



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

Ivonir Gubiani, Paulo; Ziani Goulart, Rafael; Reichert, José Miguel; Reinert, Dalvan José  
CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE MILHO ASSOCIADOS COM O INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO  
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 37, núm. 6, noviembre-diciembre, 2013, pp. 1502-1511

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180229291007>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## Comissão 2.2 - Física do solo

# CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE MILHO ASSOCIADOS COM O INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO<sup>(1)</sup>

Paulo Ivonir Gubiani<sup>(2)</sup>, Rafael Ziani Goulart<sup>(3)</sup>, José Miguel Reichert<sup>(4)</sup> & Dalvan José Reinert<sup>(4)</sup>

### RESUMO

O Intervalo hídrico ótimo (IHO) é muito utilizado como indicador agronômico de qualidade física do solo, contudo pouquíssimas pesquisas relacionaram o IHO com crescimento e produção de plantas. Os escassos resultados são insuficientes para confirmar ou negar a eficiência do IHO, porém apontam para a discordância entre IHO e produção das culturas. O objetivo deste estudo foi analisar a correlação do IHO com as variáveis de crescimento e com a produção de grãos da cultura de milho (*Zea mays L.*) de oito cultivos (quarto na safra 2010/11 e quatro na safra 2011/12) em Latossolo Vermelho distroférrico típico, com diferentes estados de compactação. Os tratamentos consistiram de plantio direto, que recebeu escarificação e compactação adicional. Foram medidos a altura de plantas (Ap), o índice de área foliar (IAF), a profundidade efetiva de raízes (Ze), o rendimento de grãos e o peso de 1000 grãos nos oito cultivos de milho. O IHO foi determinado para seis combinações de resistência do solo à penetração e potencial matricial (RP: $\psi$ ), usadas nos limites inferiores: (2:-0,8), (3:-0,8), (4:-0,8), (2:-1,5), (3:-1,5) e (4:-1,5), expressos em MPa. O IHO esteve fracamente associado com Ap, IAF e Ze. Os coeficientes de correlação variaram entre -0,20 e 0,36 e a maioria das correlações não foi significativa. Além disso, a melhor relação linear explicou apenas 17 % da variação da altura das plantas em função da variação do IHO. Não houve correlação entre IHO e produção de grãos de milho. Esses resultados indicaram que, embora o IHO seja sensível à compactação do solo, ele não é um índice agronômico robusto para orientar o manejo da compactação para culturas, cujo objetivo principal é a produção de grãos.

**Termos de indexação:** compactação do solo, plantio direto, densidade crítica.

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em 17 de janeiro de 2013 e aprovado em 30 de agosto de 2013.

<sup>(2)</sup> Doutor em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Campus Universitário. Av. Roraima, 1000. Bairro Camobi. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: paulogubiani@gmail.com

<sup>(3)</sup> Doutorando em Ciência do Solo, UFSM, E-mail: rafaelgoulart@gmail.com

<sup>(4)</sup> Professor Titular, Departamento de Solos, UFSM. E-mail: reichert@smail.ufsm.br, dalvan@ccr.ufsm.br

## SUMMARY: CORN GROWTH AND YIELD ASSOCIATED WITH THE LEAST LIMITING WATER RANGE

The least limiting water range (LLWR) has been widely used as an agronomic indicator of soil physical quality, however only a few studies have linked the LLWR to the plants growth and yield. The scarce results are insufficient to confirm or rebut the efficiency of LLWR, but indicate a discrepancy between LLWR and crop yields. The purpose of this study was to analyze the correlation of LLWR with variables of growth and grain yield of corn (*Zea mays L.*) in eight crops (four each in the growing seasons of 2010/11 and 2011/12) on a Hapludox, under different compaction levels. Treatments consisted of no-tillage, with chiseling and additional compaction. The plant height (PH), leaf area index (LAI), effective root depth (Ze), grain yield, and 1000-grain weight of the eight corn cultivars were determined. The LLWR was determined for six combinations of penetration resistance and matric potential used at the lower limit: (2:-0.8), (3:-0.8), (4:-0.8), (2:-1.5), (3:-1.5), and (4:-1.5), expressed in MPa. The LLWR was weakly associated with PH, LAI and Ze. The correlation coefficients varied between -0.20 and 0.36, and most correlations were not significant. In addition, the best linear function explained only 17 % of the PH variation due to the LLWR variation. There was no correlation between LLWR and corn yield. These results indicate that although LLWR is sensitive to soil compaction, it is not robust enough as agronomic indicator to orient the compaction management of crops destined mainly for grain production.

