

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

**VARIABILIDADE DOS LIMITES DO INTERVALO
HÍDRICO ÓTIMO**

GILVAN JACIEL GRAEBIN

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 – Área de Concentração “Produção Vegetal”.

Passo Fundo, agosto de 2014.

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

**VARIABILIDADE DOS LIMITES DO INTERVALO HÍDRICO
ÓTIMO**

GILVAN JACIEL GRAEBIN

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 – Área de Concentração “Produção Vegetal”.

Passo Fundo, agosto de 2014.

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

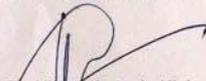
“VARIABILIDADE DOS LIMITES DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO”

Elaborada por

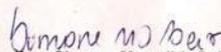
Gilvan Jaciel Graebin

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Agronomia – Produção Vegetal

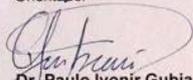
Aprovada em: 29/08/2014
Pela Comissão Examinadora



Dr. Wilson Antonio Klein
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador



Dra. Simone Meredith Scheffer Basso
Coord. Prog. Pós-Graduação em Agronomia



Dr. Paulo Ivonir Gubiani
UFSM



Dr. Hélio Carlos Rocha
Diretor FAMV



Dr. Clóvis Darli Marcolin
IFRS - Sertão

CIP – Catalogação na Publicação

G734v Graebin, Gilvan Jaciel
Variabilidade dos limites do intervalo hídrico ótimo / Gilvan
Jaciel Graebin. – 2014.
X, 70 f. : il. ; 25 cm.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo
Fundo, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein.

1. Solo rural – Uso. 2. Solos – Densidade. 3. Solos – Absorção.
I. Klein, Vilson Antonio, orientador. II. Título.

CDU: 631.4

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e saúde e pela proteção em tantas idas e vindas.

A minha mãe, Adilsi Nienow Graebin, exemplo de vida.

Ao meu pai, Gildomar Graebin, pelo apoio nos estudos, pela compreensão.

Ao meu irmão Jonathan Miguel Graebin, pelo carinho e saudade apresentada.

A minha noiva, Karoline, que me ajudou em todos os momentos.

Ao professor Vilson Antonio Klein, meu orientador, grande mestre, pela confiança, pelo incentivo. Fostes um grande amigo, um “paizão”, uma lição de vida.

A Universidade de Passo Fundo, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, que possibilitaram a realização do curso de Mestrado e pela bolsa concedida.

Aos professores do Programa de Pós Graduação, por todos os preciosos ensinamentos, e aos funcionários da FAMV pela convivência agradável.

Aos colegas Delcio R. Bortolanza e Claudia Klein obrigado pela convivência harmoniosa, pelas conversas, pelas preciosas ajudas na dissertação. Obrigado.

Aos colegas e estagiários do Laboratório: Rafael, Tiago, Henrique, Eduardo, Diógenes, meu muito obrigado pela amizade e ajuda. A todos, próximos ou distantes, que, de alguma forma, contribuíram para que esses momentos fossem vividos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SIGLAS	x
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUÇÃO	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Solo agrícola.....	5
2.2 Qualidade física de solos agrícolas	6
2.3 Intervalo hídrico ótimo (IHO) como indicador da qualidade física de solos agrícolas	8
2.4 Limites do IHO.....	9
2.4.1 Limites superiores do IHO	10
2.4.1.1 Capacidade de campo	10
2.4.1.2 Porosidade de aeração	11
2.4.2 Limites inferiores do IHO	13
2.4.2.1 Ponto de murcha permanente	13
2.4.2.2 Resistência mecânica do solo à penetração	14
2.5 Variabilidade espacial dos limites do IHO.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Método de coleta	18
3.2 Composição granulométrica do solo	18
3.3 Densidade do solo	19
3.4 Densidade do sólido do solo.....	19
3.5 Porosidade de total	20
3.6 Capacidade de campo e ponto de murcha permanente.....	20
3.7 Resistência mecânica do solo a penetração	20
3.8 Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO).....	22
3.9 Estatística descritiva	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Densidade do solo e densidade dos sólidos do solo	23
4.2 Porosidade total	30
4.3 Porosidade de aeração	31
4.4 Conteúdo de água a 6 kPa	35
4.5 Ponto de murcha permanente	38
4.6 Resistencia mecânica do solo à penetração	41
4.7 Intervalo hídrico ótimo	45

	Página
5 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Composição granulométrica dos solos nos diferentes municípios de coleta, com base na média de 100 amostras coletadas por solo. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	19
2	Parâmetros da estatística descritiva da densidade dos três solos. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	24
3	Parâmetros da estatística descritiva da densidade do solo com a retirada dos outliers. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	28
4	Parâmetros da estatística descritiva da densidade dos sólidos do solo. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	29
5	Parâmetros da estatística descritiva da porosidade total. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	31
6	Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para resistência a penetração do solo, em função do conteúdo volumétrico da água e densidade do solo $\ln RP = a + b \ln Ds - c \ln \theta$ nos três solos FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014..	42
7	Estatística descritiva do IHO no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	52
8	Estatística descritiva do IHO no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	53
9	Estatística descritiva do IHO no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama tridimensional da densidade (Ds) nos três solos. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	25
2	<i>Outliers</i> da densidade do solo nos solo 1, 2 e 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	26
3	Umidade volumétrica do solo na qual é atingida a porosidade de aeração de 0,10 (m ³ m ⁻³) em função da densidade no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	33
4	Umidade volumétrica do solo na qual é atingida a porosidade de aeração de 0,10 (m ³ m ⁻³) em função da densidade no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	34
5	Umidade volumétrica do solo na qual é atingida a porosidade de aeração de 0,10 (m ³ m ⁻³) em função da densidade no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	34
6	Umidade volumétrica do solo na qual é atingida a capacidade de campo em função da densidade no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	36
7	Umidade volumétrica do solo na qual é atingida a capacidade de campo em função da densidade no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	36
8	Umidade volumétrica do solo na qual é atingido a capacidade de campo em função da densidade no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	37
9	Umidade volumétrica do solo na qual é atingido o ponto de murcha permanente em função da densidade no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	39

		Página
10	Umidade volumétrica do solo na qual é atingido o ponto de murcha permanente em função da densidade no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	40
11	Umidade volumétrica do solo na qual é atingido o ponto de murcha permanente em função da densidade no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	40
12	Relação entre a resistência do solo à penetração (RP) estimada e medida no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	43
13	Relação entre a resistência do solo à penetração (RP) estimada e medida no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	44
14	Relação entre a resistência do solo à penetração (RP) estimada e medida no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	44
15	Conteúdo de água nos limites do IHO em função da densidade do solo. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP) no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	47
16	Conteúdo de água nos limites do IHO em função da densidade do solo. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP) no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	47
17	Conteúdo de água nos limites do IHO em função da densidade do solo. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP) no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	48
18	Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	49

19	Varição do intervalo hídrico ótimo em função da densidade no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	50
20	Varição do intervalo hídrico ótimo em função da densidade no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	50
21	Amplitude do IHO no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	52
22	Amplitude do IHO no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	53
23	Amplitude do IHO no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.....	54

LISTA DE SIGLAS

AD	Água disponível
CC	Capacidade de campo
CV	Coefficiente de variação
Ds	Densidade do solo
Dsc	Densidade do solo crítica
Dss	Densidade dos sólidos do solo
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAMV/UPF	Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária/Universidade de Passo Fundo
IHO	Intervalo hídrico ótimo
NLWR	Non limiting water range
PA	Porosidade de aeração
PMP	Ponto de murcha permanente
RP	Resistência do solo a penetração
Pt	Porosidade total
W	Shapiro-Wilks

VARIABILIDADE DOS LIMITES DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

GILVAN JACIEL GRAEBIN¹

RESUMO – A busca por indicadores de qualidade física dos solos agrícolas tem sido incessante. Neste contexto surgiu o intervalo hídrico ótimo (IHO) que considera como condição menos limitante ao desenvolvimento das plantas, além da capacidade de campo e ponto de murcha permanente, a resistência à penetração e a porosidade de aeração. A dificuldade em estabelecer relações entre o IHO e a produtividade das plantas tem posto em xeque a validade deste indicador. Uma das razões pode ser a variabilidade espacial e a fragilidade dos ajustes matemáticos as variáveis. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial e o ajuste de modelos matemáticos aos dados de cada variável. Os resultados indicam uma elevada variabilidade dos limites do IHO, principalmente da capacidade de campo e o fraco ajuste da resistência à penetração. Esta variabilidade acarretou uma grande dispersão dos dados do IHO para uma mesma faixa de densidade do solo.

Palavras chave: água disponível, qualidade física do solo, densidade do solo.

¹ Eng. Agr. Mestrando do Programa de Pós Graduação em Agronomia (PPGAgro) da Universidade de Passo Fundo (UPF), gilvangraebin@gmail.com

VARIABILITY OF LIMITS OF LEAST WATER RANGE

ABSTRACT – The search for indicators of agricultural soil physical quality has been incessant. In this context the least limiting water range (LLWR) which considers as least limiting plant growth condition in addition to the field capacity and permanent wilting point the soil penetration resistance and aeration porosity. The difficulty of establishing relations between LLWR and plant productivity has called into question the validity of this indicator. One reason may be the spatial variability and the weakness of the mathematical models adjustments to variables. The aim of this work was to evaluate the spatial variability and the mathematical models adjustments of each variable. Results indicate high variability of LLWR components, specially field capacity and the weak adjustment of soil penetration resistance. This variable led to data dispersion of LLWR components in the same bulk density.

Key-words: available water, bulk density, soil physical quality.

1 INTRODUÇÃO

A produtividade das culturas está relacionada a atributos do solo que atuam de maneira direta na disponibilização de nutrientes, no armazenamento e disponibilidade de água, no crescimento das plantas e no rendimento das culturas. O solo é um recurso natural em que atributos físicos, químicos e biológicos são vitais e mudanças podem significar perda de qualidade afetando significativamente a sustentabilidade ambiental e econômica da atividade agrícola.

Avaliar a qualidade física de solos agrícolas, com o intuito de proporcionar condições favoráveis ao pleno crescimento das plantas e a preservação do ambiente, tem sido buscada com muito afinco por grande número de pesquisadores.

Essa qualidade está relacionada com a estrutura do solo, que se refere ao arranjo das partículas sólidas e dos poros a elas associados. Solos degradados apresentam aumento na densidade, com conseqüente incremento na resistência mecânica do solo à penetração das raízes e alterações na distribuição do diâmetro dos poros, com implicações na dinâmica do fluxo de ar e água solo.

Em função disso tem aumentado o interesse da comunidade científica em avaliar a qualidade do solo submetido a diferentes processos de cultivo e definir a tecnologia mais racional de uso do solo. A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo na qualidade dos solos são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis.

A avaliação da magnitude dessas alterações na estrutura física do solo e de suas implicações sobre o desenvolvimento das plantas é extremamente complexa, visto que, inúmeras são as relações que ocorrem no sistema solo-água-planta, algumas de difícil mensuração. Metodologias como o intervalo hídrico ótimo (IHO) agrupam vários fatores limitantes em um conceito só que são: porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e resistência do solo a penetração (RP), assim determinando a faixa de umidade na qual as condições para as plantas seriam ótimas. O IHO é um índice de ajustes matemáticos das quatro variáveis já citadas, em função da densidade do solo (DS).

O presente trabalho parte da hipótese de que os limites do IHO apresentam elevada variabilidade conseqüentemente é baixa a precisão da descrição desses limites por modelos matemáticos. Em decorrência disso existe alto grau de incerteza associado à determinação do IHO. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade e os ajustes de modelos matemáticos aos dados de cada limite do IHO em três Latossolos Vermelhos sob sistema semeadura direta, na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, em Passo Fundo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solo agrícola

A história da humanidade mostra que o homem sempre conviveu intimamente com o solo, primeiramente colhendo frutos de práticas extrativistas. Ao longo do tempo o homem também percebeu que os solos variavam bastante na paisagem e se comportavam de maneira muito diversa segundo o uso a que se destinavam. Isso o levou a agrupar os solos em classes. Assim, empiricamente ele separava os solos secos dos solos úmidos, os solos pobres (pouco fértil) dos solos ricos (muito fértil), os solos leves (arenosos) dos solos pesados (argilosos). O solo é a principal matéria-prima da agricultura, pois ele é um dos principais elementos que dá condições de germinação as plantas, no entanto sofre uma série de impactos na prática agrícola (OLIVEIRA, 2011).

Além disso, o solo suporta de maneira passiva, a passagem de máquinas agrícolas e resiste às forças de tração dos tratores e a ação dos implementos agrícolas (ARAÚJO et al., 2004).

A desestruturação do solo, a compactação e a redução nos teores de matéria orgânica são consideradas os principais indutores da degradação dos solos agrícolas. Tal degradação, com todas as suas implicações e consequências, tem resultado no desafio de viabilizar sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental, criando-se novos paradigmas tecnológicos baseados na sustentabilidade (DENARDIN & KOCHHANN, 1993).

2.2 Qualidade física de solos agrícolas

Com o advento do plantio direto na palha, surgiram nas últimas décadas, problemas pertinentes à estrutura do solo, dentre os quais a compactação do solo. Essa resulta do adensamento das partículas devido ao tráfego de máquinas e ao não-revolvimento do solo. Tais alterações afetam a dinâmica de água e ar no solo, interferindo na absorção e translocação de nutrientes do solo para as plantas. Algumas práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nos atributos do solo.

Os aspectos físico, químico e biológico, são importantes nas avaliações da extensão da degradação ou melhoria do solo e para identificar os manejos sustentáveis do mesmo. No entanto, a qualidade física do solo merece destaque especial em novos trabalhos, pois acredita-se ter grandes efeitos nos processos químicos e biológicos no solo, ainda pouco explorado nos estudos de qualidade do solo (DEXTER, 2004).

O uso de metodologias que quantifiquem e qualifiquem as condições estruturais do solo nos vários sistemas de manejo é importante na avaliação da qualidade do solo, considerada um indicador da sustentabilidade dos sistemas de uso e manejo (ARSHAD et al., 1996).

Quantificar a qualidade do solo não é nada fácil. As dificuldades advêm do fato, de que essa qualidade do solo, depende de propriedades intrínsecas, de suas interações com o ecossistema e, de prioridades de uso, influenciadas inclusive, por aspectos socioeconômicos e políticos (COSTA et al., 2006).

A qualidade do solo está relacionada com sua funcionalidade dentro dos ecossistemas naturais e significa a capacidade deste em sustentar a atividade biológica, promover o crescimento e a saúde das plantas e animais e manter a qualidade ambiental (DORAN & PARKIN, 1994).

