temperatura do solo e do ar, no ponto de orvalho (SCALON et al., 2002). Após as medições as cápsulas foram levadas a estufa a 105 °C para determinação da massa de solo seco. Os pontos obtidos em diferentes potenciais foram plotados em um gráfico, e por meio da equação, ajusta-se o teor de água no solo para o potencial de -1,5 MPa (KLEIN et al., 2006).

### **3.9.1 Calibração do psicrômetro**

Para uma melhor precisão nas leituras do psicrômetro WP4-T, é recomendada pelo fabricante a verificação e calibração do mesmo. Isto é feito utilizando de uma solução de potencial de água conhecido, permitindo que se ajuste possíveis desvios nas leituras. Pode-se ajustar e calibrar o psicrômetro com qualquer solução com potencial conhecido. Neste trabalho usou-se solução de cloreto de potássio (KCl), recomendado pelo fabricante.

Para que as leituras sejam corretas é necessário que o aparelho esteja instalado sobre uma superfície nivelada e com temperatura o mais estável possível e deve permanecer ligado um período de aquecimento de 15 a 30 minutos antes de iniciar as leituras. O aparelho permite que se ajuste a temperatura interna para o mais próximo a temperatura das amostras. A temperatura das amostras deve ser inferior a do aparelho, o ideal é cerca de 1°C inferior.

Para curva de calibração, foram utilizadas as concentrações de 0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80;

0,90 e 1 molar de KCl. Os potenciais de água que foram atingidos com estas concentrações encontram-se na Figura 3, seus valores padrão estão no manual do WP4 (Figura 4) (DECAGON, 2010), para leituras feitas a 20 °C.

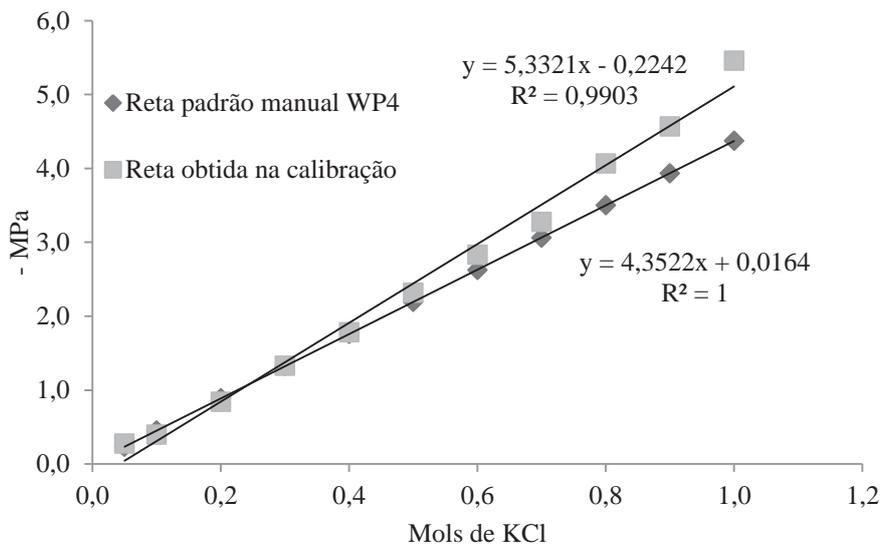


Figura 4. Curva de calibração do psicrômetro WP4 com solução de KCl a 20° C.

Esta calibração permite aferir o aparelho e ajustá-lo caso esteja fora do padrão. Isto é feito pressionando-se o botão superior direito no menu de configuração do sistema para entrar no menu de calibração. A leitura deve estar dentro de  $\pm 0,05$  MPa da leitura correta do padrão de KCl a essa temperatura. Se as leituras continuarem erradas para a solução padrão, pode ser necessária uma limpeza interna do aparelho.

É recomendado que antes do início das leituras do dia, se faça uma verificação com o padrão de 0,5 molar de KCl, para melhor precisão dos valores obtidos.

### **3.10 Distribuição do tamanho dos poros**

Realizou-se a determinação da distribuição do diâmetro dos poros em macroporos, microporos e criptoporos. Foram considerados macroporos, poros maiores que 0,05 mm (volume total de poros menos volume de água na capacidade de campo), microporos, poros entre 0,05 e 0,0002 mm (volume de água na capacidade de campo menos o ponto de murcha permanente) e criptoporos, poros menores que 0,0002 mm, sendo o volume de criptoporos igual ao volume de água retida no ponto de murcha permanente (KLEIN, 2014).

### **3.11 Análise estatística**

Para se avaliar a contribuição da textura do solo e da matéria orgânica na densidade de solo máxima, realizaram-se ajustes dos resultados por meio de regressões lineares múltiplas e análise de significância pelo teste F, com uso do software Sigma Plot.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Composição granulométrica

Os solos coletados apresentaram distintas composições granulométricas e teores de matéria orgânica (MO) (Tabela 2). Os teores de silte apresentaram amplitude de 175 e 532 g kg<sup>-1</sup>. Já os teores de MO encontrados demonstraram a amplitude de 17 a 51 g kg<sup>-1</sup>. Tal amplitude entre os teores de MO se deve ao fato de as amostras provirem de diferentes locais, todos sob SPD, porém manejos diferentes, com altitudes, clima e teores de argila diferentes.

A maioria dos solos apresentou teor de silte maior do que o teor de argila, com exceção dos solos 6, 7, 9 e 17, que apresentaram teor de argila maior que o de silte.

A relação silte/argila serve como base para avaliar o grau de intemperismo dos solos, principalmente para solos de textura franco arenosa ou mais fina. Valores inferiores a 0,7 em solos de textura média ou inferior a 0,6 em solos de textura argilosa ou muito argilosa indicam um alto grau de intemperismo (EMBRAPA, 2013). Os valores da relação silte/argila apresentados na Tabela 2, demonstram que a maioria dos solos indicaram ter sofrido um baixo grau de intemperismo, possuindo valores de silte superiores aos de argila. Valores semelhantes foram encontrados por Pedron (2007) para Neossolos Regolíticos no RS, os quais por serem solos mais jovens sofreram menor grau de imperismo. Já os solos 7, 9 e 17 apresentaram baixa relação silte/argila, abaixo de 0,58, o que pode indicar que estes são solos mais intemperizados que os demais, característico de

Latossolos, que apresentam baixo conteúdo de silte em relação à argila (KER, 1997), por apresentarem maior teor de argila.

Tabela 2. Composição granulométrica, matéria orgânica (MO) e classe textural de 18 solos coletados sob plantio direto no RS. Passo Fundo, 2015

Solo	Argila	Silte	Areia	Relação Silte/Arg	MO	Classe textural
1	248,12	316,36	435,39	1,28	17,67	Franca
2	191,94	326,41	481,47	1,70	17,00	Franca
3	238,28	372,58	388,57	1,56	17,67	Franca
4	224,45	308,43	466,55	1,37	18,67	Franca
5	310,18	356,29	333,52	1,15	24,17	Franco argilosa
6	465,54	354,48	179,83	0,76	32,50	Argila
7	539,20	175,62	284,86	0,33	33,17	Argila
8	349,54	380,96	269,41	1,09	27,50	Franco argilosa
9	443,03	255,35	300,88	0,58	32,17	Argila
10	238,91	506,60	253,58	2,12	23,50	Franco siltosa
11	244,87	441,99	312,89	1,81	43,00	Franca
12	250,62	377,24	371,98	1,51	51,00	Franca
13	211,41	396,13	392,09	1,87	26,83	Franca
14	374,67	532,51	92,62	1,42	36,33	Franco argilosiltosa
15	321,49	483,26	195,03	1,50	35,00	Franco argilosiltosa
16	319,42	449,42	228,59	1,41	42,00	Franco argilosa
17	503,23	292,47	204,22	0,58	30,00	Argila
18	421,84	474,84	103,10	1,13	39,83	Argilosiltosa

#### 4.2 Densidade dos sólidos do solo

Os solos apresentaram diferenças quanto à densidade dos sólidos do solo (DSS) (Tabela 3). Os valores de DSS nestes solos variou entre 2,52 e 3,01 Mg m<sup>-3</sup>. A DSS de parte dos solos estudados foi

elevada, o que pode ser explicada pelo material de origem dos solos e pelo baixo aporte de MO nestes.

Os resultados apontam que o teor de MO foi o fator que exerceu maior influência sobre a variação nos valores encontrada, sendo que os valores de DSS decresceram em função do teor de MO dos solos (Figura 5), o que ocorreu devido à baixa densidade da MO em relação a outros constituintes sólidos do solo, sua densidade específica é de 0,9 a 1,3 g cm<sup>-3</sup> (REINERT & REICHERT, 2006).

Tabela 3. Densidade dos sólidos do solo (DSS) de 18 solos coletados sob plantio direto no RS. Passo Fundo, 2015

Solo	DSS* Mg m <sup>-3</sup>
1	3,01
2	2,94
3	2,84
4	2,91
5	2,98
6	2,90
7	2,63
8	2,52
9	2,62
10	2,65
11	2,59
12	2,55
13	2,82
14	2,64
15	2,59
16	2,53
17	2,55
18	2,58

\*Média de três repetições

Solos com alto teor de MO têm DSS menor que  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ , (FAGUERIA & STONE, 2006), valor considerado a média de densidade dos principais constituintes do solo (quartzo, feldspatos, silicatos) (KIEHL, 1979).