*Index terms:* soil compaction, no-tillage, critical bulk density.

## INTRODUÇÃO

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi proposto como um índice integrador de condições hídricas, mecânicas e de aeração para o crescimento de plantas (Silva et al., 1994). A atribuição mais comum ao IHO define-o como indicador de qualidade física do solo para a produção das culturas. Tanto na proposição conceitual (Letey, 1985) como na representação matemática do IHO (Silva et al., 1994) não há afirmações de que haveria correlação entre IHO e produção de grãos, mas sim de que haveria correlação entre IHO e crescimento de plantas. Porém, com quais variáveis de planta o IHO tem maior relação é uma questão com grande escassez de evidências experimentais.

Desde a proposição do IHO (Silva et al., 1994) até julho de 2012, 38 títulos de artigos foram indexados na Base *ISI Web of Knowledge*, contendo o termo *least limiting water range* (tradução de intervalo hídrico ótimo). Entretanto, em apenas 26 % desses artigos foram feitas medições biológicas; e neles as variáveis de planta não foram analisadas por meio de correlações ou regressões para investigar o grau de dependência delas com o IHO. Algumas outras pesquisas não localizadas pelo termo *least limiting water range* investigaram a relação estatística entre IHO e produção de grãos (Benjamin et al., 2003; Verma & Sharma, 2008; Gathala et al., 2011). Porém, as relações nem sempre foram significativas e, em alguns casos, contraditórias. Particularmente para variáveis de crescimento, sobre as quais se fundamenta o conceito de IHO, na busca bibliográfica realizada, apenas o trabalho de Cavalieri et al. (2012) demonstrou haver relação significativa entre IHO e variáveis da parte aérea da cultura da mandioca.

Questiona-se se essas poucas evidências são justificativas suficientes da falibilidade de o modelo matemático do IHO expressar a concepção teórica que ele representa. Essa questão precisa ser mais bem avaliada com mais evidências experimentais, antes de se julgar a utilidade do IHO como um índice de uso agronômico de manejo do solo para produção de grãos, o que teria impacto sobre grande parte dos 26 milhões de hectares de plantio direto no Brasil (FEBRAPDP, 2010).

A fim de obter mais informações sobre a relação entre IHO e resposta de plantas, o objetivo deste trabalho foi analisar a correlação do IHO com variáveis de crescimento e com a produção de grãos de milho de oito cultivos em Latossolo, com diferentes estados de compactação.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no município de Augusto Pestana, RS ( $28^{\circ} 26' 30,26'' S$ ,  $54^{\circ} 00' 58,31'' W$ ), num Latossolo Vermelho distroférreo típico (Embrapa, 2006). O histórico de uso da área nos três anos anteriores consistiu de azevém por ressemeadura natural no inverno e milho no verão (2007/2008), azevém por ressemeadura natural no inverno e milheto e sorgo no verão (2008/2009) e pousio no inverno e milho e amendoim forrageiro no verão (2009/2010). Nesse período, de 2007 a 2010, o solo não foi revolvido.

O experimento foi instalado em delineamento blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de níveis de compactação: condição atual da área sob plantio direto (PD), plantio direto

escarificado (PDE) e plantio direto com compactação adicional por tráfego (PDC). Nesses níveis de compactação, foram semeados quatro cultivos de milho na safra 2010/2011 e quatro, na de 2011/2012 (Quadro 1). As datas de semeadura do milho foram estabelecidas de acordo com as recomendações técnicas (Rodrigues et al., 2009), as condições meteorológicas, o conteúdo de água no solo e a disponibilidade de maquinários. Por questões operacionais, os níveis de compactação e as épocas de semeadura foram distribuídos em faixas dentro de cada bloco.