A densidade do solo tem sido usada como um parâmetro importante de caracterização física da estrutura do solo e como um indicador de compactação (PIRES et al., 2011).

Densidade do solo em ambientes não cultivados é uma propriedade física que depende dos fatores e processos pedogenéticos. O uso da densidade pode compactar o solo, expresso pelo aumento da densidade devido ao pisoteio dos animais, tráfego de máquinas e implementos agrícolas, cultivos intensivos e sistemas de manejos indevidos (HAMZA & ANDERSON, 2005).

Com a perda da qualidade física do solo, o espaço poroso do solo é afetado diretamente de forma a prejudicar o fornecimento de água e de oxigênio limitando o desenvolvimento das plantas (TORMENA et al., 1998).

A estrutura do solo é importante característica deste meio físico que serve de suporte, proporciona água, ar e elementos nutritivos às plantas. Klein (2014) destaca o solo como sendo um “pulmão” de ar, água e nutrientes.

A deterioração da qualidade física do solo apresenta condições desfavoráveis da estruturação do solo, com agregados pouco estáveis, baixa porosidade, elevada densidade (ISLAM & WEIL, 2000; CARVALHO et al., 2004), maior penetração das raízes

(Martins et al., 2002) e baixa capacidade de retenção de água (TORMENA et al., 1998).

2.3 Intervalo hídrico ótimo (IHO) como indicador da qualidade física de solos agrícolas

O conceito de uma única variável para descrever as interações entre os atributos físicos e o crescimento das plantas foi proposto por Letey (1985) - “*Non Limiting Water Range*” (NLWR). O conceito do NLWR foi quantificado por Topp et al. (1994) e Silva et al. (1994) e proposto como um índice da qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas (TORMENA et al., 1998). O IHO é a faixa de umidade do solo na qual as limitações ao desenvolvimento das plantas são mínimas, isto é, nesta faixa de umidade do solo de ótima disponibilidade de água às plantas, sem limitações de energia de retenção, sem excesso de resistência à penetração nem problemas de aeração. É considerado um importante indicador das condições físico-hídricas do solo.

O IHO é o tradicional conceito de água disponível entre CC e PMP mas água disponível não é tida como ótima em toda faixa entre CC e PMP, adicionando as limitações associadas com a PA e a RP. Nos solos em que os sistemas de manejo propiciam melhoria da qualidade estrutural, o IHO é igual ao volume de água disponível, entre a CC e o PMP (CAVALIERI et al., 2006).

A variabilidade na textura do solo e os impactos dos sistemas de manejo sobre sua estrutura modificam os atributos físicos do solo na zona radicular, promovendo alterações na amplitude do

IHO. As modificações no conteúdo de água no solo aumentam o impacto da estrutura do solo sobre o crescimento das plantas, de forma que, quanto menor o IHO, maior a probabilidade de ocorrência de limitações físicas para o crescimento das raízes no solo (TORMENA et al., 1998).

Conforme estudos de Tormena et al. (2007), a amplitude do IHO indica a magnitude com que a condição estrutural do solo restringe a qualidade física deste às plantas. Em solos com reduzido IHO, as variações espaciais e temporais de umidade do solo podem predispor as culturas a estresses físicos, por aeração deficiente com solo muito úmido, ou a excessiva RP por ocasião do secamento do solo. No entanto, não havendo limitações térmicas, além do potencial de água no solo, RP e a difusão do oxigênio no solo também afetam o crescimento das plantas. Desta forma e dependendo da textura e da estrutura do solo, limitações ao crescimento das plantas, por reduzida aeração ou elevada RP, podem ocorrer dentro da faixa de água disponível (AD). Em um solo com estrutura degradada, a taxa de difusão do oxigênio pode limitar o crescimento radicular em potenciais correspondentes à umidade do solo igual ou acima da CC, enquanto a excessiva RP pode limitar o crescimento radicular, sob condições mais úmidas que o PMP (TORMENA et al. 1999). Tais aspectos tornam o IHO uma variável útil para quantificar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade do solo, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das plantas.

2.4 Limites do IHO

2.4.1 Limites superiores do IHO

2.4.1.1 Capacidade de campo

De acordo com Veihmeyer & Hendrickson (1950), a CC é a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso tenha drenado e a taxa de movimento tenha decrescido acentuadamente. Em solos permeáveis de estrutura e textura uniformes, isso ocorre dois a três dias depois de uma precipitação de forma natural ou mecânica (KLEIN, 2014).

Conforme Reichardt (1987), toda água adicionada ao solo distribui-se dentro dele de acordo com estados de energia definidos pelo potencial total de água. O movimento dá-se de acordo com as distribuições das condutividades hidráulicas e dos gradientes de potencial total da água, nos diferentes pontos do sistema.

Quando o solo encontra-se na capacidade de campo, os macroporos estão livres de água e os microporos cheios. A classificação do diâmetro dos poros, proposta por Richards (1965) e Estados Unidos (1972), define micro e macroporos aqueles com diâmetro menor e maior que 0,05 mm, respectivamente. Considerando que os macroporos são esvaziados no potencial matricial -0,006 MPa, este pode ser usado para estimar a CC (KLEIN et al., 2006).

Em um solo compactado, Boone et al. (1987) atestaram que a ocorrência de restrições ao crescimento das plantas por excessiva resistência e, ou reduzida difusão de oxigênio no solo foi dependente da variabilidade temporal da umidade devido a distribuição da precipitação.

De acordo com Reichardt (1987), sistemas de manejo que possibilitem a manutenção de maior volume de água disponível para as culturas contribuem para a diminuição do estresse hídrico. Muitos fatores afetam a retenção da água no solo, sendo o principal deles a textura, pois ela determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água, determinando em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros. Arruda et al. (1987) ao correlacionar textura do solo e água disponível, concluíram, que a CC e do PMP baseados somente na textura pode levar a conclusões enganosas.

A CC é conteúdo de água que depende de um processo dinâmico a drenagem extrema do perfil, um comportamento do solo, e não uma característica intrínseca da matriz. Como a drenagem é dinâmica é preciso estabelecer quando o fluxo de drenagem se torna desprezível e, ainda, definir fluxo desprezível. Como isso é subjetivo e depende dos interesses específicos de cada situação, os valores de CC obtidos podem diferir significativamente (REICHARDT, 1987).

2.4.1.2 Porosidade de aeração

A PA é a fração volumétrica de solo ocupada com ar e, ou água, representando 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).

A PA é originária do arranjo aleatório das partículas sólidas. Considerando que todas as partículas do solo sejam esféricas e do mesmo diâmetro, pode-se provar que, independentemente do tamanho das esferas e do seu arranjo. A PA é o volume de poros

vazios de água. Os macroporos são os responsáveis por esses poros de aeração, visto que se esvaziam de água mais facilmente. Alterações na estrutura do solo ocasionadas pela compactação, especificamente em regiões úmidas reduzem a PA. O efeito negativo dessa redução sobre o desenvolvimento das plantas ocorre por deficiência na difusão de gases junto ao sistema radicular das plantas (KLEIN, 2014).

Este fator físico está diretamente relacionado com o crescimento das plantas. Valores-limite desta propriedade em relação ao crescimento das plantas têm sido documentados na literatura. Os resultados obtidos por Grable & Siemer (1968) sugerem a porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como crítica para o crescimento radicular, em função da limitada difusão de oxigênio no solo. A PA de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ tem sido adotada como crítica para o crescimento radicular das plantas, apesar da variação deste valor entre diferentes espécies de plantas. Há indicações na literatura de que em algumas situações este valor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ pode não ser suficiente para atender à demanda do sistema radicular em oxigênio (WATANABE et al., 2000).

A dinâmica dos gases no solo ainda é pouco estudada, pois o estudo físico-analítico dos processos de transferência dos mesmos no solo é muito complexo. A renovação de oxigênio no solo vem da atmosfera superior, por difusão, em solução com a água ou por fluxo de massa, sendo esse o principal processo pela transferência de oxigênio no solo (KLEIN, 2014).

Por sua vez, foi verificado que solos excessivamente porosos são prejudiciais à absorção de água e nutrientes pelas raízes, por causa do menor contato solo/raiz, provocando também um menor desenvolvimento das plantas (HÄKANSSON, 1990; BEUTLER &

CENTURION, 2003). Segundo Klein & Libardi (2002), estudando as alterações que o manejo do solo para fins agrícolas provoca nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, concluíram que o manejo do solo em área irrigada aumentou a D_s até a profundidade de 0,4 m, diminuindo a P_t e alterando a distribuição do diâmetro dos poros, acarretando a conseqüente diminuição do volume de macroporos e aumento de micro e criptoporos, sendo que, em densidades superiores a $1,256 \text{ g cm}^{-3}$ a PA passou a ser limitante inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Klein et al. (2008) em estudo realizado em um Latossolo Vermelho, observaram que a escarificação do solo que foi manejado sob sistema de plantio direto há seis anos aumentou o rendimento de grãos de trigo semeados sete meses após a escarificação, esse processo ocasionou o aumento da porosidade total e da porosidade livre de água durante o ciclo da cultura. Em substratos com plantas hortícolas, as exigências de aeração são distintas de acordo com as plantas cultivadas variando de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para cravos e rosas, até $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para azaléias e orquídeas (KLEIN, 2014).

2.4.2 Limites inferiores do IHO

2.4.2.1 Ponto de murcha permanente

O PMP é um conceito que surgiu a partir de um trabalho desenvolvido por Briggs & Shantz (1912). A partir de então, entende-se como PMP "o teor de água de um solo no qual as folhas de uma planta que nele cresce atingem, pela primeira vez, um murchamento

irrecuperável, mesmo quando colocada em um ambiente escuro e saturado" (VEIHMEYER & HENDRICKSON, 1950; JONG VAN LIER, 2000).

O PMP é uma grandeza física de um solo estimada pelo teor de água retida no potencial matricial de aproximadamente -1500 kPa . Em baixos potenciais matriciais, o teor de água no solo varia pouco (KLEIN, 2014). De acordo com Cassel & Nielsen (1986), é o conteúdo de água para o qual as plantas, crescendo e um ambiente de baixa demanda evaporativa, permanecem murchas é frequentemente medido em laboratório considerando-se como sendo igual, ao teor de água retida quando o solo é submetido a uma tensão de 1500 kPa. Para solos expansivos, pesquisadores relataram que a planta pode morrer mesmo antes de o solo alcançar a tensão de 1500 kPa. No entanto Haise et al. (1955) observaram que há culturas que podem absorver água em tensões mais baixas.

Segundo Klein et al. (2010), para a obtenção do PMP pode ser utilizada a equação $PMP \text{ em } (g \text{ g}^{-1}) = 0,0003 \times \text{argila } (g \text{ kg}^{-1}) + 0,0118$, pois somente com a obtenção de um parâmetro, argila, facilmente obtido, o índice pode ser estimado.

2.4.2.2 Resistência mecânica do solo à penetração

A RP é uma das propriedades físicas do solo que influenciam diretamente no crescimento das raízes e da parte aérea das plantas. A facilidade e a rapidez na obtenção dos resultados, além da possibilidade de um maior número de repetições, são as principais vantagens do uso do penetrômetro (KLEIN, 2014).

A RP tem sido usada, ao longo de muitos anos, com várias aplicações em diversos campos da pesquisa agrônômica (VIEIRA & SIERRA, 1993). Atualmente, várias aplicações estão consolidadas, tais como: detecção de camadas compactadas, estudo da ação de ferramentas de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, predição da força de tração necessária para execução de trabalhos, conhecimento de processos de umedecimento e ressecamento, dentre outras.

A RP é variável (espacial e temporal), influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e à intensidade de tráfego das máquinas agrícolas e é dependente da umidade do solo (MIRANDA, 2006), textura, mineralogia, matéria orgânica e principalmente da Ds. A RP e a Ds são utilizadas para definir níveis a partir dos quais o solo está compactado e requer medidas corretivas. Esta propriedade pode ser usada como referência para monitorar a compactação do solo (KLEIN, 2014).

A maioria dos trabalhos adota a classificação de RP em unidades de MPa proposta por Arshad et al. (1996): a) extremamente baixa: $RP < 0,01$; b) muito baixa: $0,01 \leq RP < 0,1$; c) baixa: $0,1 \leq RP < 1,0$; d) moderada: $1,0 \leq RP < 2,0$; e) alta: $2,0 \leq RP \leq 4,0$; f) muito alta: $4,0 \leq RP < 8,0$; e g) extremamente alta: $RP > 8,0$.

A RP à penetração tem sido utilizada como parâmetro importante na determinação das condições físicas para o crescimento das plantas através da sua relação com o crescimento das raízes. Taylor et al. (1966) trabalhando quatro tipos de solos com estrutura deformada, consideram como RP impeditiva ao crescimento e

desenvolvimento de raízes, o valor de 2,0 MPa. Neste estudo a RP permaneceu, praticamente, constante à profundidade de 0,05 m, com coeficiente de variação baixo o que pode ser explicado pelo fato de o teor de água e a Ds serem mantidos uniformes ao longo da profundidade. Além disso, em solos cujas propriedades mecânicas dependem, essencialmente, das forças de coesão, a RP permanece, praticamente, constante ao longo da profundidade (BILLOT, 1982).

2.5 Variabilidade dos limites do IHO

A variabilidade espacial, horizontal e vertical, de diversas propriedades do solo, é dependente de fatores de formação do solo e fatores relacionados com o manejo do solo (SOUZA et al., 2001).

De acordo com Plant (2001), a variabilidade espacial pode ser influenciada por diferenças de topografia, estrutura do solo, características do lençol freático, microclima e práticas de manejo.

Segundo Aguiar (2008), a estrutura pode ser avaliada pela Ds macro e microporosidade, estabilidade de agregados, RP e infiltração da água no solo. Já para Reinert et al. (2006), a estrutura é avaliada pelos atributos que lhe dão forma, isto é, Ds, geometria, tamanho e continuidade de poros, infiltração, retenção de água e aeração. De maneira similar, a PA, ou porosidade livre de água (LIBARDI, 2000), é diretamente afetada pelos valores de Ds e pelo conteúdo de água no solo. Tomando a Pt como um valor fixo, pode-se dizer que uma parte pode ser ocupada por água e a outra por ar.