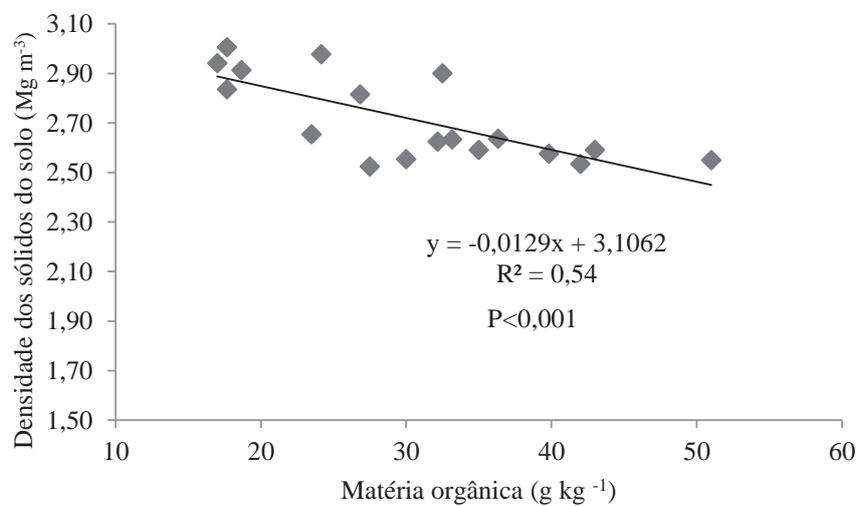


Figura 5. Densidade dos sólidos do solo em função do teor de matéria orgânica.

### 4.3 Densidade do solo

Os valores obtidos de DS variaram entre  $1,09$  a  $1,46 \text{ g cm}^{-3}$  (Tabela 4). Comparando com os valores clássicos de DS para solos arenosos, estes se situam entre  $1,2$  e  $1,8 \text{ g cm}^{-3}$  e, para argilosos, de  $1,0$  a  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  (STURMER, 2008), os valores encontrados são intermediários.

Tabela 4. Densidade do solo (DS) para os 18 locais coletados sob SPD no RS. Passo Fundo, 2015.

Solo	DS *
	g cm <sup>-3</sup>
1	1,342
2	1,362
3	1,392
4	1,301
5	1,381
6	1,327
7	1,459
8	1,092
9	1,264
10	1,049
11	1,147
12	1,181
13	1,178
14	1,387
15	1,298
16	1,203
17	1,248
18	1,192

\*Média de cinco repetições.

Observou-se uma tendência de redução da DS com o aumento no teor de MO no solo (Figura 6), cujo efeito pode ser atribuído à estabilidade estrutural do solo (ARAGÓN et al., 2000). A DS foi afetada ainda pelo teor de silte destes solos (Figura 7), havendo redução da DS com o incremento do teor de silte, sendo essa redução explicada por apenas 41% da DS é explicado pelo teor de silte, e o restante por outros fatores. Tal redução pode ser explicada pelo fato de

a densidade do solo ser afetada naturalmente pela textura e teor de matéria orgânica e antropicamente pelos sistemas de manejo e pelo grau de compactação atingido. Assim, solos compactados caracterizam-se pelo aumento da DS e redução principalmente dos macroporos (TORMENA et al., 1998).

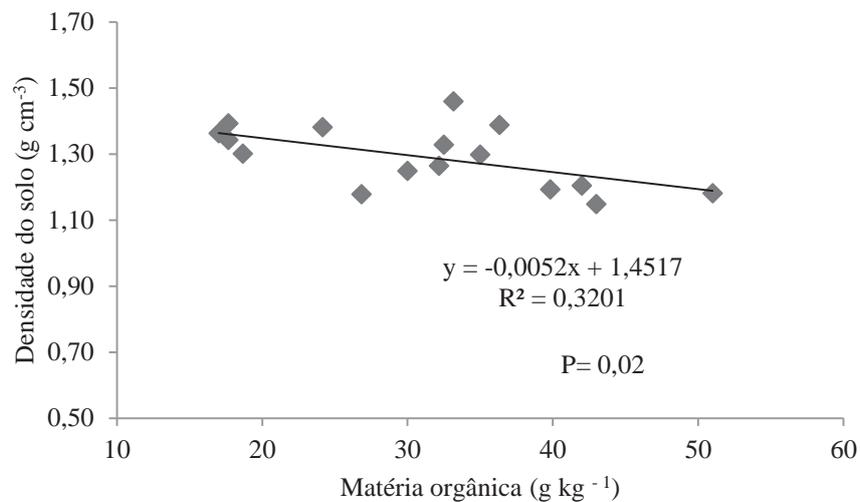


Figura 6. Densidade do solo em função do teor de matéria orgânica.

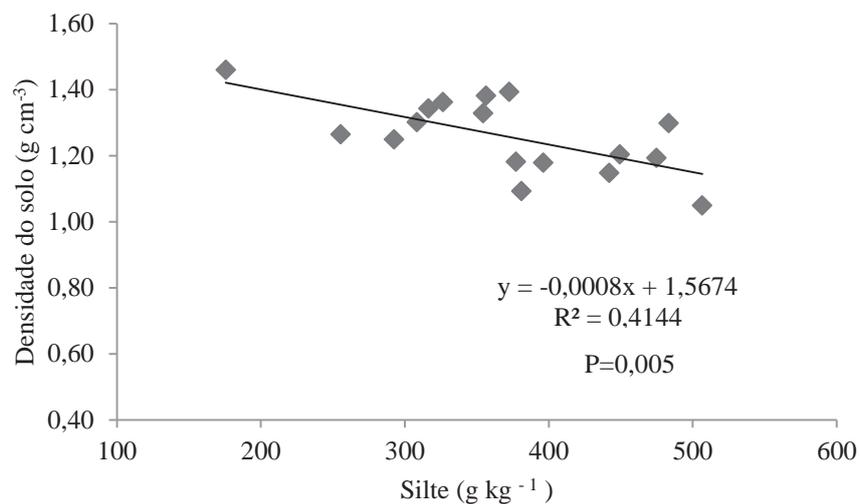


Figura 7. Densidade do solo em função do teor de silte.

Reinert et al. (2001) estabeleceram valores críticos de DS como sendo de  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$  para solos com horizonte de textura argilosa,  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$  para solos com horizonte de textura média e de  $1,65 \text{ g cm}^{-3}$  para solos com textura arenosa (menos de 20% de argila). Argenton et al. (2005) constataram que, em Latossolo Vermelho argiloso, os quais possuem entre 350 e  $600 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, a deficiência de aeração inicia-se com DS próxima de  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ , e Klein (2006), para mesma classe de solo, observou que a densidade limitante foi de  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ . Reichert et al. (2003) propuseram densidade do solo crítica para algumas classes texturais: 1,30 a  $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$  para solos argilosos, 1,40 a  $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$  para os franco-argilosos e de 1,70 a  $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$  para os franco-arenosos.

Os solos analisados no presente estudo apresentaram valores todos abaixo de  $1,459 \text{ g cm}^{-3}$ , sendo este da classe textural, os valores encontrados foram inferiores a valores críticos citados na literatura. Em contraponto a Pedron et al. (2011), que estudando Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos encontraram características físico-hídricas atípicas, com DS elevada.

Maiores valores de DS no SPD podem ser decorrentes da ausência de revolvimento do solo, que associado ao intenso tráfego de máquinas em condições de umidade do solo inadequadas ocasionam maior compactação, ou ainda da quantidade de resíduos culturais ainda não suficientes para aumentar os estoques de MO que possibilitem, gradativamente, a diminuição da densidade (ASSIS & LANÇAS, 2005).

Os solos apresentam variações de DS de acordo com suas características mineralógicas, de textura e de teor de matéria orgânica. Essa variação DS, dificulta a sua utilização para quantificar o grau de compactação do solo (BRADY & WEIL, 2008).

#### **4.4 Densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação**

As equações polinomiais de segundo grau do ajuste dos pares da DS em função da umidade gravimétrica obtidas de dados do ensaio de proctor (Tabela 5) apresentaram coeficientes de determinação acima de 0,77, mostrando ajuste satisfatório

A elevação dos teores de MO (Figura 8) e de silte (Figura 9), causaram redução nos valores de  $D_{smáx}$ , enquanto que a argila (Figura 10) e a argila+silte (Figura 11), não apresentaram efeito significativo sobre a  $D_{smáx}$ . Diferentemente do trabalho de Marcolin & Klein (2011) que, trabalhando com Latossolos, observaram que a elevação dos teores de argila e de matéria orgânica reduziram a  $D_{smáx}$  e aumentaram a umidade ótima de compactação, fato atribuído a argila e a MO reterem mais água do que as frações silte e areia (SILVA et al., 1986). Além destes fatores (MO e silte) a  $D_{smáx}$  foi afetada ainda pela DSS (figura 12), no qual constatou-se a elevação dos valores de  $D_{smáx}$  com o aumento da DSS.