A escarificação foi efetuada até uma profundidade média de 0,30 m, em 01/10/2010, quando a umidade do solo estava em torno de 0,27 kg kg<sup>-1</sup>. Foi utilizado um escarificador com sete hastes espaçadas 0,37 m, com grade destorreadora e niveladora acoplada. A compactação adicional foi realizada com três passadas (paralelas, deslocadas uma da outra meia largura do pneu) de um trator MF292, em 08/10/2010, quando a umidade do solo estava em torno de 0,29 kg kg<sup>-1</sup> na camada de 0-0,05 m. Para a segunda safra (2011/2012), inicialmente fez-se a avaliação da densidade do solo, medida em 12/09/2011, na profundidade de 0,07 m, em nove parcelas amostradas aleatoriamente, cujos resultados foram: 1,21 Mg m<sup>-3</sup> ( $\pm 0,10$ ), no PDE; 1,32 Mg m<sup>-3</sup> ( $\pm 0,06$ ), no PD; e 1,45 Mg m<sup>-3</sup> ( $\pm 0,07$ ), no PDC. Pelo fato de a densidade ter aumentado pouco no PDE, optou-se por não reaplicar a escarificação nesse tratamento. Como houve diminuição da densidade no PDC, foi aplicada mais uma passada do mesmo trator nas parcelas do PDC, em 04/10/2011, quando a umidade do solo estava em torno de 0,28 kg kg<sup>-1</sup> na camada de 0-0,05 m.

Amostras de solo com estrutura preservada (anéis metálicos de 0,06 m de diâmetro e 0,05 m de altura) e não preservada foram coletadas em todas as parcelas dos quatro cultivos da safra 2010/2011, nas profundidades de 0,07, 0,25 e 0,45 m (coincidentes com o centro do anel), sempre após a emergência das plantas. Ao total, foram coletadas 480 amostras (três nas profundidades de 0,07 e 0,25 e duas na profundidade de 0,45 de cada parcela). A profundidade de coleta foi definida para coincidir com a posição em que mais se diferenciaram os efeitos da escarificação e da compactação adicional ou pré-existente avaliada

por meio da resistência do solo à penetração, medida em toda a área antes da implantação do experimento (Gubiani et al., 2010) e em cinco locais aleatórios no PDE e PDC, logo após aplicação desses tratamentos.

As amostras foram saturadas e drenadas até atingirem os potenciais ( $\psi$ ) de -0,001, -0,006 e -0,01 MPa, em coluna de areia (Reinert & Reichert, 2006); e de -0,033 e -0,1 MPa, em câmaras de Richards (Klute, 1986). Em cada  $\psi$ , em torno de 68 amostras, provenientes de parcelas com tratamentos diferentes (níveis de compactação), eram removidas após cessada a drenagem, pesadas e submetidas ao teste de resistência à penetração (RP). Amostras com conteúdo de água aproximado ao do  $\psi$  de -0,5 e de -1,5 MPa, foram obtidas por evaporação. As amostras foram retiradas da câmara de Richards (no potencial de -0,1 MPa) e mantidas dentro da sala do laboratório sobre grade afastada 0,05 m da superfície da bancada. A perda de água dessas amostras foi controlada por sucessivas pesagens. Quando o conteúdo de água diminuiu 15% (aproximação para o  $\psi$  de -0,5 MPa) e 20% (aproximação para o  $\psi$  de -1,5 MPa), as amostras foram transferidas para dentro de embalagem plástica, onde foram mantidas por três dias para redistribuição do conteúdo de água antes da medição da RP.

A RP nas amostras foi medida com um penetrômetro eletrônico de bancada com haste metálica e cone de 4 mm de diâmetro na base e ângulo de 30°, a uma velocidade constante de 10 mm min<sup>-1</sup>. A densidade do solo (Ds) e o conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) foram calculados após obtenção da massa de solo seco a 105 °C por 24 h. Aos dados de RP, Ds e  $\theta$  foi ajustado o modelo de Busscher (1990):

$$RP = aDs^b \theta^c \quad (1)$$

em que a, b e c são coeficientes de ajuste.