A variabilidade é muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e a intensidade de tráfego das máquinas agrícolas

e é dependente da umidade do solo. O tráfego de máquinas agrícolas sobre o solo em condições de menor resistência do solo à deformação ou com umidade excessiva do solo provoca compactação, a qual, geralmente está localizada na profundidade entre $1/3$ e $1/5$ da largura da área de contato dos pneus com o solo (HILLEL, 1980). Anualmente, o tráfego de máquinas ou pisoteio animal sobre o solo, provoca locais de maior estado de compactação dentro da lavoura, principalmente onde o tráfego de máquinas é mais intenso (DA SILVA, 2003).

O conhecimento da variabilidade dos atributos do solo sob diferentes usos e manejos constitui-se numa importante meta para que se possa empregar manejo mais adequado, considerando a aplicação de fertilizantes, estratégias de amostragem e planejamento de delineamento de pesquisa em campo (BHATTI et al., 1991).

O estudo da variabilidade espacial pode ser realizado em grandes áreas, abrangendo diversos tipos de solos (BERG & KLAMT, 1997; COUTO et al., 2000) e em áreas menores (ALBUQUERQUE et al., 1996; SOUZA et al., 1998; OLIVEIRA et al., 1999; ABREU, 2000; DARIVA, 2001). Além da paisagem, o manejo influencia fortemente a variabilidade de propriedades físicas, tais como a porosidade e a condutividade hidráulica saturada (SLAY et al., 1986). Souza et al. (1997) relatam o efeito da variabilidade espacial de outras propriedades físicas como a umidade gravimétrica do solo e teor de argila e químicas do solo (DA SILVA, 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em três locais na camada de 2,5 a 7,5 cm, em uma área de 100 m², na forma de um grid com uma coleta a cada metro. As coletas foram realizadas em áreas sob sistema plantio direto, em solos classificados como Latossolos Vermelho (STRECK et al., 2008), com relevo ondulado e substrato basalto.

3.1 Método de coleta

Para a coleta utilizou-se cilindros de aço inoxidável com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. A inserção do cilindro no solo foi realizada através de um Extrator de Uhland.

Com as amostras com estrutura preservada, determinou-se a Ds, Pt e RP, e a retenção da água na CC (6 kPa).

3.2 Composição granulométrica do solo

A composição granulométrica das amostras com estrutura preservada foi obtida pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) e a separação da fração areia foi feita por lavagem e peneiramento em peneira com malha de 0,053 mm (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição granulométrica das amostras de solo da camada de 2,5 a 7,5 cm, nos diferentes municípios de coleta, com base na média de 100 amostras coletadas por solo. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Solo	Município	Composição granulométrica (g kg ⁻¹)		
		Argila	Silte	Areia
1	Passo Fundo - RS	480	170	370
2	Pontão - RS	520	120	360
3	Tapejara - RS	640	300	060

3.3 Densidade do solo

Para a determinação da D_s pelo método do cilindro volumétrico, foi utilizado um cilindro de aço inoxidável com volume conhecido, para preservar a amostra. A inserção do cilindro no solo por um “castelo”, que recebe as pancadas de um martelo e direciona a penetração do anel no solo. A D_s foi determinada pelo quociente entre a massa de solo seco e o volume do cilindro (EMBRAPA, 1997).

3.4 Densidade dos sólidos do solos

A determinação da densidade dos sólidos do solo foi realizada conforme a metodologia descrita pela Embrapa (1997), para a determinação da P_t dos solos em cada ponto de coleta.

Utilizou-se o método do balão volumétrico 20 g de solo e adicionado uma alíquota de álcool inicial de aproximadamente 25 mL. Foi determinado o volume real presente nos balões volumétricos. Após os balões eram completados com álcool até a altura do menisco.

Ressalta-se que a temperatura ambiente e das amostras foi mantida a ± 20 °C evitando assim a alteração da viscosidade do líquido.

3.5 Porosidade total

A Pt foi determinada pela relação entre Ds e densidade dos sólidos (EMBRAPA, 1997).

3.6 Capacidade de campo e ponto de murcha permanente

As amostras de solo com estrutura preservada foram preparadas, colocando em sua extremidade um tecido que permitisse a passagem de água livremente sem interferência e amarradas com atílio de borracha, posteriormente saturadas por meio de elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja submetidas na tensão de 6 kPa, para a obtenção da CC do solo, utilizando-se funis de placa porosa (Funis de Haynes) e tempo de equilíbrio de 48 horas.

Para a avaliação do PMP utilizou a equação proposta por Klein et al. (2010), que utiliza a argila como o parâmetro para a determinação. que $U_g (g g^{-1}) = 0,0003 \cdot \text{Argila} (g kg^{-1}) + 0,0118$, com o resultado dessa equação, multiplicado pela Ds determinou a Uv.

3.7 Resistência do solo a penetração

A RP foi determinada em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com

velocidade constante de $0,17 \text{ mm s}^{-1}$, equipado com uma célula de carga de 200 N, e haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30° , receptor e interface acoplado a um microcomputador para coleta dos dados através de um software próprio do equipamento.

As 100 amostras foram submetidas ao ensaio gradativamente, secas no ambiente para se obter vários dados em umidades diferentes.

Logo após da realização da RP os dados adquiridos foram manipulados em planilha do excel, utilizando aproximadamente 200 valores centrais das leituras obtidas para em seguida serem ajustadas a RP em relação à D_s e umidade do solo, a um modelo não-linear proposto por Busscher (1990), conforme equação (1).

Para a determinação dos parâmetros a , b e c foi utilizado o *Statistical Analysis System* (SAS INSTITUTE, 1996).

$$\ln RP = a + b \ln D_s - c \ln \theta \quad (1)$$

onde:

a, b, c = Parâmetros empíricos da equação de Busscher

D_s = Densidade do solo (g cm^{-3})

θ = Umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)

Para a determinação da umidade do solo (θ) para dada D_s em que a θ é atingida a RP de 2 MPa utilizou-se a equação 2.

$$\theta = \left(\frac{e^a \cdot D_s^b}{RP \text{ (MPa)}} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (2)$$

Após a determinação da RP as amostras foram secas em estufas a ± 105 °C até massa constante, para determinação da Ds e umidade no solo no momento da determinação.

3.8 Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO)

O IHO foi determinado calculando-se um valor de IHO para cada amostra, em função da Ds. Os limites do IHO foram associados a valores críticos de umidade do solo quanto ao potencial mátrico, RP e PA, representados, respectivamente, pelo teor de água na CC, ou seja, pelo teor de água retida no solo com potencial mátrico de -6 kPa (HAISE et al., 1955; VIEIRA, 2006); no PMP, água retida do solo com potencial mátrico de -1500 kPa (RICHARDS & WEAVER, 1944); RP 2 MPa (TAYLOR et al., 1966); PA é de 10 % (GRABLE & SIEMER, 1968; SOJKA, 1992).

Para cada valor de Ds o IHO é então computado como a diferença entre o limite superior e o inferior. O limite superior é o menor valor de umidade considerando umidade na CC ou PA. O limite inferior é o maior valor de umidade considerando a umidade da RP ou PMP.

3.9 Estatística descritiva

Os parâmetros da estatística descritiva foram obtidos com o objetivo de verificar a existência de tendência central e dispersão dos dados, utilizando para seu cálculo, o SOFTWARE ACTION, (2014), desenvolvido pela ESTATCAMP (2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade do solo e densidade dos sólidos do solo

Na Tabela 2 estão apresentados parâmetros da estatística descritiva da Ds. A variabilidade de um atributo pode ser classificada conforme a magnitude do seu coeficiente de variação (FREDDI et al., 2006; LIMA et al., 2007).

Com base no critério de Warrick & Nielsen (1980) para classificar o coeficiente de variação CV (baixo < 12 %, médio – 12 % a 60 %, alto \geq 60 %), verificou-se que eles são baixos para a densidade do solo (Ds). A Ds apresentou baixos valores de CV de 6,7; 7,4 e 8,5% para os solos 1, 2 e 3, respectivamente, resultados bons para a obtenção do IHO, valores estes semelhantes aos encontrados por Souza et al. (2004). Isso demonstra menor heterogeneidade desse atributo para a área de estudo, como também constataram Grego & Vieira (2005) em experimento sob preparo convencional e Lima et al. (2007) sob semeadura direta.

A Ds (Tabela 2) apresentou assimetria e curtose compatíveis com a distribuição normal (valores próximos de zero). Estes dados concordam com os de Souza (1992) e Souza et al. (1997). Webster (2001) ressalta que valores de assimetria até 0,5 é um indicativo de que um denominado atributo apresente distribuição normal; valores entre 0,5 e 1,0 necessitam de análise por meio de seus quadrados-mínimos para averiguar a tendência de uma distribuição lognormal.

Os valores da média e mediana, para os três solos, mostram distribuições simétricas, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos de zero, 0,3823 solo 1, 0,0016 para o solo 2 e 0,4851 no solo 3. Pelo teste aplicado de Shapiro-Wilks (W), a Ds apresentou distribuição normal a 5% de probabilidade para todos os solos estudados.

Tabela 2 - Parâmetros da estatística descritiva da densidade dos três solos. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Medida Estatística Descritiva	Densidade do Solo (g cm ⁻³)		
	Solos		
	1	2	3
M	100	100	100
Média	1,3988	1,3690	1,2405
Mediana	1,3929	1,3628	1,2355
Desvio padrão	0,0941	0,1013	0,1057
Variância	0,0088	0,0102	0,0111
Valor mínimo	1,1785	1,0615	1,0293
Valor máximo	1,6903	1,5988	1,5144
Amplitude	0,5117	0,5372	0,4851
Coefficiente de variação ⁽¹⁾	0,0672	0,0740	0,0852
Assimetria ⁽¹⁾	0,3823	0,0016	0,4851
Curtose ⁽¹⁾	0,5055	0,0925	-0,2002
1° Quartil	1,3429	1,3071	1,1659
3° Quartil	1,4587	1,4375	1,3045
W	0,9775	0,9904	0,9792
p-valor	0,0849*	0,0704*	0,1161*

⁽¹⁾ Os dados de coeficientes de variação, assimetria e curtose são adimensionais, * - distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilks a 5% de probabilidade.

Os diagramas de superfície constituem uma ferramenta de melhor visualização da variabilidade dos valores estimados, representados no campo tridimensional. Na Figura 1, pode-se observar a Ds para os solos 1, 2 e 3, com maiores valores concentrado na parte superior da superfície, correspondendo à área de cota mais elevada da área experimental.

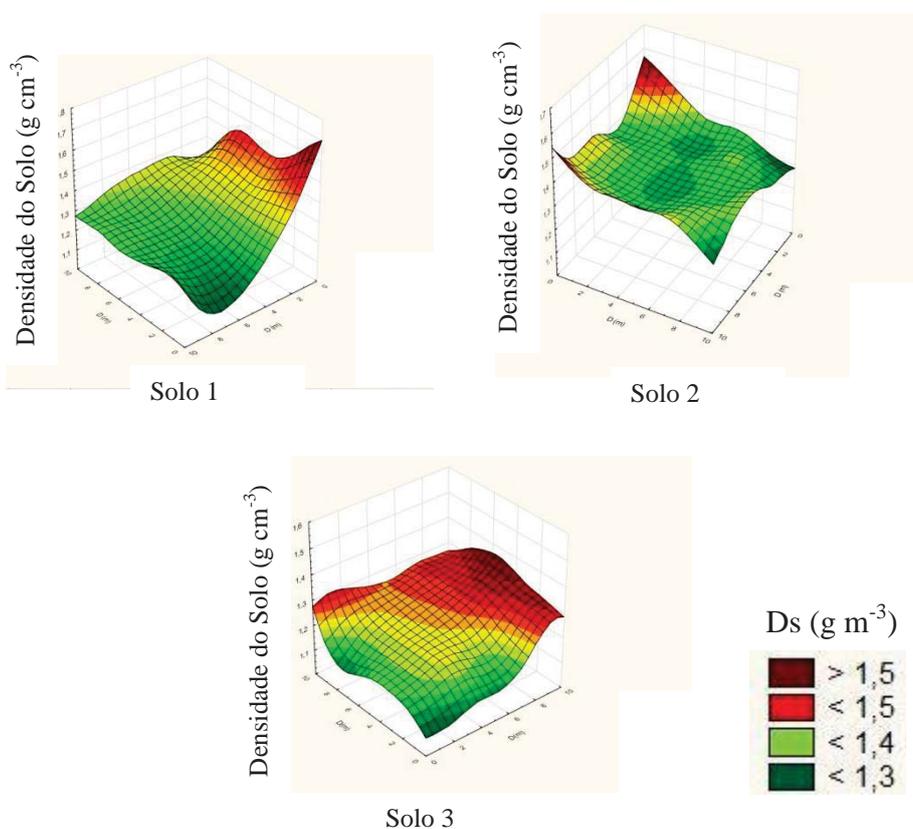


Figura 1 – Diagrama tridimensional da densidade (Ds) nos três solos. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

O “Box-Plot” (HOAGLIN et al., 1992; LIBARDI et al., 1996), que é uma das técnicas de análise exploratória de dados, foi

elaborado para os solos. A partir da análise na Ds (Figura 2), sobre possíveis valores periféricos, candidatos a “*outliers*”, mostrou que a Ds no solo 1 apresentou três valores, 1,69; 1,64 e 1,63 g cm⁻³. Nos solos 2 e 3, onde se verificou um valor periférico em cada tipo de solo, e então foram eliminados. No solo 2 foi eliminado o valor de 1,061 g cm⁻³, e no solo 3 o valor de 1,514 g cm⁻³.