Tabela 5. Umidade ótima de compactação, densidade máxima e equação obtidos através de ensaio de Proctor. Passo Fundo, 2015

Solo	UOC g g <sup>-1</sup>	D Máx g cm <sup>-3</sup>	Equação	R <sup>2</sup>
1	0,235	1,622	$y = -23,139x^2 + 10,879x + 0,343$	0,77
2	0,218	1,673	$y = -39,438x^2 + 17,224x - 0,207$	0,97
3	0,293	1,424	$y = -16,582x^2 + 9,730x - 0,003$	0,96
4	0,270	1,474	$y = -17,986x^2 + 9,718x + 0,162$	0,97
5	0,257	1,594	$y = -40,975x^2 + 21,074x - 1,116$	0,97
6	0,274	1,549	$y = -35,875x^2 + 19,639x - 1,139$	0,91
7	0,256	1,477	$y = -21,868x^2 + 11,188x + 0,046$	0,99
8	0,328	1,334	$y = -20,269x^2 + 13,311x - 0,852$	0,96
9	0,286	1,419	$y = -31,798x^2 + 18,196x - 1,184$	0,99
10	0,306	1,339	$y = -11,426x^2 + 6,997x + 0,267$	0,97
11	0,308	1,311	$y = -10,965x^2 + 6,752x + 0,271$	0,94
12	0,303	1,330	$y = -11,872x^2 + 7,192x + 0,240$	0,96
13	0,369	1,294	$y = -19,626x^2 + 14,500x - 1,384$	0,98
14	0,273	1,418	$y = -16,605x^2 + 9,052x + 0,184$	0,97
15	0,285	1,341	$y = -7,463x^2 + 4,258x + 0,734$	0,92
16	0,321	1,274	$y = -8,377x^2 + 5,379x + 0,410$	0,98
17	0,279	1,411	$y = -28,248x^2 + 15,786x - 0,795$	0,99
18	0,299	1,356	$y = -18,481x^2 + 11,051x - 0,296$	0,98

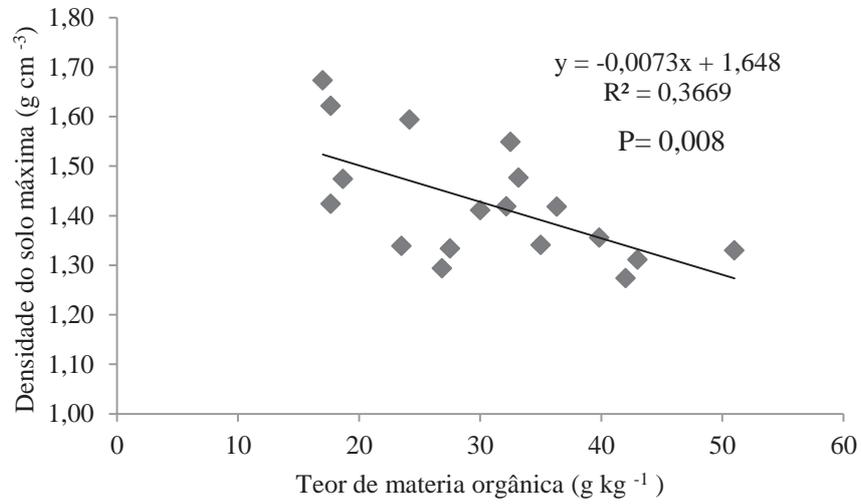


Figura 8. Densidade do solo máxima em função do teor de matéria orgânica.

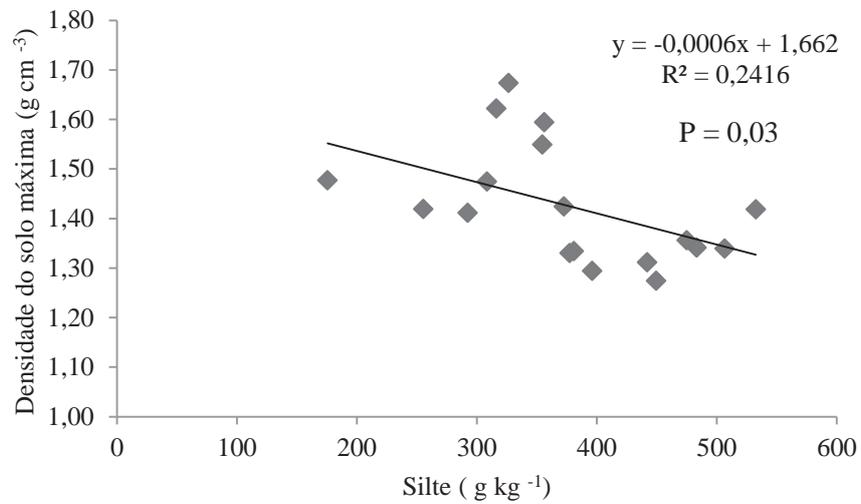


Figura 9. Densidade do solo máxima em função do teor de silte.

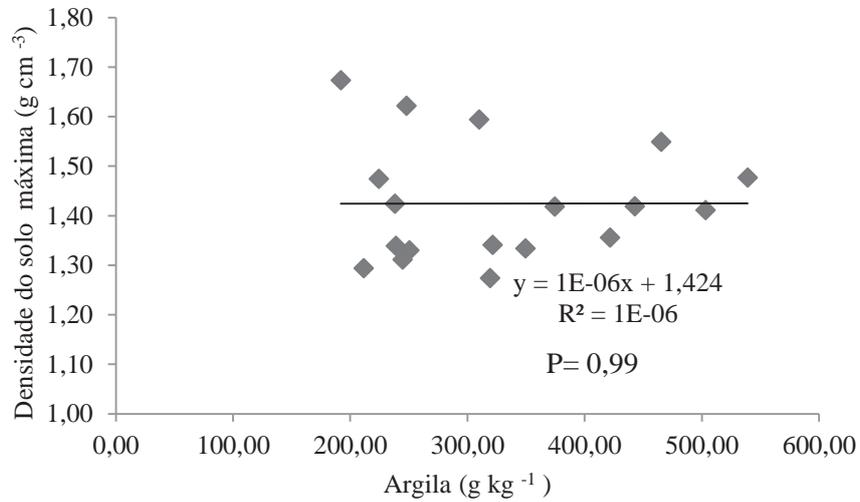


Figura 10. Densidade do solo máxima em função do teor de argila.

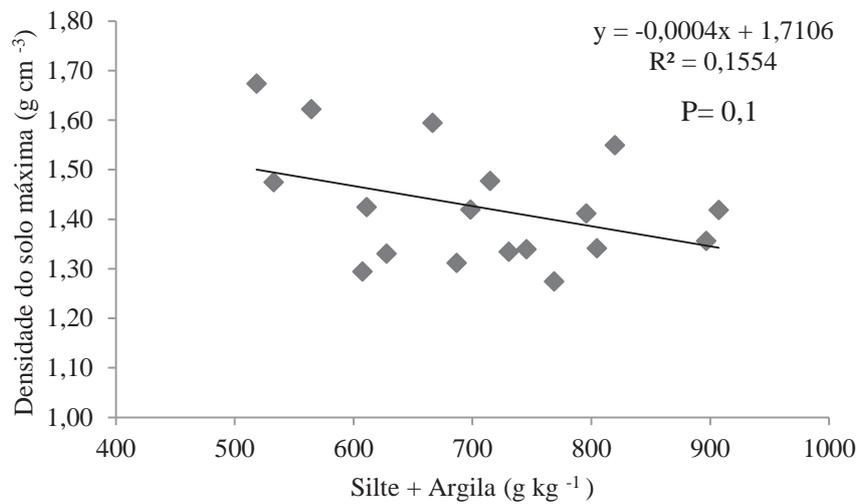


Figura 11. Densidade do solo máxima em função do teor de silte + argila.

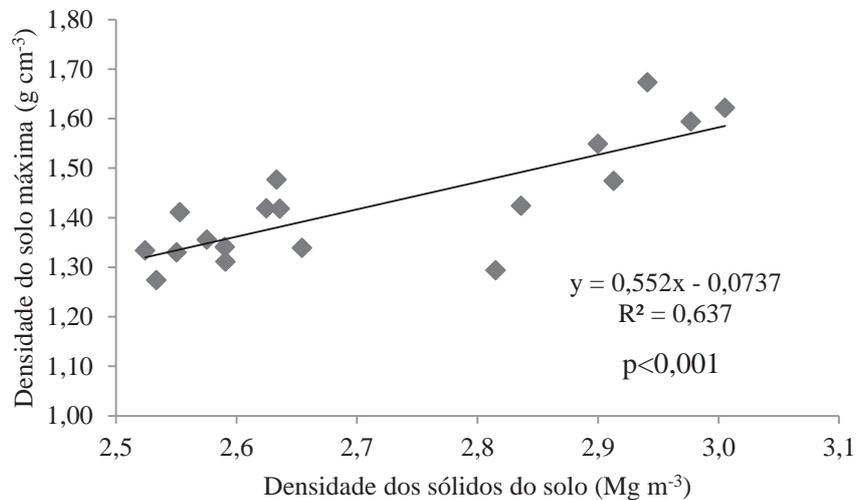


Figura 12. Densidade do solo máxima em função do teor da densidade de sólidos do solo.

Estabelecidas as equações e com base na interação ou não entre as variáveis, modelou-se a  $D_{smáx}$  em função dos teores de silte e MO. A equação que melhor explicou o fenômeno da densidade nestes solos, e que pode ser utilizada para estimar a  $D_{smáx}$  a fim de se estabelecer a DR, está na Equação (1).

$$D_{smáx} = 1,774 - (0,000434 * \text{silte}) - (0,00610 * \text{MO}) \quad (1)$$

(P=0,005)

O fator que mais influenciou a  $D_{smáx}$  nesses solos foi a MO que, como demonstrado na equação e exposto na Figura 13, apresentou maior coeficiente (0,00610) do que o silte (0,000434).

A adição de MO diminui o valor de  $D_{smáx}$  principalmente pelo efeito de dissipação da energia aplicada sobre o solo pela mesma

(ARAGÓN et al., 2000), pela sua capacidade de retenção da água, impedindo que a água atue como lubrificante entre as partículas minerais e ainda pela menor densidade da MO (BRAIDA et. al., 2006)

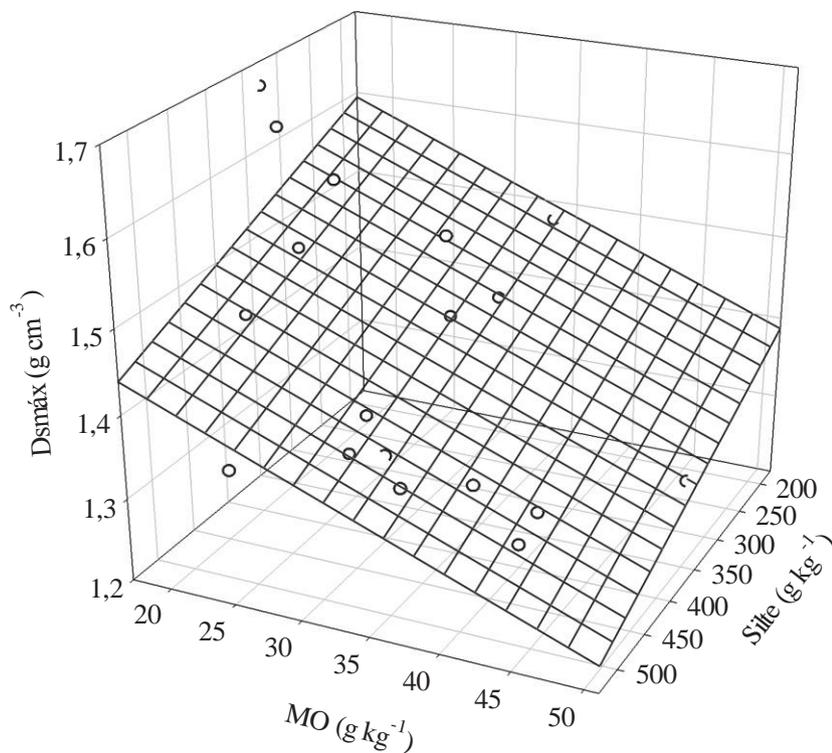


Figura 13. Densidade do solo máxima em função do teor de silte e matéria orgânica.

Na Figura 14 estão comparados os valores de  $D_{smáx}$  obtidos nos solos estudados em função do teor de silte com a  $D_{smáx}$  estimada por equação pelo teor de argila e MO ( $D_{smáx} = 2,03133855 - 0,00320878\ MO - 0,00076508\ argila$ ) encontrada por Marcolin &

Klein (2011) e com os valores estimados pela equação obtida neste trabalho em função de silte e MO. Observa-se uma mesma tendência decrescente das retas, porém com valores de  $D_{sm\acute{a}x}$  menores, abaixo dos encontrados pela equação de pedotransferência da  $D_{sm\acute{a}x}$  em função da argila, enquanto a equação pelo teor de silte e MO mostrou-se mais próxima e adequada aos valores reais.

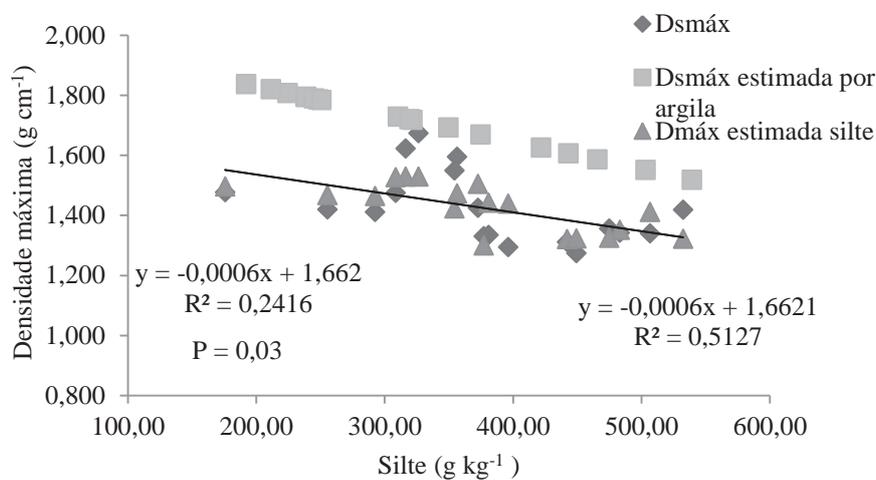


Figura 14. Densidade do solo máxima em função do teor de silte obtida pelo ensaio de Proctor, estimada pelo teor de argila e estimada pela equação pelos teores de silte e MO.

Os valores de UOC situaram-se entre 0,218 e 0,369  $g\ g^{-1}$ . A UOC aumentou com o teor de MO do solo (Figura 15), o que é atribuído à alta capacidade de retenção de água da matéria orgânica (SILVA et al., 1986), corroborando com Díaz-Zorita & Grosso (2000) que verificaram o mesmo efeito. Por ter elevada adsorção de água, a MO diminui a quantidade de água nas partículas minerais do solo, precisando maior quantidade de água para as partículas se orientarem e o solo atingir a sua  $D_{sm\acute{a}x}$ , resultando em maior UOC (SOANE,

1990). A redução da MO do solo em razão do cultivo pode reduzir a UOC aumentando, assim, os riscos à compactação, pois esses solos podem atingir a compactação máxima, mesmo quando trabalhados sob baixos teores de água (SILVA et al., 1986).

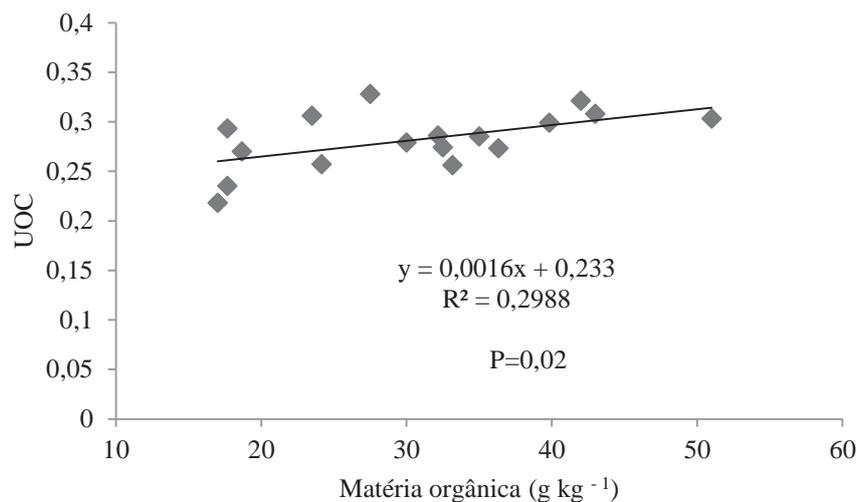


Figura 14. Umidade ótima de compactação em função do teor de matéria orgânica do solo.

Cada tipo de solo tem uma DS, uma Dsmáx e uma UOC. A aplicação desses valores para outros solos pode levar a equívocos na definição da umidade ideal de manejo ou da avaliação do estado de compactação de uma área (LUCIANO et al., 2012). A influência do teor de argila sobre atributos do solo ocorre pela maior quantidade de cargas de superfície e área superficial específica, o que somado à maior capilaridade dos solos argilosos, resultam em maior retenção de água, em comparação aos solos com maior teor de silte e areia (REICHERT et al., 2009). Entretanto, nos solos deste estudo, por conterem um maior teor de silte em sua composição granulométrica,

este apresentou maior efeito sobre a  $D_{sm\acute{a}x}$  quando comparado a argila.

#### 4.5 Densidade relativa do solo

Diferentemente da  $D_{sm\acute{a}x}$  e da UOC, não houve relação entre a DR com os teores de MO ou com as frações granulométricas do solo, já que a esta é um índice, não sendo afetado por estes fatores. Isso reforça seu potencial de uso como indicador de qualidade estrutural do solo, independentemente da classe textural (HÅKANSSON & LIPIEC, 2000), ao contrário da avaliação somente da DS, que é intimamente relacionada à granulometria do solo (REICHERT et al., 2009) e o teor de MO (BRAIDA et al., 2010).

A DR dos solos (Tabela 6) variou de 0,783 a 0,978. Valores entre 0,90 a 0,95 são considerados como solos compactados de acordo com Marcolin (2009). Dessa forma, os solos 13 e 16 apresentaram-se compactados, enquanto os solos 3, 7 14 e 15 apresentaram valores acima de 0,95, ou seja, muito compactados. Esses mesmos solos, quando a DR foi calculada pela equação estimada pelo teor de argila e MO (MARCOLIN & KLEIN, 2011), mostram valores todos abaixo desta faixa, sendo todos considerados solos não compactados, ou seja, o estado de compactação destes solos foi subestimado pelo uso da equação.

O teste T realizado entre as médias de DR real desses solos e as médias das DR pela  $D_{sm\acute{a}x}$  estimada mostrou que houve diferença significativa entre os grupos ( $P = <0,001$ ), provando que a equação pelo teor de argila não se adequou a esses solos.