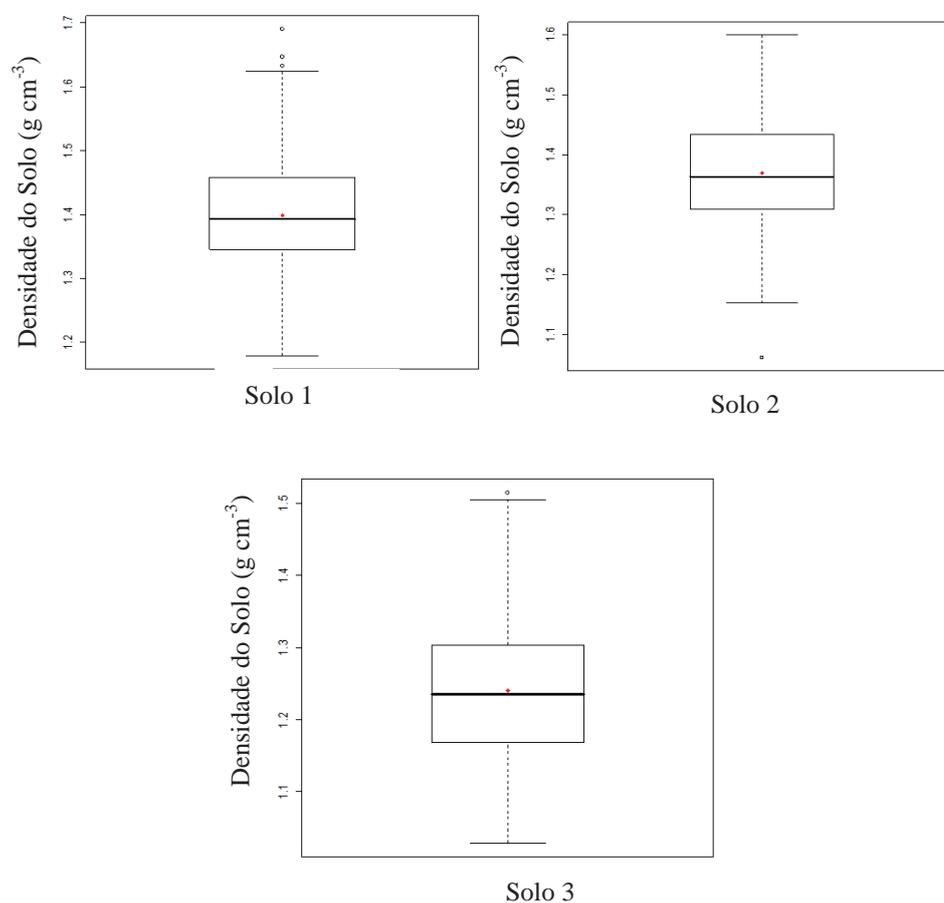


Figura 2 – *Outliers* da densidade do solo nos solo 1, 2 e 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

Mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, em que a média e a variabilidade dos dados são constantes na área de estudo (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Nota-se que a atitude tomada, rejeitando-se todos os candidatos a “outliers”, refletiu-se mais notavelmente na assimetria e curtose em todos os solos (Tabela 3). As variâncias, dentro de cada solo, diminuíram após a retirada dos valores periféricos. No solo 1, quando a análise verificou o maior número de valores periféricos, a redução do desvio-padrão, após a eliminação destes valores, foi acentuada, confirmando como correta esta atitude.

Aplicando o teste de Shapiro-Wilks novamente, percebe-se que a normalidade dos dados teve um aumento comparando com a análise anterior.

Tabela 3 - Parâmetros da estatística descritiva da densidade do solo com a retirada dos *outliers*. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Medida Estatística Descritiva	Densidade do solo (g cm ⁻³)		
	Solos		
	1	2	3
M	97	99	99
Média	1,3908	1,3721	1,2378
Mediana	1,3913	1,3640	1,2346
Desvio padrão	0,0835	0,0969	0,1031
Variância	0,0069	0,0094	0,0105
Valor mínimo	1,1785	1,1527	1,0293
Valor máximo	1,6243	1,5988	1,5049
Amplitude	0,4457	0,4461	0,4756
Coefficiente de variação ⁽¹⁾	0,0600	0,0699	0,0832
Assimetria ⁽¹⁾	-0,0861	0,2287	0,3659
Curtose ⁽¹⁾	-0,2239	-0,3280	-0,2840
1º Quartil	1,3353	1,3099	1,1634
3º Quartil	1,4548	1,4403	1,3032
W	0,9883	0,9877	0,9833
p-valor	0,5579*	0,4971*	0,2464*

⁽¹⁾ Os dados de coeficientes de variação, assimetria e curtose são adimensionais, * - distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilks a 5% de probabilidade.

Com os outliers excluídos calculou-se os limites do IHO.

Em relação a densidade dos sólidos do solo (Tabela 4), embora tenham apresentados valores acima do valor médio 2,65g cm⁻³, mostram uma uniformidade em todos os solos analisados sendo indicativo de que todas elas derivam de um mesmo material parietal.

Estatística descritiva da Dss, para o CV apresentou valores semelhantes para todos os solos, próximo de 3%, valor considerado baixo. Para a distribuição normal do dados, analisando e seguindo os

mesmos critérios das demais interpretações o solo 1 e 3 apresentam uma tendência a distribuição normal, o que foi confirmado aplicando o teste de normalidade. Para o solo 2, isso não foi o que aconteceu, foi rejeitado no teste de Shapiro-Wilks. A não normalidade também foi observada por Silva (1988), para este atributo. A falta de normalidade para a Dss no solo 3 pode estar relacionada com a deposição de materiais carregados pela chuva, de área localizadas acima do relevo e de se tratar de um solo mais arenoso, proporcionando o surgimento de subáreas com dados atípicos.

Tabela 4 - Parâmetros da estatística descritiva da densidade dos sólidos do solo. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Medida Estatística Descritiva	Densidade dos Sólidos do Solo (g/cm ³)		
	Solos		
	1	2	3
Média	2,5011	2,5119	2,7686
Mediana	2,4953	2,5125	2,7662
Desvio padrão	0,0826	0,0884	0,0856
Variância	0,0068	0,0078	0,0073
Valor mínimo	2,3228	2,3391	2,5220
Valor máximo	2,7777	2,7339	2,8967
Amplitude	0,4548	0,5847	0,4452
Coefficiente de variação ⁽¹⁾	0,0330	0,0352	0,0309
Assimetria ⁽¹⁾	0,6497	0,9715	-0,1108
Curtose ⁽¹⁾	0,9983	3,3839	-0,1901
1° Quartil	2,4427	2,4532	2,7063
3° Quartil	2,5534	2,5657	2,8318
W	0,96	0,94	0,98
p-valor	0,02*	0,0003	0,47*

⁽¹⁾ Os dados de coeficientes de variação, assimetria e curtose são adimensionais, * - distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilks a 5% de probabilidade.

4.2 Porosidade total

O menor valor do CV para a Pt (Tabela 5), foi no solo 3, com um valor de 7,01%, e os solos 1 e 2, ficaram com valores muito próximos 9,7 e 9,9% respectivamente, Segundo a classificação proposta por Gomes (2000) todas as variáveis analisadas apresentaram o CV baixo, isto é, abaixo de 10%, valores esses também encontrados por Souza et al. (2001).

Já a assimetria da Pt apresentou valores mais distintos, confirmado pelos valores de assimetria próximos de zero, -0,4656 no solo 1, 0,0369 para o solo 2 e -0,1638 no solo 3. Como a assimetria foi negativa em dois solos, a cauda da distribuição normal está do lado esquerdo do gráfico dos mesmos. Pelo teste aplicado de Shapiro-Wilks (W), a Pt apresentou distribuição normal a 5% de probabilidade para todos os solos estudados.

Quando um conjunto de dados aproxima-se de uma distribuição normal, os coeficientes de assimetria e de curtose aproximam-se de zero, a média e a mediana assumem valores similares e podem ser utilizados eficientemente para caracterizar a população amostral de onde foram retirados. Neste caso, a Pt apresentou distribuição de frequência do tipo normal, concordando com o verificado por Souza et al. (2001).

Tabela 5 - Parâmetros da estatística descritiva da porosidade total.
FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Medida Estatística Descritiva	Porosidade total (m ³ m ⁻³)		
	Solos		
	1	2	3
Média	0,4400	0,4542	0,5516
Mediana	0,4407	0,4566	0,5515
Desvio padrão	0,0427	0,0451	0,0386
Variância	0,0018	0,0020	0,0014
Valor mínimo	0,3061	0,3566	0,4559
Valor máximo	0,5462	0,5732	0,6304
Amplitude	0,2401	0,2166	0,1745
Coefficiente de variação ⁽¹⁾	0,0970	0,0994	0,0701
Assimetria ⁽¹⁾	-0,4656	0,0369	-0,1638
Curtose ⁽¹⁾	0,4297	-0,3922	-0,5725
1º Quartil	0,4147	0,4195	0,5216
3º Quartil	0,4697	0,4854	0,5838
W	0,9827	0,9921	0,9880
p-valor	0,2162*	0,8344*	0,5098*

⁽¹⁾ Os dados de coeficientes de variação, assimetria e curtose são adimensionais, * - distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilks a 5% de probabilidade.

4.3 Porosidade de aeração

A fração do volume mínimo de poros livres de água 0,10 (m³ m⁻³), sob pena de acarretar problemas ao desenvolvimento das plantas. Os valores desse ajuste consistem em diminuir da Pt o volume de poros livre de água desejado, obtendo-se assim a condição em que umidade volumétrica do solo seja tal que restam 0,10 (m³ m⁻³) solo de poros livres de água.

Como a P_t , para um solo com a mesma densidade de sólidos, é inversamente proporcional a D_s e como essa apresenta baixa variação entre as amostras. Na Figura 3 para o solo 1, observa-se que, o aumento da D_s , faz com que ocorra a diminuição do espaço poroso com água.

A variação da PA na condição de CC em diferentes tipos de solo é grande. A D_s é um indicador do “status” de PA do solo, amplamente utilizado, um baixo valor de PA é um indicativo da baixa difusividade de oxigênio no solo para as raízes das plantas, estando diretamente relacionado à redução do volume de macroporos (STEPNIEWSKI et al., 1994).

Os resultados indicaram que, nos diferentes solos, a PA é negativamente relacionada com a D_s (Figuras 3, 4 e 5). Visto que, com o aumento da D_s , os macroporos são os mais afetados. Villela (2007) estudando a variabilidade da qualidade física dos solos de área de pastejo percebeu que na camada superficial a maioria dos pontos analisados da PA tiveram resultados elevados ($0,2 - 0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A pastagem, de modo geral, apresentou-se melhor do ponto de vista de PA. Já em profundidade, em uma área com valores muito altos de argila pode-se observar a ocorrência de pequena área de restrição potencial ao desenvolvimento radicular por PA.

Da Silva (2003), estudando propriedades físicas e hídricas em solos com diferentes estado de compactação, percebeu que durante o ciclo do trigo, o solo permaneceu com maior umidade e, nas condições de pequena macroporosidade identificadas no tratamento com o maior estado de compactação, o suprimento de oxigênio para as raízes foi deficiente. Nesmith (1987) verificaram menor produtividade

de trigo cultivado em plantio direto em relação ao preparo convencional e a subsolagem, atribuindo a menor produção no plantio direto à maior RP, maior Ds e possível deficiência de aeração no solo, visto que o teor de água no solo foi maior no plantio direto nos primeiros 15 cm de solo.

As variações espaciais dos mais diversos atributos físicos tais como a Ds e a PA condicionam a distribuição de água no solo e consequentemente o rendimento das culturas.

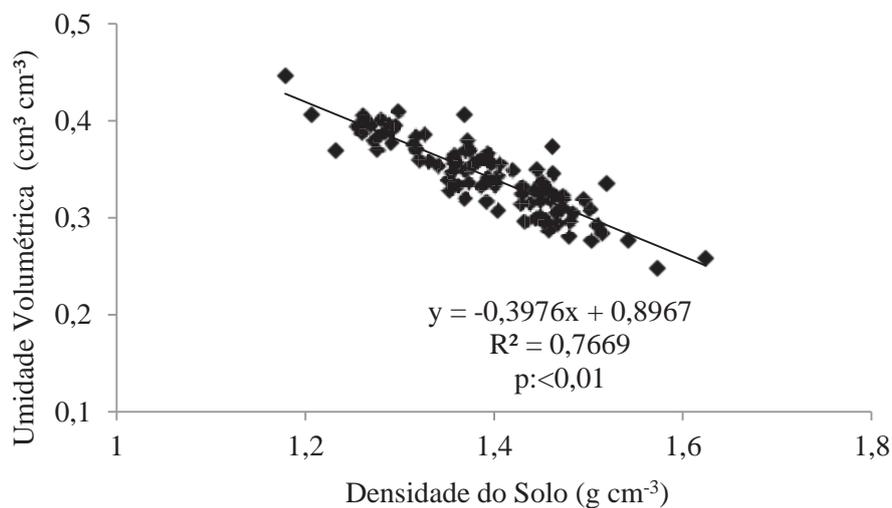


Figura 3- Umidade volumétrica do solo na qual é atingida a porosidade de aeração de 0,10 (m³ m⁻³) em função da densidade no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

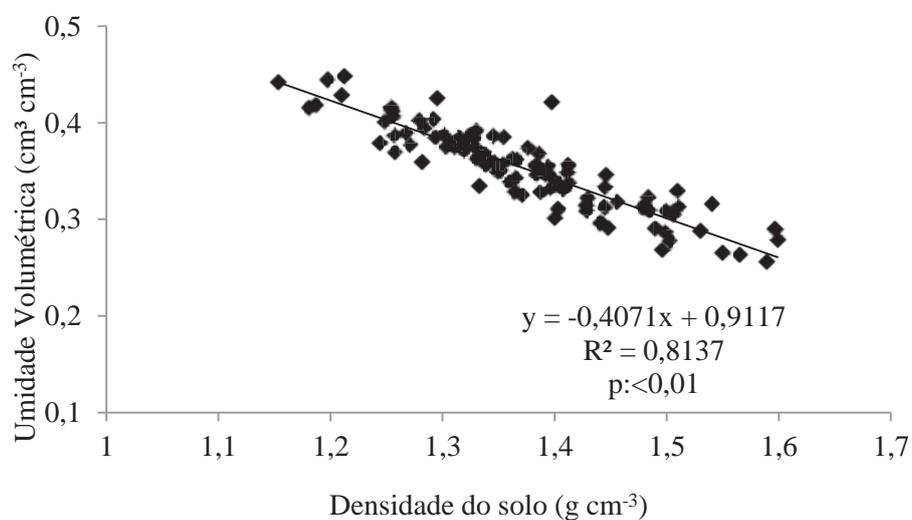


Figura 4- Umidade volumétrica do solo na qual é atingida a porosidade de aeração de 0,10 (m³ m⁻³) em função da densidade no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

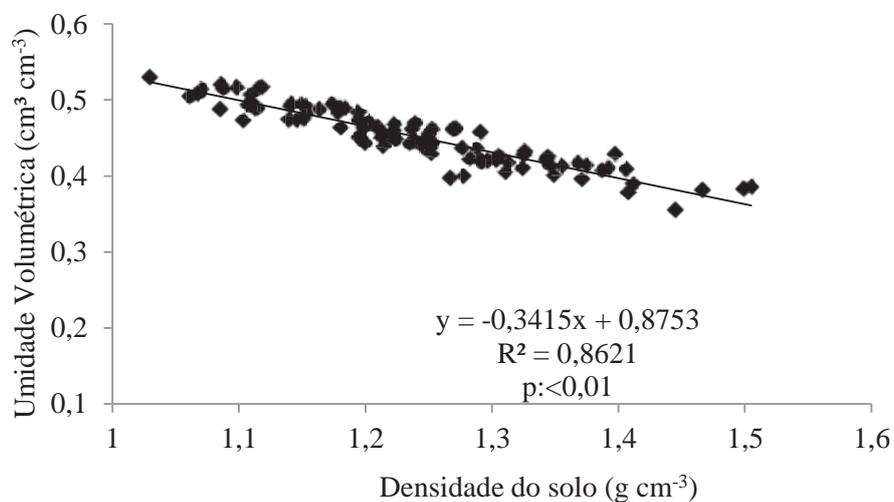


Figura 5- Umidade volumétrica do solo na qual é atingida a porosidade de aeração de 0,10 (m³ m⁻³) em função da densidade no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

Os solos 1, 2 e 3 apresentam um ajuste da equação ($R^2 = 0,76; 0,81$ e $0,86\%$ respectivamente), indicando que no solo 1, 76% da variação do teor de água na PA podem ser atribuídos a D_s . No solo 2, 81% da variação do teor de água na PA podem ser atribuídos a D_s e para o solo 3 a variação do teor de água na PA é maior, sendo 86%. Existe essa variação devido que a D_p não é constante. Todos os solos para a variável porosidade de aeração apresentaram nível de significância de 0,01%.