Tabela 6. Densidade do solo máxima obtida no ensaio de Proctor e estimada pelo teor de argila, densidade relativa obtida pela  $D_{sm\acute{a}x}$  real e e DR calculada pela  $D_{sm\acute{a}x}$  estimada pelo teor de argila e MO. Passo Fundo, 2015

Solo	$D_{sm\acute{a}x}$		DR	DR estimada
	$D_{sm\acute{a}x}$	estimada		
	$g\ cm^{-3}$			
1	1,622	1,786	0,827	0,751
2	1,673	1,837	0,814	0,741
3	1,424	1,795	0,978	0,776
4	1,474	1,807	0,882	0,720
5	1,594	1,728	0,866	0,799
6	1,549	1,586	0,857	0,837
7	1,477	1,518	0,988	0,961
8	1,334	1,692	0,818	0,645
9	1,419	1,606	0,891	0,787
10	1,339	1,794	0,783	0,584
11	1,311	1,789	0,875	0,641
12	1,330	1,783	0,888	0,662
13	1,294	1,819	0,910	0,647
14	1,418	1,669	0,978	0,831
15	1,341	1,718	0,968	0,755
16	1,274	1,720	0,945	0,700
17	1,411	1,551	0,885	0,805
18	1,356	1,626	0,879	0,733

\*médias de 5 repetições

Na Figura 16 observa-se os valores de DR do solo obtidos através da  $D_{smáx}$  real e estimada pelo teor de argila. A  $D_{smáx}$  do solo foi influenciada pelos teores de silte e MO, afetando também sua DR. À medida que o teor de silte aumenta, a diferença entre as retas aumenta, demonstrando que em maiores teores de silte aumenta a imprecisão da mesma, dando valores errôneos e levando a uma interpretação errada do grau de compactação desses solos.

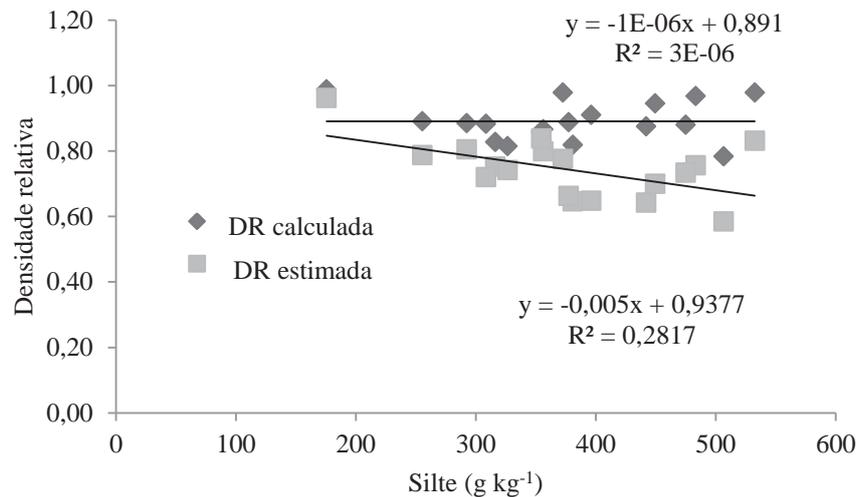


Figura 16. Densidade relativa calculada e estimada pelo teor de argila, em função da variação nos teores de silte.

#### 4.6 Porosidade total e distribuição do diâmetro dos poros

Os valores de PT, macroporos, microporos e criptoporos são apresentados na Tabela 7. A PT nos solos ficou entre 0,44 e 0,60

$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . A PT é considerada ideal para cultivos agrícolas quando apresentar valor igual ou maior que  $0,5 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (GIOIA, 2011). Assim sendo, apenas os solos 7, 14 e 15 apresentaram valores considerados abaixo do ideal. Os reduzidos valores de PT podem ser consequência da prática inadequada do SPD, o qual tem tido como consequência redução da PT e de aeração (VIEIRA, 2006).

Tabela 7. Porosidade total, macro, micro e criptoporos de 18 solos coletados sob SPD . Passo Fundo, 2015

Solo	Porosidade total	Macroporos	Microporos	Criptoporos
1	0,554	0,248	0,101	0,204
2	0,537	0,211	0,158	0,168
3	0,509	0,132	0,103	0,274
4	0,554	0,162	0,165	0,226
5	0,536	0,178	0,124	0,234
6	0,542	0,132	0,143	0,267
7	0,446	0,032	0,193	0,221
8	0,568	0,163	0,207	0,197
9	0,518	0,177	0,126	0,216
10	0,605	0,173	0,304	0,128
11	0,557	0,114	0,298	0,145
12	0,537	0,175	0,155	0,206
13	0,582	0,037	0,315	0,229
14	0,474	0,059	0,189	0,226
15	0,499	0,066	0,241	0,192
16	0,525	0,060	0,277	0,188
17	0,511	0,071	0,261	0,179
18	0,537	0,086	0,281	0,170

Os valores de macroporos dos solos analisados situaram-se entre 0,037 e 0,248  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Tabela 7). Os macroporos, também considerados poros de aeração, devem apresentar um valor mínimo de 0,1  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (TORMENA et al., 1998; MARCOLAN, 2002) e para serem considerados adequados o ideal é de 0,17  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (GIOIA, 2011). Neste caso, os solos 13, 14, 15, 16, 17 e 18 apresentaram macroporosidade abaixo da adequada, sendo considerados, portanto, como compactados. O efeito negativo desta menor macroporosidade sobre o desenvolvimento das plantas ocorre por deficiência na difusão de gases junto ao sistema radicular das plantas (STEPNIEWSKI et al., 1994). Segundo Reichert et al. (2007) geralmente a redução da PT ocorre principalmente com os macroporos, responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo, estando esta redução relacionada com o tipo de manejo adotado ao longo de vários anos, o que modificou a estrutura do solo (MATIAS et al., 2009).

Os solos 1, 2, 3, 4, 5, 9 e 12 apresentaram valores maiores de macroporosidade do que de microporosidade (Tabela 7), os demais solos tiveram uma predominância de microporos, variando entre 0,101 e 0,315  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Os microporos podem ser considerados como poros de grande importância agrícola, por serem responsáveis por reter a água disponível as culturas (KLEIN, 2014).

Para Silva (2006), a compactação do solo pode acarretar um decréscimo na PT, refletindo principalmente na redução do volume de macroporos e aumentando a microporosidade, diferente do que foi observado nos solos estudados, nos quais houve redução tanto de micro quanto de macroporosidade. Já segundo Primavesi (2009), como efeito primário da compactação do solo ocorre à diminuição dos números de

macroporos e criptoporos e conseqüentemente a diminuição da armazenagem de água no solo. Kaiser (2006), estudando Neossolos, obteve menor conteúdo de água nos microporos naqueles solos com maior teor de argila.

Os valores de PT apresentaram comportamento inverso à DS (Figura 17), observando-se estreita relação entre a estrutura do solo e distribuição de poros, resultado esse que corrobora vários trabalhos (IMHOFF et al., 2000; BAVOSO et al., 2010; JORGE et al., 2012). Tal influência da DS sobre a PT se deve ao fato de ocorrer maior aproximação entre as partículas do solo, diminuindo os espaços porosos do mesmo.

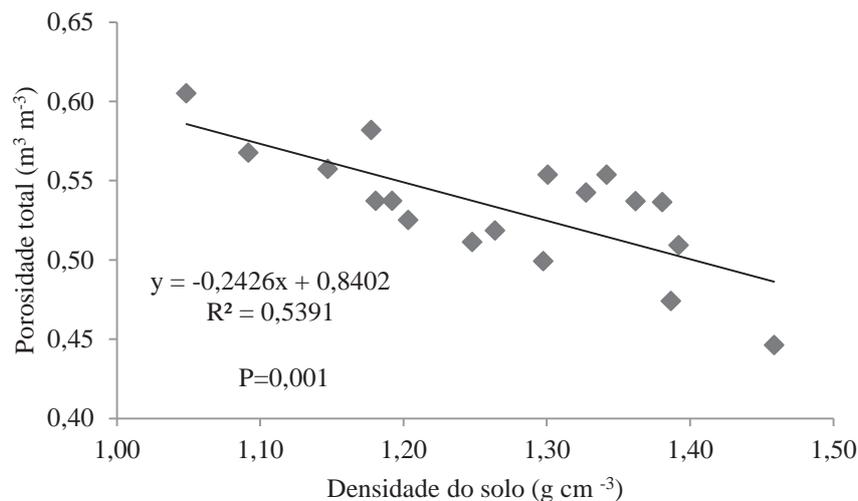


Figura 17. Porosidade total em função da densidade do solo.

A relação entre a DS e a microporosidade (figura 18) e entre DS e a macroporosidade (figura 19) mostraram que o aumento de DS proporcionou a diminuição tanto dos macro como de microporos, fato também verificado por Sillon et al. 2003. Alves et al. (2005) evidenciaram relação negativa entre o volume de macroporos e

PT com a densidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, onde o aumento da DS do solo causou redução da macroporosidade e porosidade total, fato também observado por Scherpinski (2003).

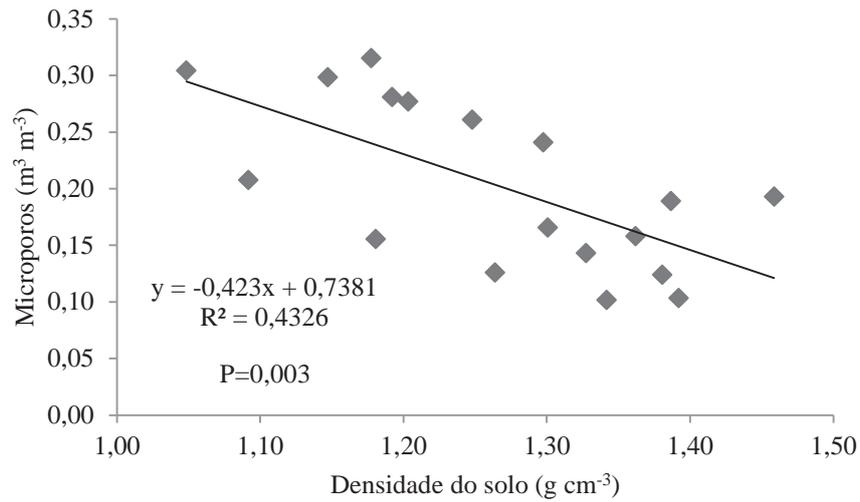


Figura 18. Microporosidade em função da densidade do solo.

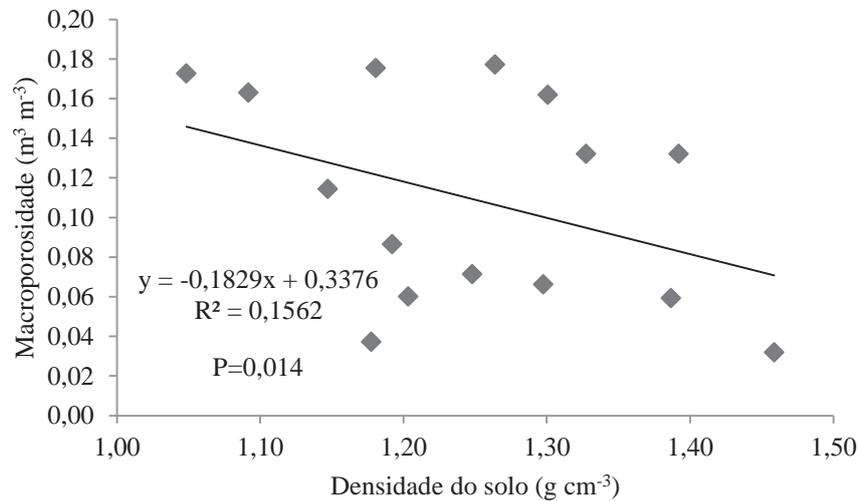


Figura 19. Macroporosidade em função da densidade do solo.

Bertol et al. (2004) encontraram pequena variação no volume de microporos em relação à variação ocorrida no volume de macroporos, demonstrando maior efeito de alterações da densidade nos macroporos, o que pode estar associado ao processo de gênese e formação do solo no caso dos microporos e ao manejo no caso dos macroporos. Já no presente trabalho, foi observada redução tanto da PT quanto de macro e microporos, havendo aumento apenas na criptoporosidade com o aumento da DS.

Pedron et al. (2011), avaliando Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos encontraram que estes apresentaram características físico-hídricas atípicas, com baixa macroporosidade e alta microporosidade, assemelhando-se a maioria dos solos analisados no presente estudo.

Para criptoporos, a amplitude de valores obtidos ficou entre 0,128 e 0,274  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e mostraram aumento em função do aumento da DS (Figura 20). Estes são poros com diâmetro menor que 0,0002 mm, que perdem a água apenas para tensões maiores que 1500 kPa. Segundo Klein (1998), são aqueles poros nos quais a água pode permanecer retida com energia muito alta, sendo, portanto, indisponível às plantas. Esses são poros intra-agregados, às vezes sem comunicação direta com o sistema de poros (SILVA, 2006).

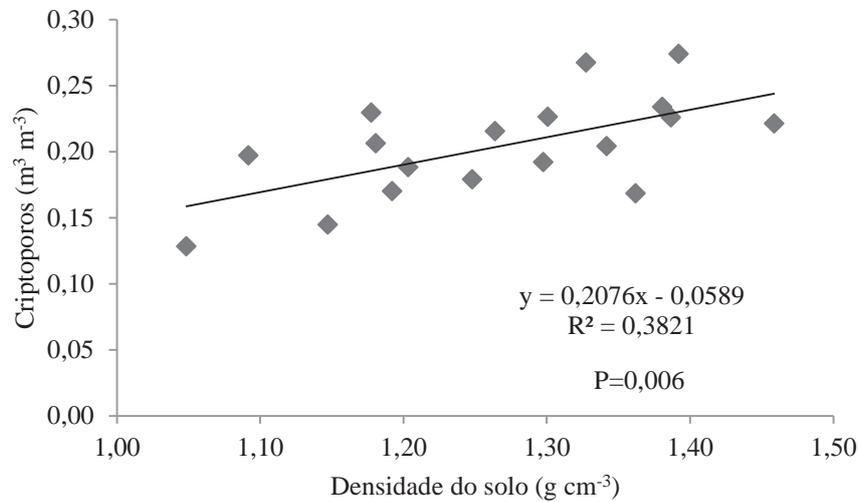


Figura 20. Criptoporosidade em função da densidade do solo.

#### 4.7 Água disponível no solo

Os valores de umidade volumétrica dos solos na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) são apresentados na Tabela 8.

A umidade do solo na CC dos solos estudados ficou entre 0,306 e 0,545 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Em um solo de textura argilosa, Dardengo et al. (2005) determinaram o valor de 0,396 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para a CC, enquanto Souza et al. (2000) obtiveram em solo de textura média o valor de 0,347 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, e Fabian & Ottoni Filho (2000) encontraram o valor médio de 0,210 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> no perfil de 0,60 m, para textura arenosa.

Tabela 8. Umidade volumétrica de 18 solos na capacidade de campo e ponto de murcha permanente e água disponível . Passo Fundo, 2015

Solo	CC	PMP	Água disponível
1	0,306	0,204	0,101
2	0,326	0,168	0,158
3	0,377	0,274	0,103
4	0,392	0,226	0,165
5	0,358	0,234	0,124
6	0,410	0,267	0,143
7	0,414	0,221	0,193
8	0,405	0,197	0,207
9	0,341	0,216	0,126
10	0,432	0,128	0,304
11	0,443	0,145	0,298
12	0,362	0,206	0,155
13	0,545	0,229	0,315
14	0,415	0,226	0,189
15	0,433	0,192	0,241
16	0,465	0,188	0,277
17	0,440	0,179	0,261
18	0,451	0,170	0,281

Silva et al. (2008) verificaram forte influência da argila na retenção de água de um Latossolo Vermelho, sendo o único componente textural usado para ajustar funções de pedotransferência. Contrariamente com o encontrado neste trabalho o silte e a MO exerceram maior influência do que a argila, o que ocorre por serem solos diferentes com distintas composições granulométricas. Já Giarola et al. (2003), encontraram alta correlação entre a umidade na CC e os teores de argila e de silte de solos da região Sul do Brasil.

Quanto ao PMP, os valores encontrados ficaram entre 0,128 e 0,274  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Tabela 8). O silte afetou de forma negativa o PMP, sendo a fração granulométrica que mais o influenciou (Figura 21), discordando de estudo de Klein et al. (2010), para Latossolos Vermelhos, onde o teor de argila e o teor de argila+silte do solo permitiram determinar o teor de água no solo no PMP. Bell & Van Keulen (1995) também encontraram equações com bom ajuste para PMP em função do teor de argila, diferindo do que foi encontrado neste estudado, onde o melhor ajuste foi dado pelo teor de silte, fato atribuído ao maior teor de silte destes solos (Figura 22).

O PMP é uma grandeza física, estimada pelo teor de água do solo retida no potencial matricial de aproximadamente -1,5 MPa (ROMANO & SANTINI, 2002), pois em baixos potenciais matriciais o teor de água no solo varia pouco (ROMANO & SANTINI, 2002). Para determinação do PMP, o psicrômetro WP4 apresentou resultados com bons ajustes (Tabela 9). Essa determinação é facilitada utilizando-se as cápsulas metálicas que permitem determinações subsequentes de potencial com a mesma amostra úmida perdendo água a cada determinação, secando-a depois de ter obtido valores de potencial próximo de -1,5MPa. A partir da equação logarítmica é facilmente obtido o teor de água do solo para o potencial de -1,5 MPa.

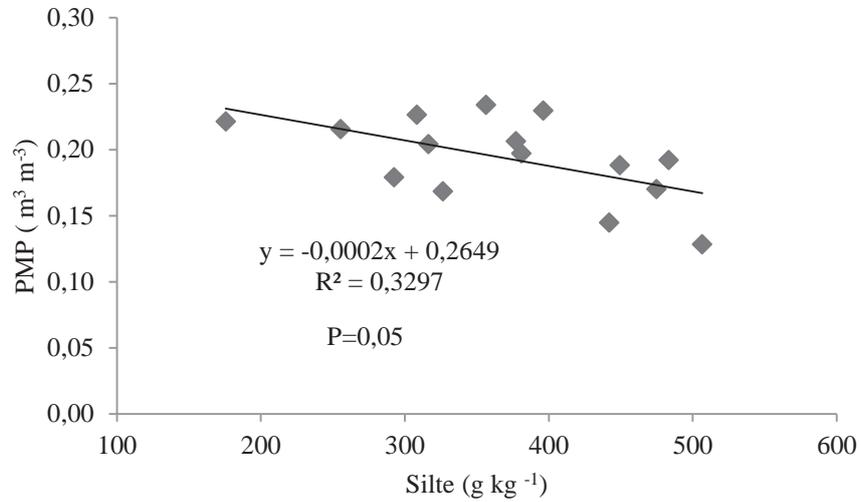


Figura 21. Ponto de murcha permanente do solo em função do teor de silte.