4.4 Conteúdo de água a 6 kPa

Nas Figuras 6, 7 e 8 estão apresentados a umidade em função da D_s em amostras submetidas à tensão de 6 kPa até o equilíbrio e os ajuste dos resultados experimentais a equação linear, que demonstram elevada variabilidade. Nos três tipos de solo ocorreu aumento da CC conforme a D_s aumenta, isto pode ser justificado pela alteração no arranjo dos poros no solo.

O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo pode contribuir na definição de melhores estratégias para o manejo (SCHAFFRATH et al., 2008).

Para maioria dos estudos tem demonstrado uma ampla diversidade de resultados, com variação entre os locais estudados (GREGO & VIEIRA, 2005).

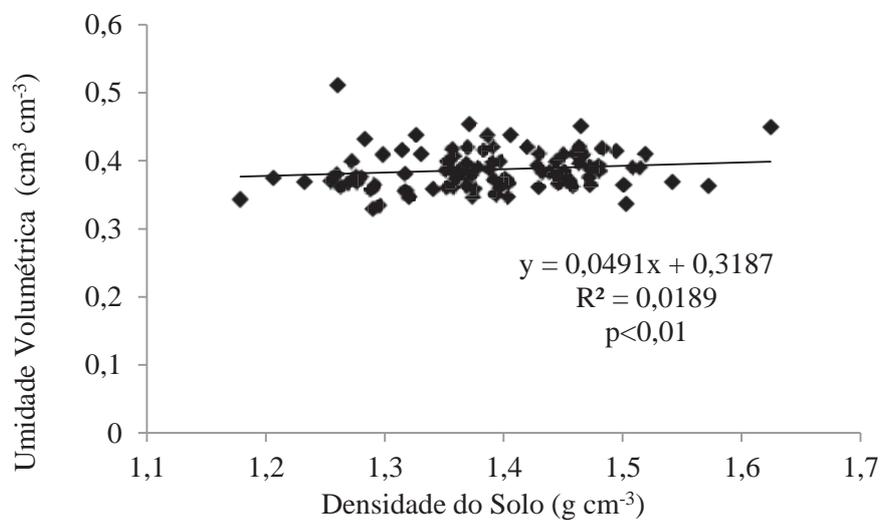


Figura 6- Umidade volumétrica a 6 kPa do solo na qual é atingida a capacidade de campo em função da densidade no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

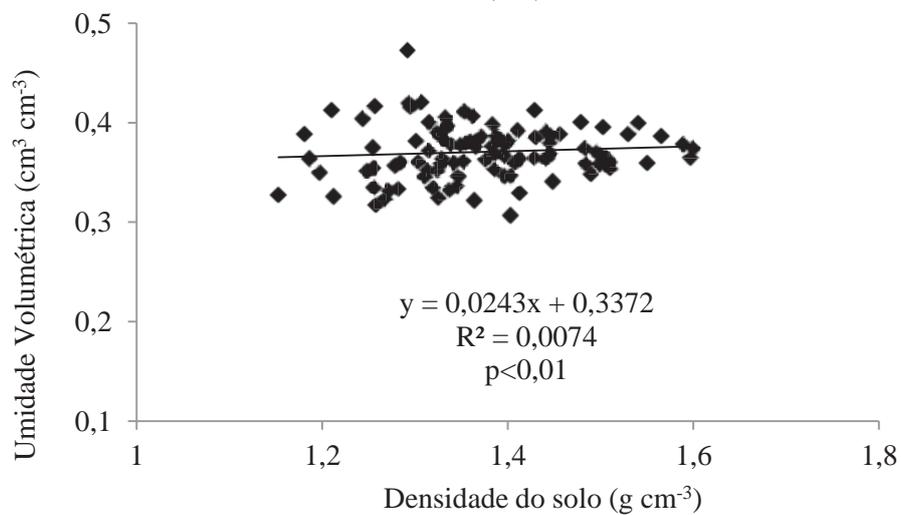


Figura 7- Umidade volumétrica a 6 kPa do solo na qual é atingida a capacidade de campo em função da densidade no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

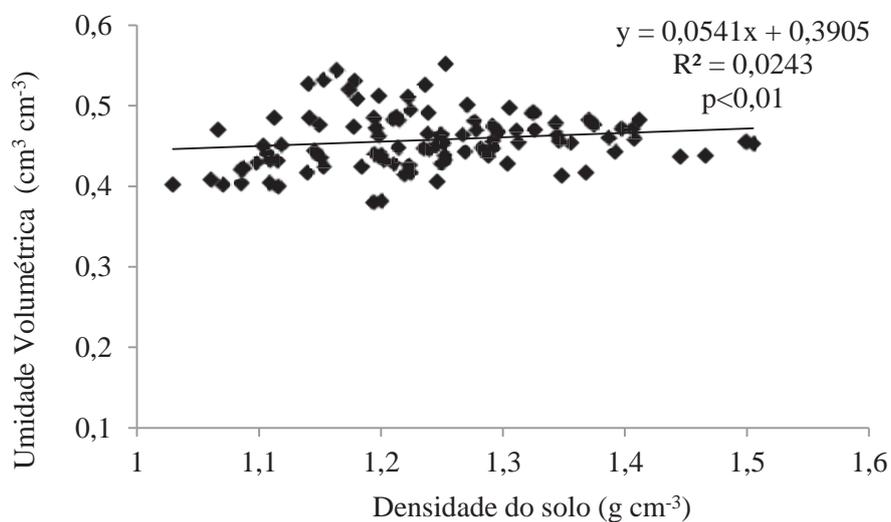


Figura 8- Umidade volumétrica a 6 kPa do solo na qual é atingida a capacidade de campo em função da densidade no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

O ajuste dos resultados experimentais a equação linear, demonstra uma elevada variabilidade que ocorre nessa determinação. O coeficiente de determinação de 0,018 para o solo 1 indica que somente 1,8% da variação da umidade volumétrica é determinada pela D_s , já para o solo 2, este valor é ainda menor apenas 0,07% da variação da umidade volumétrica é influenciada pela D_s . No solo 3 o valor se aproxima do solo 1, com um coeficiente de determinação de 0,024, indicando uma influência pela D_s de 2,4%.

4.5 Ponto de murcha permanente

O PMP é um dos limites inferior do IHO e é obtido determinando-se a D_s e a umidade volumétrica no potencial mátrico de -1500 kPa, conforme Figuras 9, 10 e 11.

O PMP é usado para representar o teor de umidade no solo, abaixo da qual a planta não conseguirá retirar a água do solo, na mesma intensidade em que ela transpira, aumentando a cada instante a deficiência de água na planta, o que a levará à morte, caso não ocorra uma precipitação ou irrigação. O PMP nada mais é que o teor mínimo da água armazenada no solo que será usada pelos vegetais. Este conceito é muito útil, mas o seu valor depende do tipo de solo e que diferentes plantas têm a capacidade de extrair água até diferentes limites (BERNARDO, 1982).

A retenção de água em tensões elevadas é função principalmente da textura do solo, correspondendo à água retida em poros de dimensões microscópicas e em películas muito finas ao redor das partículas individuais de solo (BRADY & WEIL, 1999). Deste modo, o aumento do conteúdo de água retido no PMP com o incremento da densidade do solo pode ser atribuído ao aumento do número de partículas disponíveis para a retenção de água por volume de solo, decorrente da compactação (VAN DEN BERG et al., 1997).

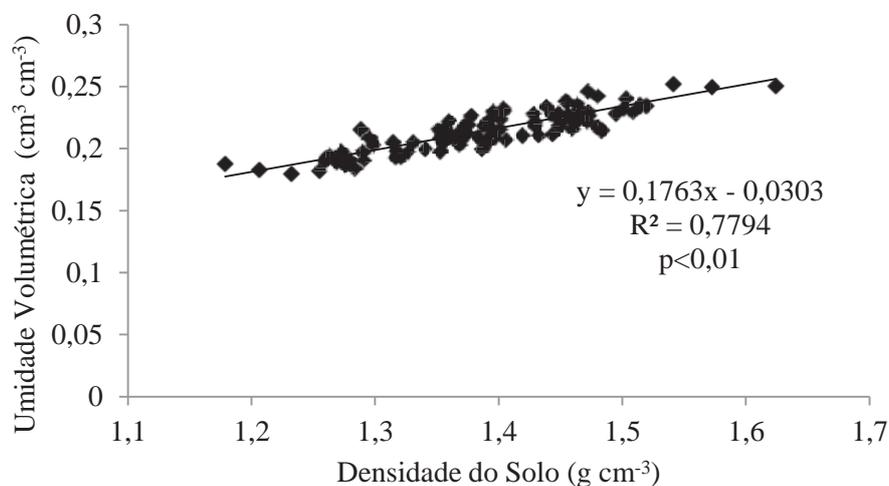


Figura 9- Umidade volumétrica do solo na qual é atingido o ponto de murcha permanente em função da densidade no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

Klein et al. (2006) compararam valores de umidade no PMP, por métodos de laboratórios e fisiológico, utilizando as culturas do milho e do girassol, em um solo argiloso, e encontraram valores menores para o método fisiológico quando comparados com os valores determinados pelo método de laboratório. De forma semelhante, Souza et al (2000), indicando também que o método de laboratório apresentou maior umidade do que o método fisiológico. Estes valores do trabalho foram obtidos através do teor de argila de cada amostra utilizando a equação proposta por Klein et al. (2010). A variabilidade que ocorre no PMP é dependente do teor de argila e da densidade do solo.

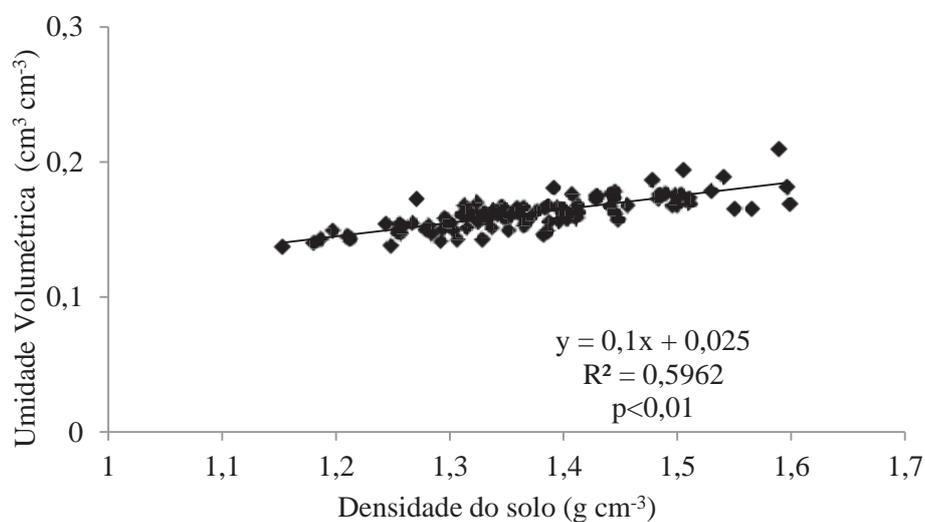


Figura 10- Umidade volumétrica do solo na qual é atingido o ponto de murcha permanente em função da densidade no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

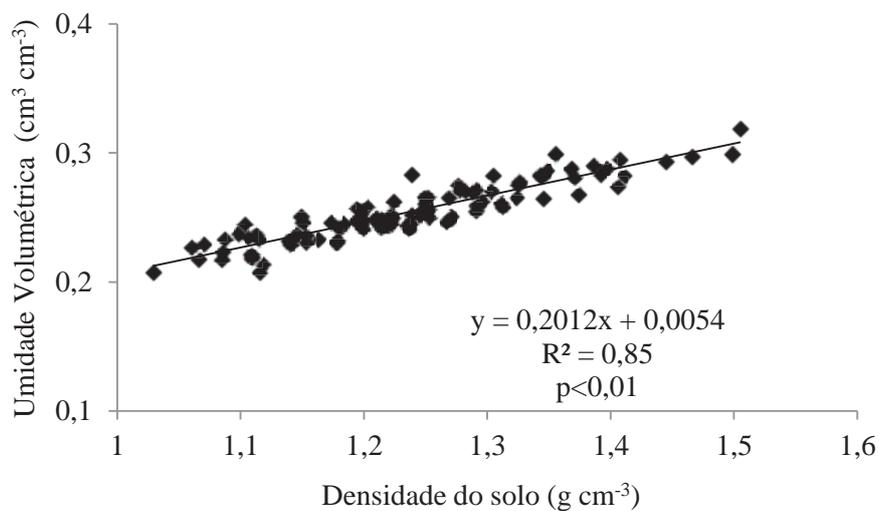


Figura 11- Umidade volumétrica do solo na qual é atingido o ponto de murcha permanente em função da densidade no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

Ajustando os dados a uma equação de 1º grau constata-se que o ajuste da umidade volumétrica em função da densidade do solo

é significativo a 1% de probabilidade para os três solos, isso ocorre devido ao número de amostras ser alto. No solo 1, 77% da variação do teor de água no ponto de murcha permanente podem ser atribuídos a D_s , já para o solo 2 esse valor diminui em 18%, chegando em 59%, o solo que atingiu a maior dependência da D_s na quantidade de água no ponto de murcha permanente foi o solo 3, com 85%.

4.6 Resistência mecânica do solo à penetração

Em relação a este limite do IHO um dos maiores problemas é a definição do nível de resistência limitante ao crescimento do sistema radicular sendo o mais utilizado o limite de 2 MPa. No entanto, Klein & Camara (2007) destacam que para a cultura da soja esse valor não se apresentou como limitante, pois a cultura se desenvolveu sem problemas e com altos rendimentos em níveis de resistência superiores durante todo o ciclo da cultura.

Por outro lado existe ainda a variabilidade espacial da RP. Correchel et al. (1997) determinaram que num Latossolo Roxo sob plantio direto, na camada de 0 - 0,07 m, de 96 amostras analisadas somente 37,5%, apresentaram valores de RP superiores a 2 MPa, na tensão de 30 kPa, o que poderá ou não afetar o crescimento das raízes, por estas possuírem grande capacidade de adaptação, buscando sempre a região de menor resistência.

De acordo com Sarvasi (1994), é comum encontrar solos com uma camada compactada no fundo dos sulcos de aração e gradagem. Vieira et al. (1989) denominam esta camada de “pé de

arado” e atribuíram sua formação ao uso de quase todos os implementos agrícolas, quando operados em condições de solo úmido.

A RP tem sido utilizada como parâmetro importante na determinação das condições físicas para o crescimento das plantas através da sua relação com o crescimento das raízes. Taylor et al. (1966), trabalhando com quatro tipos de solos consideram como RP impeditiva ao crescimento e desenvolvimento de raízes, o valor de 2,0 MPa.

Os parâmetros empíricos e o coeficiente de determinação dos ajustes aos dados apresentados à equação de Busscher (1990) estão apresentados na tabela 6. Observou-se que mesmo sendo altamente significativo o ajuste para o solo 1 explicou 41% da variabilidade dos dados de RP, já para o solo 2, alcançou a maior porcentagem, 78%, o solo 3 também foi baixo sendo essa representada por 47 %.

Tabela 6 - Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para resistência a penetração do solo, em função do conteúdo volumétrico da água e densidade do solo $\ln RP = a + b \ln Ds - c \ln \theta$ nos três solos FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Solo	Ajustes				
	a	b	C	R ²	P
Solo 1	-4,0044	5,7034	2,25854	0,41	< 0,01
Solo 2	-4,8013	4,1915	2,88875	0,78	< 0,01
Solo 3	-3,9852	4,7579	3,78640	0,47	< 0,01

As Figuras 12, 13 e 14, demonstram que a relação entre RP medida com a estimada é grande. Apesar de ser significativa, há necessidade de aumentar o número de observações para melhorar a relação entre as variáveis do modelo ou construir equações de ajustes específicas para cada coleção de dados. Esse tipo de modelo tem sido frequentemente usado (SILVA et al., 1994; REINERT et al., 2001; SILVA, 2003) para elaborar os gráficos para estimativa da faixa de umidade do solo pouco limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

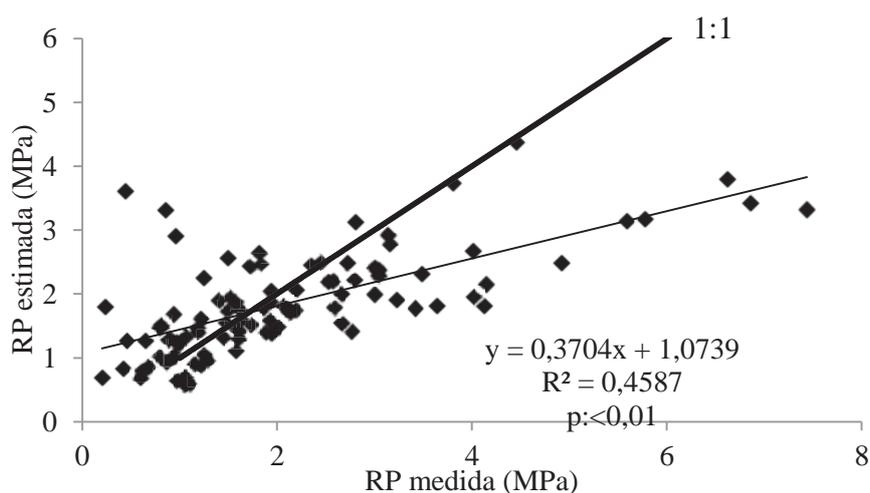


Figura 12- Relação entre a resistência do solo à penetração (RP) estimada e medida no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

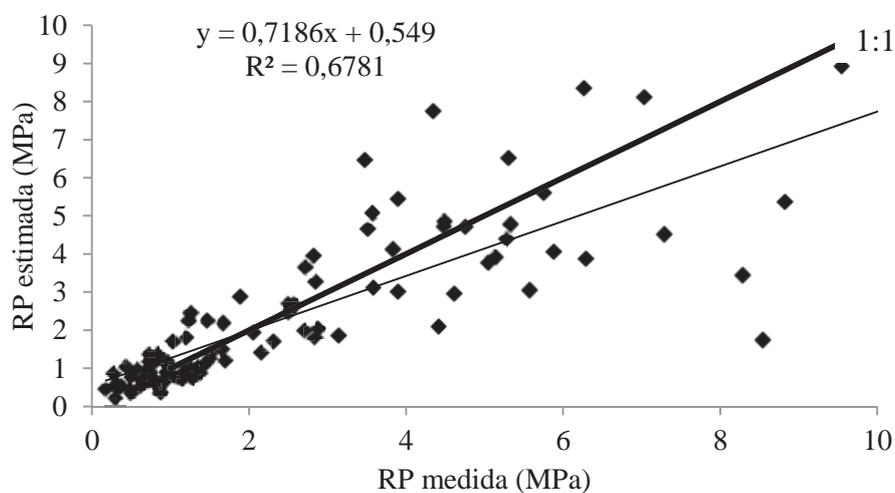


Figura 13- Relação entre a resistência do solo à penetração (RP) estimada e medida no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

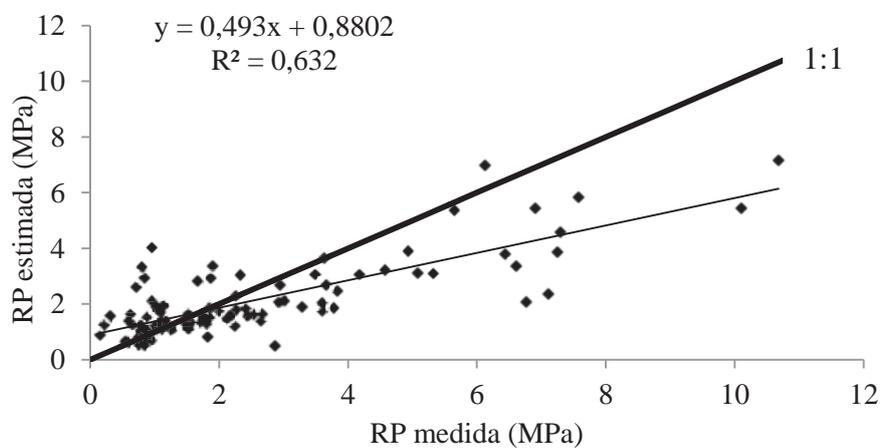


Figura 14- Relação entre a resistência do solo à penetração (RP) estimada e medida no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

4.7 Intervalo hídrico ótimo

Nas Figuras 15, 16 e 17 percebe-se que a PA é progressivamente reduzida com o aumento da Ds, conforme constatado por Archer & Smith (1972) e Silva et al. (1994). No solo 1, a PA limitante de $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ocorreu apenas na máxima Ds medida de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$, indicando que, em Ds inferiores, as plantas não terão o desenvolvimento limitado pela reduzida difusão de oxigênio no solo. Já para o solo 2, a Ds medida foi $1,32 \text{ g cm}^{-3}$, e no solo 3 essa Ds ficou em $1,23 \text{ g cm}^{-3}$. É possível que, para maiores valores de Ds, a umidade da PA pode constituir uma limitação ao crescimento do sistema radicular.

Verificou-se que a RP é a variável que mais frequentemente reduz o IHO (TORMENA et al., 1998; ZOU et al., 2000; LEÃO et al., 2005). No entanto, o impacto da RP no IHO depende do valor de RP crítico adotado: por exemplo, valores de RP entre 2,0 e 3,0 MPa podem causar redução de cerca de 50 % no crescimento das raízes (BENGOUGH & MULLINS, 1990), e para $RP \geq 3,0 \text{ MPa}$ o crescimento radicular pode ser fortemente impedido (HORN & BAUMGARTL, 2000).

No solo 1 umidade na RP de 2 MPa substituiu a umidade do PMP limitante nos valores de $Ds \geq 1,32 \text{ g cm}^{-3}$. Tais resultados estão de acordo com os obtidos por Topp et al. (1994) e Silva et al. (1994), nos quais a RP foi o fator que mais frequentemente reduziu o IHO em solos sob diferentes condições de textura e manejo. Nos solos 2 e 3 esse valor passa a ser limitante em qualquer densidade.

A D_s em que $IHO = 0$ é denominada de densidade crítica do solo (D_{sc}) (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2001). Quando $D_s > D_{sc}$, há indicações de severa degradação estrutural do solo, restringindo o crescimento das plantas. Os valores de D_{sc} variam com o solo e com as condições de manejo (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2001; LEÃO et al., 2004). Potencialmente, sistemas de manejo que propiciam maior frequência de $D_s < D_{sc}$ oferecem menores restrições físicas às plantas.

No solo 1 a D_{sc} , ocorre em $1,43 \text{ g cm}^{-3}$, já para o solo 2 é maior que $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, onde que este solo não apresentou D_{sc} em seus resultados, já para o solo 3, é em $1,32 \text{ g cm}^{-3}$.

Lima et al. (2006) relataram que ainda não existem valores restritivos específicos para a D_{sc} . Silva et al. (2002), verificaram que a D_{sc} passou de $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ para o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico para $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ para o Latossolo Vermelho Distroférrico.

A importância do estudo da variação temporal do IHO é útil para evitar interpretações equivocadas, por ter sido realizada em uma época em que a combinação de fatores (climáticos e tráfego após colheita ou semeadura) poderia expressar uma condição de qualidade física do solo que não seria aquela mais frequente durante todo o ciclo das culturas.

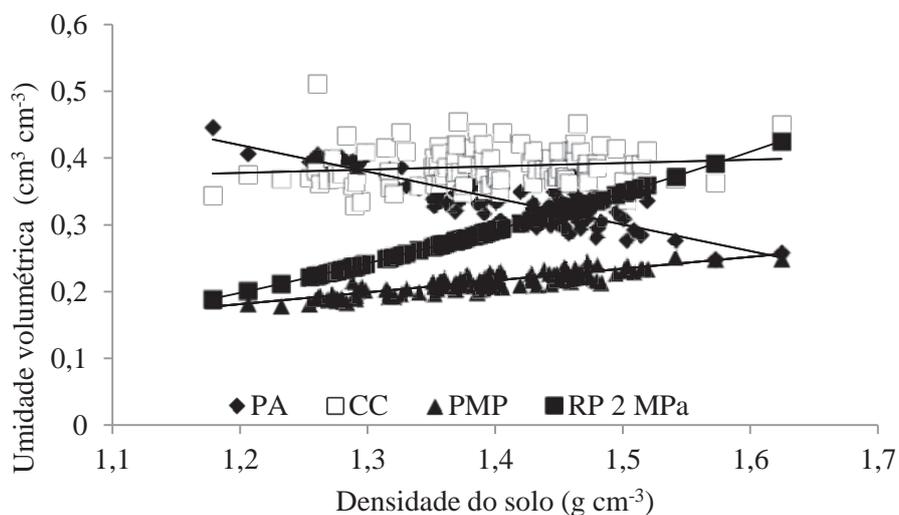


Figura 15- Conteúdo de água nos limites do IHO em função da densidade do solo. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP) no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

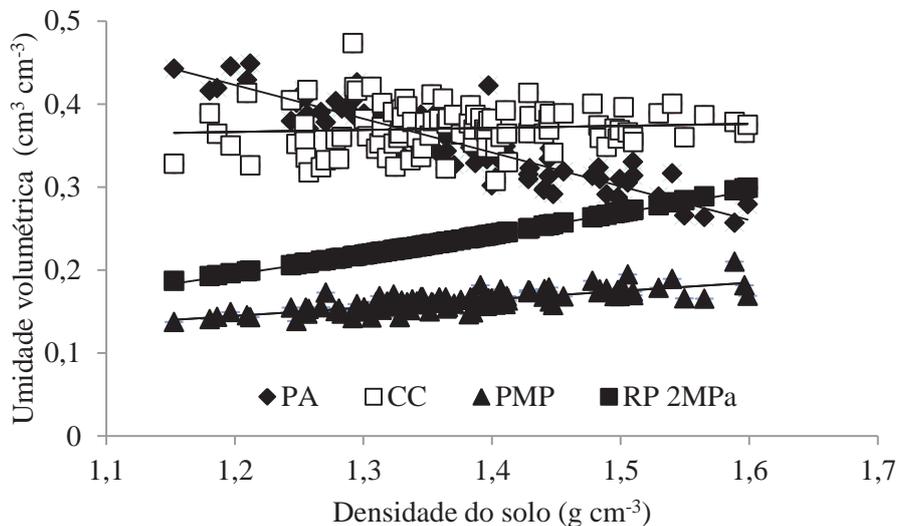


Figura 16- Conteúdo de água nos limites do IHO em função da densidade do solo. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP) no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

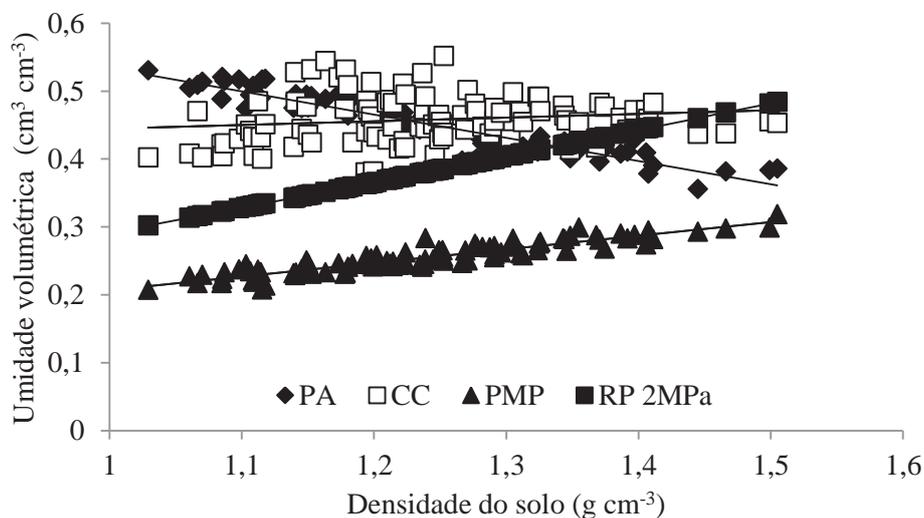


Figura 17- Conteúdo de água nos limites do IHO em função da densidade do solo. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP) no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

A dependência do IHO com D_s é demonstrada nas Figuras 18, 19 e 20.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Silva et al. (1994) num solo de textura arenosa no Canadá, demonstrando que os Latossolos argilosos, com microagregação bastante desenvolvida, comportam-se similarmente aos solos arenosos em termos de retenção de água. Para o intervalo de densidades obtidas, os valores de umidade na RP, umidade na PA e umidade na CC foram fortemente influenciados pela D_s .