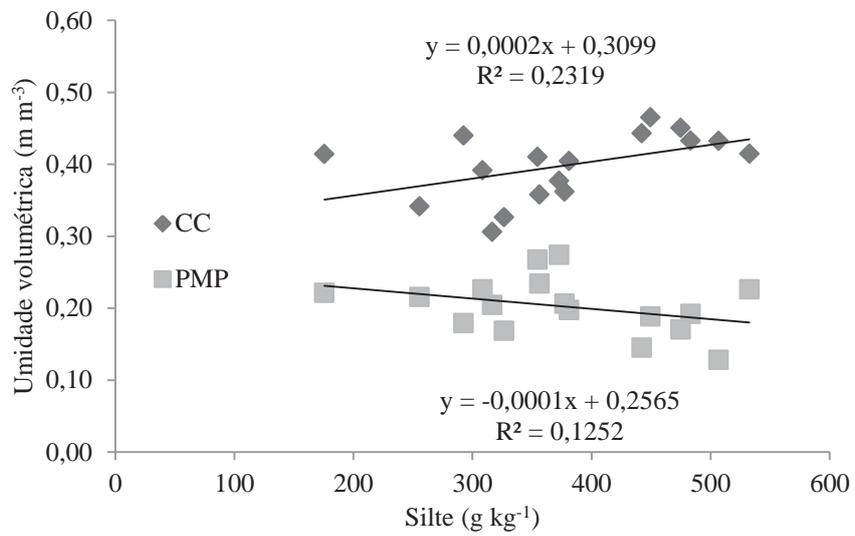


Figura 22. Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente em função do teor de silte.

Tabela 9. Equações logarítmicas de ajustes da umidade gravimétrica em função do potencial de água do solo no WP4 e os respectivos coeficientes de determinação

Solo	Equação de ajuste	R <sup>2</sup>
1	$y = -0,038\ln(x) + 0,1676$	0,95
2	$y = -0,016\ln(x) + 0,1301$	0,90
3	$y = -0,04\ln(x) + 0,213$	0,92
4	$y = -0,025\ln(x) + 0,1841$	0,98
5	$y = -0,027\ln(x) + 0,1804$	0,95
6	$y = -0,033\ln(x) + 0,2148$	0,91
7	$y = -0,026\ln(x) + 0,1623$	0,88
8	$y = -0,067\ln(x) + 0,2078$	0,93
9	$y = -0,048\ln(x) + 0,1921$	0,96
10	$y = -0,087\ln(x) + 0,1576$	0,85
11	$y = -0,11\ln(x) + 0,1708$	0,87
12	$y = -0,065\ln(x) + 0,201$	0,91
13	$y = -0,059\ln(x) + 0,2188$	0,92
14	$y = -0,045\ln(x) + 0,1812$	0,86
15	$y = -0,074\ln(x) + 0,178$	0,94
16	$y = -0,08\ln(x) + 0,1888$	0,93
17	$y = -0,028\ln(x) + 0,1547$	0,92
18	$y = -0,047\ln(x) + 0,1617$	0,91

O teor de silte apresentou no PMP uma contribuição negativa do nos valores de umidade volumétrica, enquanto que para CC esta contribuição foi positiva (Figura 22), ou seja, com acréscimo do silte, o teor água disponível no solos, que é conceitualmente situada entre o PMP e CC, foi crescente, o que seria um efeito positivo nestes solos por terem maior capacidade de armazenarem água.

Na Figura 23 são apresentadas as umidades gravimétricas dos solos estudados na CC e na UOC. De acordo com Milde et al.

(2010), solos com UOC menor que a CC e solos com má drenagem são mais propensos a serem compactados. Assim, a maioria dos solos demonstrou ter valores de UOC abaixo dos de CC, estando mais suscetíveis a sofrerem compactação adicional. Com exceção dos solos 1, 3 e 9, que tiveram UOC maior que CC e seriam, portanto, menos propensos a compactação. No entanto, o fator determinante para que esta compactação ocorra ou não em maior ou menor nível, é o manejo do solo praticado pelo agricultor.

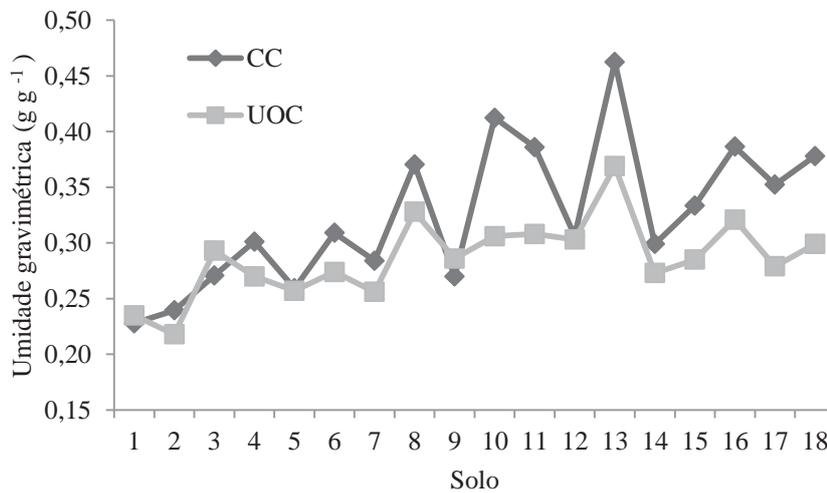


Figura 23. Umidade gravimétrica de 18 solos na capacidade campo (CC) e umidade ótima de compactação (UOC).

## 5 CONCLUSÃO

O teor de silte de Neossolos afeta suas propriedades físico-hídricas.

A densidade do solo máxima diminui com o aumento do teor de silte e da matéria orgânica aumenta com o acréscimo da densidade dos sólidos do solo.

A densidade relativa não é influenciada pela composição granulométrica e teor de matéria orgânica, podendo ser usado como indicador de qualidade do solo.

Há diferença entre a densidade relativa determinada a partir da densidade máxima real e da calculada pela densidade máxima estimada pelo teor de argila e matéria orgânica. Isso denota a necessidade de se ajustar as curvas para cada solo e não usar valores médios, sob risco de erros no diagnóstico de problemas de compactação.

Para Neossolos é possível se ajustar uma equação de pedotransferência para a  $D_{smáx}$  em função dos teores de silte e matéria orgânica, não sendo adequado o uso de equações que tem o teor de argila como parâmetro de influência. A equação que melhor descreve a densidade do solo máxima para Neossolos é  $D_{smáx} = 1,774 - (0,000434 * \text{silte}) - (0,00610 * \text{MO})$ .

## 6 REFERÊNCIAS

ALVES, A. G. C; MARQUES, J. G. W. Etnopedologia: Uma nova disciplina. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P; CARDOSO, E.J. *Tópicos em ciência de solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 4. p. 321-344, 2005.

AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R.; LANZANOVA, M.; SANTI, A.L.; LOVATO, T. A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob plantio direto. *Revista Plantio Direto*, v. 89, p. 34-42, 2005.

ARAGÓN, A.; GARCIA, M. G.; FILGUEIRA, R. R.; PACHEPSKY Y. A. A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: The relationship with organic carbon and water content. *Soil & Tillage Research*. v. 56, p. 197–204, 2000.

ARGENTON, J; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 29, p. 425-435, 2005.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 515-522, 2005.

BAVOSO, M. A.; GIAROLA, N. F. B.; FABIOLA, N.; TORMENA, C. A.; PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: Efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 227- 234, 2010.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do*

*solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 7-18.

BELL, M.A.; KEULEN, H. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 59, p. 865-878, 1995.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN, W.A. 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.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P. da; GIAROLA, N. F. B. 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.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 48, p. 863-871, 2005.

BILIBIO, W. D.; CORRÊA, G. F.; BORGES, E. N. Atributos físicos e químicos de um Latossolo, sob diferentes sistemas de cultivo. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 34, p. 817-822, 2010.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The nature and properties of soils*. 14 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. *Revista Brasileira de Ciência d. Solo*, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 131-139, 2010.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. DNPM. *Projeto Radam: levantamento de recursos naturais disponíveis*. Fortaleza. Rio de Janeiro, 1973.

CARVALHO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; ATHAYDES, M. L. F.; ARF, O.; SÁ, M.E. Produtividade do milho em sucessão a adubos verde no sistema de plantio direto e convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 47-53, 2004.

CASALINHO, H. D.; MARTINS, S. R.; SILVA, J. B.; LOPES, A. S. Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade de agroecossistemas. *Revista Brasileira Agrociência*. Pelotas. v. 13, n. 2, p. 195- 203, 2007.

CUNHA, E. DE Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. DE B; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A.; LEANDRO, W.M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e Milho. II - Atributos biológicos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 603-611, 2011.

DARDENGO, M. C. J. D.; EFFGEN, T. A. M.; TATAGIBA, S. D.; REIS, E. F.; PASSOS, R. R. Avaliação da capacidade de campo em dois solos da região sul do estado do Espírito Santo por diferentes métodos de determinação. In: Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, 8.; Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação, 5, 2005, São José dos Campos. *Anais...* São José dos Campos: UNIVAP, p. 1736-1739, 2005.

DECAGON DEVICES. *Operator's manual WP4 dewpointmeter*. USA, Decagon devices. 2010. 66 p.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÖLTER, S. *Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista.*, Passo Fundo: Embrapa, 2012. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento online, 141).

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: UFV, v. 1, p. 55-94, 2000.

DÍAZ-ZORITA, M; GROSSO, G. A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil & Tillage Resourch*, v. 54, p. 121-126, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Embrapa/CNPS), 2013. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Embrapa/CNPS), 1997. 212 p.

ERICKSON, A. E. *Tillage effects on soil aeration*. In: VAN DOREN, D. M.; ALLMARAS, R. R.; LINDEN, D. R.; WHISLER, F. D. (Ed.) *Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*. Madison: ASA, 1982. p. 91-104.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo "in situ" ou através de equações de regressão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, p. 1029-1036, 2000.

FAGUERIA, N. K.; STONE, L. F. *Qualidade do solo e meio ambiente*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. (Documento 197)

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, n. 3, p. 487-493, 2000.

FREITAS, P. L. de. Aspectos físicos e biológicos do solo. In: LANDERS, J. N. (Ed.). *Fascículos sobre experiências em plantio direto nos cerrados*. Uberlândia: Associação de Plantio Direto no Cerrado, 1994. p. 199-213.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A. R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma*, v. 113, p. 95-108, 2003.

GIOIA, M. T. *Produtividade e qualidade da cana soca correlacionadas com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho Distrófico do noroeste Paulista*. 2011. 127 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira 2011.

GUIMARÃES, E. C. *Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional*. 2000. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*. v.53, p. 71-85, 2000.

HILLEL, D. *Solo e água, fenômenos e princípios físicos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231 p.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, p. 1493-1500, 2000.

JONG VAN LIER, Q. de. Índices da disponibilidade de água para as plantas. *Tópicos em Ciência do Solo*, v. 1, p. 95-106, 2000.

JORGE, R. F.; ALMEIDA, C. X.; BORGES, E. N.; PASSOS, R. R. Distribuição de poros e densidade de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. *Bioscience Journal*, v. 28, p. 159-169, 2012.

KAISER, D. R. *Nitrato na solução do solo e na água de fontes para consumo humano numa microbacia hidrográfica produtora de fumo*. 114 f. 2006. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2006.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos*, v. 5, p. 17-40. 1997.

KIEHL, E. J. *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes métodos de manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob plantio direto. *Ciência Rural*, v. 25, p. 395-398, 1995.

KLEIN, V. A. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. 150 p. 1998. Tese (Doutorado), ESALQ/USP Piracicaba. 1998.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. *Revista Ciências Agroveterinárias*, n. 5, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V.A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica das culturas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 10, p. 646-650, 2006.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com Psicrômetro. *Ciência Rural*, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, 2010.

KLEIN, V. A. *Física do solo*. 3.ed. Passo Fundo: UPF Editora, 2014, 263 p.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba: EDUSP, 2005. 335 p.

LIMA, C. L. R. de; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. *Ciência Rural*, v. 36, p. 1765-1772, 2006.

LIMA, R. P.; LEON, M. J.; SILVA, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. *Revista Ceres*, v. 60, p. 16-20, 2013.

LUCIANO, R. V. ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; BATISTELLA. B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MARCOLAN, A. L. *Atributos físicos e químicos de um Argissolo e rendimento de culturas em função do seu revolvimento na reaplicação de calcário no sistema plantio direto*. 2002. 76 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MARCOLIN, C. D. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de solos sob plantio direto, na região de Passo Fundo - RS*. 2006. 92 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

MARCOLIN, C. D. *Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto*. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 3, p. 349-354, 2011.

MARQUES, F. A. *Caracterização e classificação de solos da Ilha de Fernando de Noronha (PE)*. 2004.101 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.

MATIAS, M. da C. B.; SALVIANO, A. A. C.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, S. R. da S. Propriedades químicas em Latossolo Amarelo de Cerrado do Piauí sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Ciência Agronômica*, v. 40, p. 356-362, 2009.

MEDEIROS, P. S. C; PEDRON, F. A.; STÜRMER, S. L. C, RODRIGUES, M. F; A. C.; DALMOLIN, R. S. D. Caracterização de Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos do RS e análise do seu potencial agrícola. *Anais... Congresso Brasileiro de Ciência do solo*. 2007.

MILDE, G. A. DEDECEKET, R. A.; GAVA. J. L. Unidades de colheita: estratégia para evitar a compactação dos solos florestais. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1075-1083, 2010.

NOGUEIRA, J. B. Mecânica dos solos. *Ensaio de laboratório*. São Carlos: Eesc-USP, 1998. p. 248.

OLIVEIRA, T. K.; CARVALHO, G. J.; MORAES, R. N. S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, p. 1079-1087, 2002.

PEDRON, F. A. *Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e Neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul*. 2007. 160 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PEDRON, F. A.; AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D.; STÜRMER, S. L. K.; MENEZES, F. P. Morfologia e classificação taxonômica de Neossolos e saprolitos derivados de rochas vulcânicas da formação Serra Geral no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 119-128, 2009.

PEDRON, F. A.; FINK, J. R.; RODRIGUES, M. F.; AZEVEDO, A. C. Condutividade e retenção de água em Neossolos e saprolitos derivados de Arenito. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 35, p. 53-62, 2011.

PEDRON, F. A.; SAMUEL-ROSA, A; DALMOLIN, R. S. D. Variação das características pedológicas e classificação taxonômica de Argissolos derivados de rochas sedimentares. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 1-9, 2012.

PRADO, H. *Pedologia Fácil: Aplicações na Agricultura*. Piracicaba: Esalq/usp, 2007. 105 p.

PRIMAVESI, A. *Manejo Ecológico do Solo: Agricultura em regiões tropicais*. São Paulo: Nobel, 2009.

RAIJ, B. Van. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

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

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.

A.; SILVA, L.S. da; REICHERT, J. M. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Resourch*, v. 102, p. 242-254, 2009.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. *Propriedades físicas do solo*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 18 p.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas em solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; CERETTA, C. A. eds. *Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul*. Santa Maria, RS, 2001, 165 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B; CORRÊA, S. A. *Pedologia: Base para distinção de ambientes*. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 2002. 338 p.

RIBON, A. A; TAVARES FILHO, J. Model propositions for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 47, p. 25-31, 2004.

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

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: field. In: DANE, J. H ; TOPP, C. (Eds.). *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002, p. 721.

RUIZ, V. H. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 297 - 300, 2005.

SANTANA, M. B. *Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores da coesão em dois solos dos Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia*. 2002. 73 f. Dissertação (Mestrado em Solo e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Viçosa, 2002.

SCANLON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. *Water potential: Miscellaneous methods for measuring matric or water potential*. In: DANE, J. H; TOPP, C. (Eds.) *Methods of soil analysis*. Madison: Soil Science Society of America, p. 643-670, 2002

SCHERPINSKI, N. I. *Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos e do rendimento de grãos de soja em um latossolo vermelho sob sistema de plantio direto e convencional*. 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2003.

SECCO, D. *Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas*. 2003. 108 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SHI, X. H.; YANG, X. M.; DRURY, C. F.; REYNOLDS, W. D.; MCLAUGHLIN, N. B.; ZHANG, X. P. Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario. *Soil & Tillage Research*, v. 120, p. 1-7, 2012.

SILLON, J. F; COUSIN L. Tillage and traffic effects on soil hydraulic properties and evaporation. *Geoderma*, v. 116, p. 29–46, 2003.

SILVA, A. J. N. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 76–83, 2006.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; INHOFF, S. 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, C. G. *Perdas de solo e de água e características de infiltração em sistemas de plantio direto e convencional*. 2003. 42 f.

Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Dourados, 2003.

SILVA, I. F.; ANDRADE, A. P.; CAMPOS FILHO, O. R. Erodibilidade de seis solos do semi-árido paraibano obtida com chuva simulada e método nomográfico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 10, n. 3, p. 283-287, set./dez. 1986.

SILVA, J. H. *Atributos físico-hídricos de um Plintossolo Háptico sob uma cronossequência de uso agrícola em campo de murundu*. 2011. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, 2011.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. *Soil Tillage Research*, v. 16, p. 179-201, 1990.

SOUZA, C. K.; MARQUES JUNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de uma latossolo em Jaboticabal-SP. *Engenharia Agrícola*, v. 23, n. 3, p. 486-495, 2003.

SOUZA, L.C. et al. Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, n. 1, p. 35-40, 2000.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B. C. Effects of compaction on soil aeration properties. *Elsevier*, p. 167-190, 1994.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p. 207-212, 2002.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*, v. 34, p. 755-760, 2004.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIM, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 107 p.

STÜRMER, S. L. K. *Infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul*. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

STÜRMER, S. L. K.; DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. A.; MENEZES, F. P. Relação da granulometria do solo e morfologia do saprolito com a infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, v. 39, p. 2057- 2064, 2009.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H; VOLKWEISS, S. J. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147 p. (Boletim Técnico).

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

VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.

VIEHMEYER, F. J; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil Science*, v. 68, p. 75-94, 1949.

VIEIRA, M. L. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo*. 2006, 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade de Passo Fundo, 2006.