Em Latossolo sob mata nativa, Fontanela (2008) observou que a umidade no PMP foi o limite inferior do IHO e em áreas agrícolas, a umidade na RP. Dessa forma, o revolvimento e o tráfego de máquinas alteram a estrutura do solo, aumentando a D_s e reduzindo

a macroporosidade do solo, nessas condições, as limitações físicas ao crescimento de plantas podem ser atingidas com menores variações no conteúdo de água do solo, e a resposta da planta vai depender da magnitude e da duração da RP oferecida pelo solo (BENGOUGH et al., 2006).

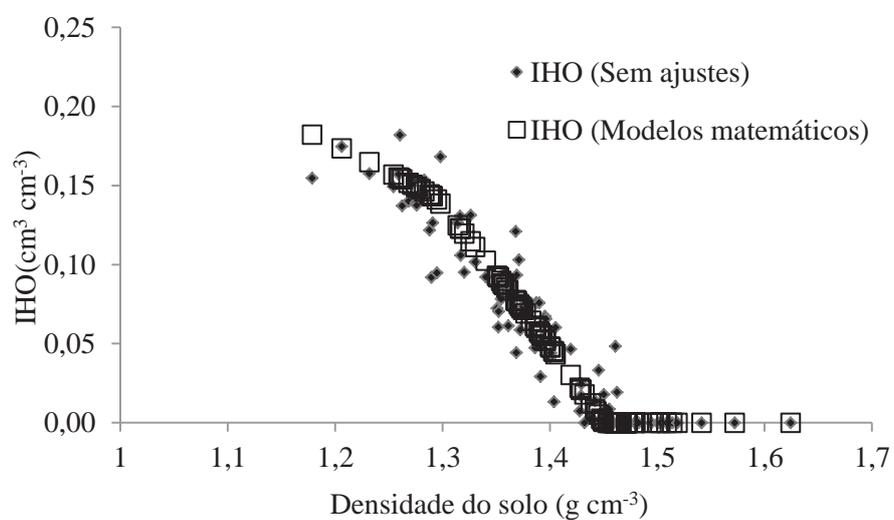


Figura 18- Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

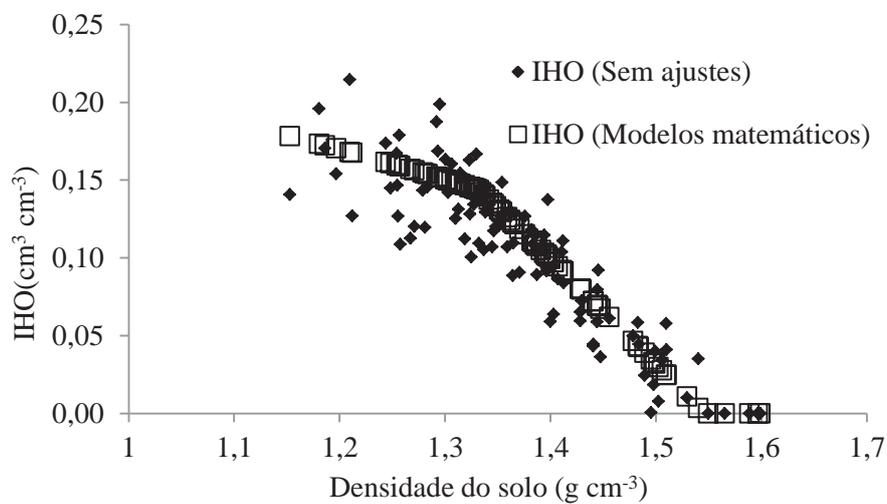


Figura 19- Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

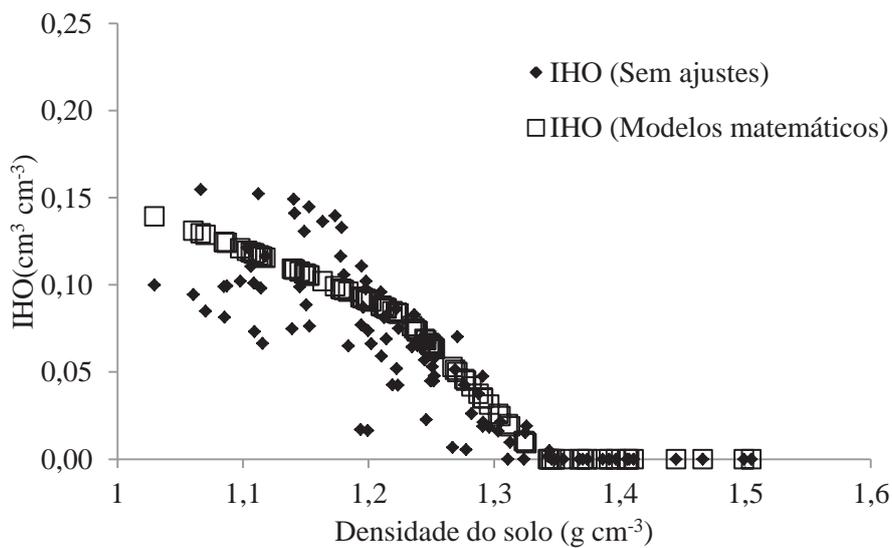


Figura 20- Variação do Intervalo Hídrico Ótimo em função da densidade no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

Na Figura 21 e na Tabela 7, os dados da amplitude do IHO, para o solo 1 a amplitude foi de $0,092 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Esse valor informa que esta variação representa quase 1mm/cm de lâmina. Na Figura 22 e Tabela 8 esta os valores da amplitude para o solo 2, que alcançou $0,090 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ já para o solo 3, na Figura 23 e Tabela 9, a amplitude foi de $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Os resultados indicaram que com o aumento da Ds ocorreu redução do IHO, sugerindo diminuição da frequência com que o teor de água no solo ocorre dentro dos limites do IHO, em concordância com os resultados obtido por Kay (1990), Silva e Kay (1997), Collares et al. (2006) e Klein e Camara (2007). Estes autores sugerem uma relação inversa entre IHO e a probabilidade de ocorrência de teor de água no solo fora dos limites do IHO.

Em relação à máxima amplitude do IHO, Tormena et al. (1998) e Klein & Libardi (2000) encontraram valores máximos de IHO de $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para um Latossolo com mais de 70 % de argila, enquanto Reichert et al. (2003) apresentaram um IHO de $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para um Latossolo com 45 % de argila. Nesse sentido, a obtenção de IHO máximo de $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o solo 1 na Ds de 1,25 a $1,30 \text{ g cm}^{-3}$, $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o solo 2 na Ds de 1,20 a $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o solo 3 na Ds de 1,10 a $1,15 \text{ g cm}^{-3}$ é um importante indicador de que, com práticas mecânicas, é possível melhorar as propriedades físico-hídrico-mecânicas de solos sob plantio direto, as quais, porém, podem não resultar necessariamente em melhoria na produção vegetal.

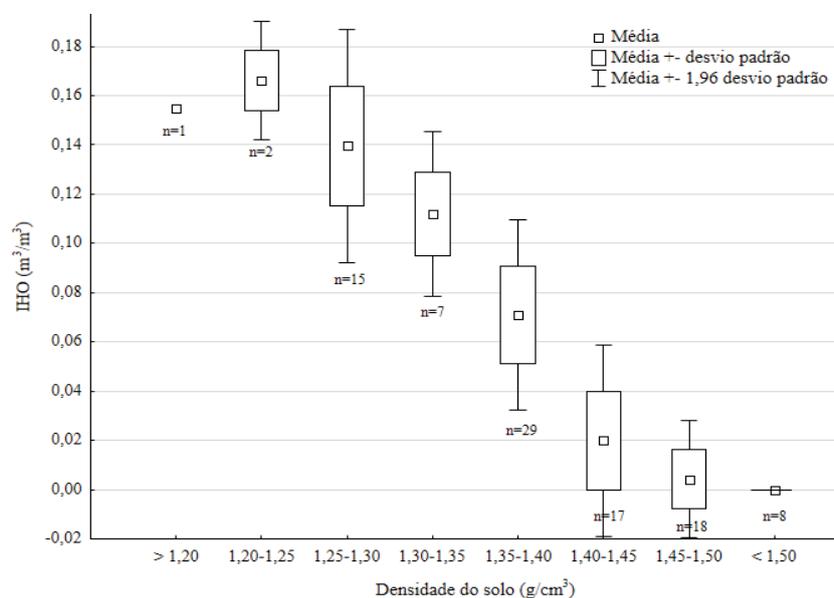


Figura 21- Amplitude do IHO no solo 1. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

Tabela 7 – Estatística descritiva do IHO no solo 1.FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Ds (g cm ⁻³)	Nº	IHO (m ³ m ⁻³)					Desvio padrão
		Média	Mínimo	Máximo	Amplitude		
< 1,20	1	0,155	0,155	0,155	0,000		
1,20-1,25	2	0,166	0,157	0,175	0,017		0,012
1,25-1,30	15	0,140	0,092	0,182	0,090		0,024
1,30-1,35	7	0,112	0,092	0,131	0,039		0,017
1,35-1,40	29	0,071	0,029	0,121	0,092		0,020
1,40-1,45	17	0,020	0,000	0,060	0,060		0,020
1,45-1,50	18	0,004	0,000	0,048	0,048		0,012
> 1,50	8	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000

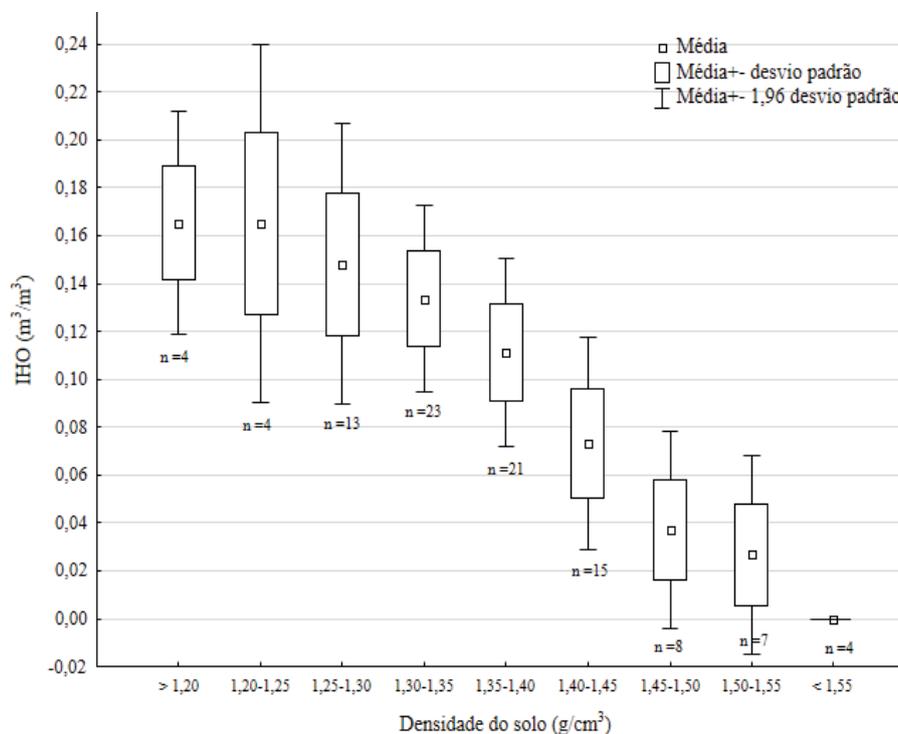


Figura 22- Amplitude do IHO no solo 2. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

Tabela 8 – Estatística descritiva do IHO no solo 2.FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Ds (g cm ⁻³)	Nº	Média	Mínimo	Máximo	Amplitude	Desvio padrão
< 1,20	4	0,165	0,141	0,196	0,055	0,024
1,20-1,25	4	0,165	0,127	0,215	0,088	0,038
1,25-1,30	13	0,148	0,109	0,199	0,090	0,030
1,30-1,35	23	0,134	0,100	0,167	0,066	0,020
1,35-1,40	21	0,111	0,059	0,148	0,089	0,020
1,40-1,45	15	0,073	0,036	0,111	0,075	0,023
1,45-1,50	8	0,037	0,001	0,061	0,060	0,021
1,50-1,55	7	0,027	0,000	0,058	0,058	0,021
>1,55	4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

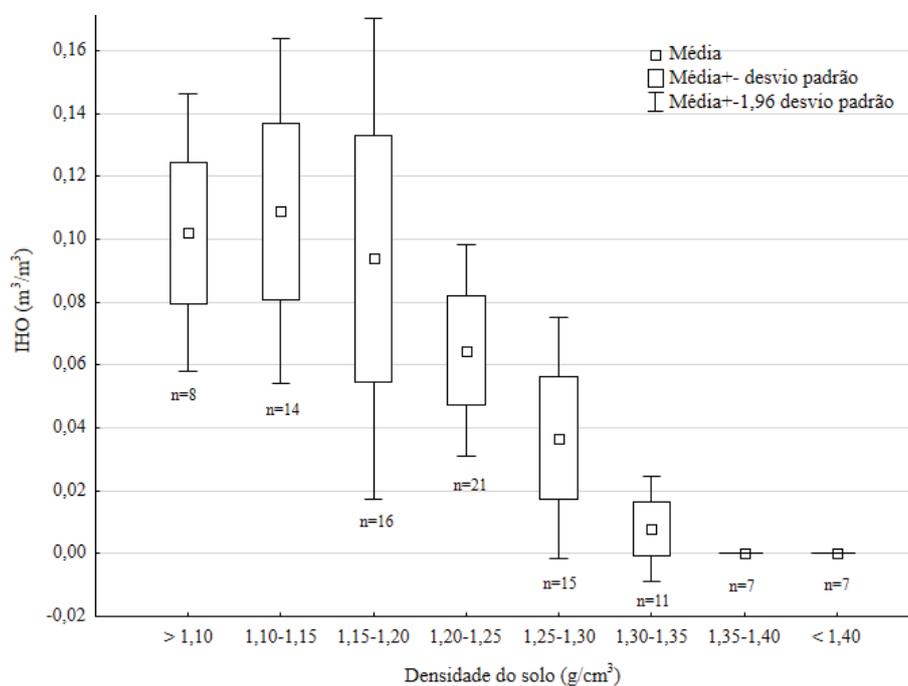


Figura 23- Amplitude do IHO no solo 3. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014.

Tabela 9 – Estatística descritiva do IHO no solo 3.FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2014

Ds (g cm ⁻³)	Nº	Média	Mínimo	Máximo	Amplitude	Desvio padrão
< 1,10	8	0,102	0,081	0,155	0,073	0,023
1,10-1,15	14	0,109	0,066	0,152	0,086	0,028
1,15-1,20	16	0,094	0,016	0,145	0,128	0,039
1,20-1,25	21	0,065	0,023	0,096	0,073	0,017
1,25-1,30	15	0,037	0,005	0,070	0,065	0,019
1,30-1,35	11	0,008	0,000	0,021	0,021	0,009
1,35-1,40	7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
> 1,40	7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

A ocorrência de déficit hídrico em plantas cultivadas afeta o crescimento e o desenvolvimento das culturas em todo o mundo. A

deficiência hídrica provoca alterações no comportamento vegetal cuja irreversibilidade vai depender do genótipo, da duração, da severidade e do estágio de desenvolvimento da planta. Segundo Levitt (1980) no entendimento das respostas das plantas ao déficit hídrico é de fundamental importância se quantificar a capacidade de armazenamento de água no solo e analisar a influência dos mecanismos de adaptação das plantas à redução da disponibilidade de água no solo, pois, de acordo com Kiehl (1979) a quantidade de água armazenada no solo disponível às plantas varia com a textura e as características físicas do solo, levando a planta a apresentar diferentes respostas em seus mecanismos de resistência morfofisiológicos.

Foi observada grande variabilidade do IHO nos três solos estudados, com o conhecimento sobre plantas, que dependendo da situação climática as plantas podem não sentir nenhum efeito negativo na produtividade e fisiológico, e se adaptar ao ambiente.

A utilização de índices que favoreçam as informações necessárias para tomada de decisões é de fundamental importância na avaliação de sistemas de manejo. Quanto maior a sensibilidade dos limites menor será o tempo para a obtenção de tais resultados. A continuação de experimentos é de muita importância para a evolução e compreensão da variabilidade dos limites. A adoção de um índice que integre as limitações relacionadas ao crescimento de plantas torna-se uma alternativa viável. Outros estudos devem ser conduzidos para melhor compreensão do potencial de aplicação dessa metodologia conclusões de trabalhos futuros serão válidas para comprovar esta estratégia.

5 CONCLUSÕES

A hipótese do trabalho é confirmada, uma vez que a variabilidade dos limites do IHO é mascarada pela utilização dos modelos matemáticos.

O limite do IHO que apresenta maior variabilidade foi o conteúdo de água na CC e em segundo lugar o RP onde os valores estimados apresentaram grande desvio em relação aos medidos.

O limite do conteúdo de água na PA é o que menor variabilidade apresentou enquanto que o PMP obtido a partir de outros ajustes matemáticos também apresentou bom ajuste.

Devido à variabilidade dos limites do IHO, terá alto grau de incerteza associado à determinação do IHO.

REFERÊNCIAS

ABREU, L. S. *Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo*. 2000. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

AGUIAR NETTO, A. O.; NACIF, P. G. S.; REZENDE, J. O. Avaliação do conceito de capacidade de campo para um latossolo amarelo coeso do estado da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 23, p. 661-667, 1999.

AGUIAR, M. I. *Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais*. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 20, p. 151-157, 1996.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A. C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, p. 495-504, 2004.

ARCHER, J. R. SMITH, P. D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. *European Journal of Soil Science*, London, v. 23, p. 475-480, 1972.

ARRUDA, F. B.; ZULLO, Jr. J.; OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 11, p. 11-15, 1987.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141. (SSSA Special Publication, n. 49).

BENGOUGH, A. G.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; McKENNA, S. J.; ROBERTS, T.; VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 57, n. 2, p. 437-447, 2006.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *European Journal of Soil Science*, London, v. 41, p. 341-358, 1990.

BERG, M. V. D.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: I. Análise da variância por amostragem aninhada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 21, p. 393-399, 1997.

BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 2 ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1982. 463 p.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-856, 2003.

BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; FRAZIER, B. E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. *Remote Sensing and Environment*, New York, v. 37, p. 181-191, 1991.

BILLOT, J. F. Les applications agronomiques de pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés. *Canadian Society of Soil Science*, Antony, v. 3, p. 187-202, 1982.

BOONE, F. R.; VAN DER WERF, H. M. G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAG, B. A.; BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. *Netherlands Journal of Agricultural Research*, Amsterdam, v. 34, p. 155-171, 1986.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The nature and properties of soils*. 12. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 881 p.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em ciência do solo*. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 221- 267.

BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. *The wilting coefficient for different plants and its indirect determination*. Washington Distrito de Colúmbia: Department of Agriculture/Bureau of Plant Industries, 1912. (Bulletin, 30).

BRUNINI, O.; REICHARDT, K.; GROHMANN, F. Determinação da água disponível em Latossolo Roxo em condições de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., Campinas, 1975. *Anais...* Campinas: SBCS, 1976. p. 82-86.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transaction of the American Society of Agronomists*. Michigan, v. 33, p. 519-524, 1990.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, p. 1153-1155, 2004.

CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy. 1986, p. 902-926.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; FILHO, P. S. V.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, v.30, p. 137-147, 2006.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. K. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.

CORRECHEL, V.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A.; SANCHEZ, A. C. Resistência de um Latossolo Roxo ao penetrômetro em dois sistemas de preparo do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro: SBCS, 1997. 1 CD-ROM.

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; DE SOUSA, D. M. G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v. 41, n. 7, p. 1185-1191, 2006.

COUTO, E.G.; KLAMT, E; STEIN, A. Estimativa do teor de argila e do potássio trocável em solos esparsamente amostrados no sul do estado de Mato Grosso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 129-140, 2000.

DA SILVA, V. R. *Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação*. 2003. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Biodinâmica do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

DARIVA, T. A. *Variabilidade espacial de solo e da cultura da soja em várzea sistematizada*. 2001. 120f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Requisitos para a implantação e manutenção do sistema plantio direto. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. *Plantio direto no Brasil*. 1. ed. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. p. 19-27.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory. Effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (Special Publication, n. 35).

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

ESTACAMP. Software Action. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/content/download-action>>. Acesso em mar.2014.

ESTADOS UNIDOS. *Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Soil Survey Laboratory. Methods and procedures for collection soil samples: Soil survey investigations*. Washington: USDA/NRCS, 1972. (Report 1)

FONTANELA, E. *Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego*. 2008. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciências do Solo) Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p.113-121, 2006.

GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 14. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo, 2000. 477p.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 2, p.169-177, 2005.

HAISE, H. R., HAAS, H. J.; JENSEN, L. R. Soil moisture studies of some Great Plain soils: II. Field capacity as related to 1/3- atmosphere percentage and “minimum point” as related to 15- and 26- atmosphere

percentages. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 34, p. 20-25, 1955.

HÄKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 16, p. 105-20, 1990.

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

HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. 1. ed. New York: Academic Press, 1980. 413 p.

HILLEL, D. *Solo e água: fenômenos e princípios físicos*. 1. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231 p.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. *Análise exploratória de dados. Técnicas robustas: Um guia*. 1. ed. Lisboa: Edições Salamandra, 1992. 446 p.

HORN, R.; BAUMGARTL, T. Dynamic properties of soils. In: WARRICK, A. W. (Ed.) *Soil physics companion*. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 17-48.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 25, p. 11-18, 2001.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. 1. ed. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture Ecosystems and Environment*, College Park, v. 79, p. 9-16, 2000.

JONG VAN LIER, Q. Índices da disponibilidade de água às plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em ciência do solo*. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1. p. 95- 106.

KAY, B. D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science*, New York, v. 12, n. 1, p. 1-51, 1990.

KIEHL, E.J. *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979, 264 p.

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

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*, Santa Maria, v. 40, p.1550-1556, 2010.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.31. p. 221-227, 2007.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um latossolo roxo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 959-964, 2000.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa v. 26, p. 857-867, 2002.

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

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MASSING, J. P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo e rendimento de Trigo em plantio direto escarificado. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 265-371, 2008.

LEÃO, T. P. *Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem*. 2002. 58 f. Dissertação (Mestrado em Física do Solo) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, p. 415-423, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E.; TORMENA, C. A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. *Agronomy Journal*, Madison, v. 97, p. 1210-1215, 2005.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advanced in Soil Science*, New York, v.1, p. 277-294, 1985.

LEVITT, J. *Response of plants to environmental stress. II: Water radiation, salt and other stress*. New York: Academic Press, 1980. 606 p.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. 2. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo, 2000. 509 p.

LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 20, p. 1-12, 1996.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1233-1244, 2007.

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*, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1765-1772, 2006.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M. Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. *Cerne*, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-41, 2002.

MIRANDA, E. E. V. *Modelagens e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar*. 2006. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

NESMITH, D. S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 51, p.183-186, 1987.

OLIVEIRA, J. B. *Pedologia aplicada*. 4. ed. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 2011. 592 p.

OLIVEIRA, J. J.; CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, J. E.; LUNA, J. G. de. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, p. 783-789, 1999.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida de densidade do solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v. 33, n. 1, p. 161-170, 2011.

PLANT, R. E. Site specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and electronics in agriculture*, Amsterdam, v. 30, n. 1-3, p. 9-29, 2001.

REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 3. ed. Piracicaba: Universidade de São Paulo/Cargill, 1975. 286 p.

REICHARDT, K. *Água em sistemas agrícolas*. 1. ed. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

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

REINERT, D. J.; REICHERT, D. J.; VEIGA, M.; SUZUKI, L. E. A. S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracaju. *Resumos...* Aracaju: SBCS, 2006. 1 CD-ROM.

REINERT, D. J.; WOLKOWSKI, R. P.; LOWERY, B.; ARRIAGA, F. J. Compaction effects on plant water use. In: PROCEEDINGS OF THE 2001 WISCONSIN FERTILIZER AGLIME & PEST MANAGEMENT CONFERENCE, Madison, 2001. *Annals...* Madison: University of Wisconsin, 2001. p. 222-232.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 128-152.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Science*, Madison, v. 56, p. 331-339, 1944.

SARVASI, F. O. C. *Dinâmica da água, erosão hídrica e produtividade das culturas em função do preparo do solo*. 1994. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

SAS. *Statistical analysis systems user's guide: version 6.12*. ed. Cary: SAS Institute, 1996. 1200 p.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A.; Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 4, 2008.

SILVA, A.P. *Variabilidade espacial de atributos físicos do solo*. 1988. 105 f. Dissertação - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1988.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 61, n.3, p.884-888, 1997.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. PERFECT, E. Characterization of least limiting ranges of soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, V. R. *Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, intervalo hídrico ótimo e parâmetros físico-hídricos influenciando a produção de culturas anuais*. 2003. 180 f. Tese (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, V. R., REICHERT, J. M., REINERT, J. D., SILVA, A. P., BRAIDA, J. A.; KAISER, D. R. Intervalo hídrico ótimo para três solos em sistema de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá, *Resumos...* Viçosa: SBCS, 2002. 1 CD-ROM.

SLAY, J. M.; LOCKABY, B. G.; ADAMS, J. C.; VIDRINE, C. G. The influence of pretreatment forest soil variability on interpretation of post treatment results. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 50, p. 1594-1597, 1986.

SOJKA, R. E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. *Soil Science*, Madison, v.154, p.269-280, 1992.

SOUZA, C. C.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, I. F.; AMORIM NETO, M. S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.3, p.338-342, 2000.

SOUZA, L. D.; REICHARDT, K. Estimativas e utilização da capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 20, p.183-189, 1996.

SOUZA, L. S. *Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo*. 1992. 162 f. Tese (Doutorado em agronomia/Ciência do solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Campinas, v. 21, p. 367-372, 1997.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P. VIEIRA, S.R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, p. 77-86, 1998.

SOUZA, M. Z.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; AMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 25, p. 699-707, 2001.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas de relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, n. 28, p. 937-944, 2004.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B. C. Effects of soil compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. *Soil Compaction and Crop Production*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 167-189.

STRECK, E. V.; KAMPF, N. DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. *Solos do Rio Grande do Sul*. 2. ed. Porto Alegre: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Sul, 2008. 222p.

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

TOPP, G. C.; GALGANOV, Y. T.; WIRES, K. C.; CULLEY, J. L. B. *Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. – Soil Quality Evaluation Program*. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. (Technical report, 2)

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, p. 211-219, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 286-292, 1999.

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

VAN DEN BERG, M.; KLAMT, E.; VAN REEUWIJK, L. P.; W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of ferralsols and related soils. *Geoderma*, Amsterdam, v.78, p.161-180, 1997.

VEIHMEYER, F. J., HENDRICKSON, A. H. Soil moisture in relation to plant growth. *Annual Review of Plant Physiology*, Palo Alto, v. 1, p. 285-304, 1950.

VIEIRA, L. B.; SIERRA, J. G. Uso do penetrômetro e programa de computador para traçado de perfil penetrométrico do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., 1993, Ilhéus. *Anais...* Ilhéus: SBEA, 1993. p. 1825-1837.

VIEIRA, M. L. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo*. 2006. 115 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

VIEIRA, S. R.; CASTRO O. M.; MARIA, I. C. Dinâmica da água no solo em função do manejo. In: FANCELLI, A. L. (Coord.). *Plantio direto no Estado de São Paulo*. 1. ed. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo, 1989. p. 103-106.

VILLELA, A. L. O. *Variabilidade espacial da qualidade físico-hídrica dos solos de uma unidade de pesquisa em produção agroecológica*. 2007. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, em Agronomia/Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). *Applications of soil physics*. 1. ed. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; SILVA, A. P.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; VIDIGAL FILHO, P. S. Resistência do solo a penetração e porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v. 22, p. 1055-1060, 2000.

WEBSTER, R. Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science*, London, v. 52, p. 331-340, 2001.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v. 38, p. 947-958, 2000.