A curva de retenção de água (CRA) foi obtida das mesmas amostras utilizadas para medição da RP. Foram utilizadas apenas 194 amostras, em que a RP foi medida somente após o  $\psi$  de -0,1 MPa. Assim, nos  $\psi$  de -0,001, -0,006, -0,01, -0,033 e -0,1 MPa, o  $\theta$  das amostras foi quantificado sem que houvesse alteração da estrutura do solo no teste de penetração. Para o  $\psi$  de -0,5 e de -1,5 MPa o conteúdo gravimétrico de água foi quantificado em 24 amostras com estrutura deformada, cujo potencial matricial foi medido em um psicrómetro de ponto de orvalho-WP4, conforme

**Quadro 1. Datas de semeadura e colheita e precipitação pluvial em cada cultivo**

<b>Cultivo</b>	<b>Safra 2010/2011</b>				<b>Safra 2011/2012</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Semeadura	21/10/10	11/11/10	12/12/10	27/01/11	04/10/11	28/10/11	14/11/11	27/01/12
Colheita	02/03/11	16/03/11	28/04/11	25/07/11	13/02/12	09/03/12	28/03/12	13/06/12
P <sup>(1)</sup> (mm)	685	659	828	984	512	472	428	241

<sup>(1)</sup> P: precipitação pluvial acumulada desde a semeadura até a maturação fisiológica, obtida da estação meteorológica de superfície automática do IRDeR/DEAg, localizada a aproximadamente 500 m da área experimental, pertencente à rede de estações da Sepagro/RS.

descrito por Klein et al. (2006). As 24 amostras foram selecionadas para representar pontos com diferenças de granulometria, determinados pelo método da pipeta (Embrapa, 1997). O  $\theta$  no  $\psi$  de -0,5 e -1,5 MPa foi obtido, multiplicando-se o conteúdo gravimétrico de água pela Ds de cada ponto de coleta das 24 amostras. Aos dados de  $\theta$ , módulo de potencial matricial,  $|\psi|$ , e Ds foi ajustado o modelo da CRA amplamente utilizado no IHO, conforme descrito em Leão et al. (2005):

$$\theta = \text{EXP}(d + eDs) |\psi|^f \quad (2)$$

em que d, e, f são os coeficientes de ajuste.

O IHO foi calculado, conforme descrito por Leão et al. (2005). Para o limite superior, utilizou-se o conteúdo volumétrico de água no  $\psi$  de -0,01 MPa ou para uma porosidade de aeração de 10 %. Para o limite inferior, usaram-se os conteúdos de água para RP de 2, 3 ou 4 MPa ou  $\psi$  de -0,8 e -1,5 MPa. Assim, com as combinações (RP,  $\psi$ ), foram obtidos seis diagramas do IHO.

Além das amostras coletadas na safra 2010/2011, outras amostras foram coletadas em anéis metálicos (0,06 m de diâmetro e 0,03 m de altura) nas profundidades 0,07 e 0,25 m (coincidentes com o centro do anel), na colheita de cada cultivo da safra 2011/2012, para determinação da Ds.

A implantação da cultura do milho foi realizada com uma semeadora de quatro linhas, munida com disco de corte e sulcador, regulados para operar a uma profundidade média de 0,05 m. Porém, por causa das diferenças de Ds, a profundidade média de semeadura foi de 0,03, 0,05 e 0,08 m no PDC, PD e PDE, respectivamente.

Na safra 2010/2011, foi semeado o híbrido Agroceres-AG6440; e, na de 2011/2012, o híbrido Dekalb-DKB566, ambos de ciclo superprecoce. Em torno de 75.000 sementes por hectare foram semeadas em linhas espaçadas de 0,8 m. A adubação de semeadura consistiu de 25 kg ha<sup>-1</sup> de N, 105 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 35 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, complementada com 85 kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura, para uma expectativa de rendimento de 6.000 kg ha<sup>-1</sup>, de acordo com a recomendação oficial (CQFS, 2004) e análise de solo efetuada em abril de 2010. Prévia ou imediatamente após a semeadura, a vegetação presente foi eliminada com Glifosato, cujas doses (3-5 L ha<sup>-1</sup>) foram definidas de acordo com as recomendações técnicas. A adubação de cobertura foi aplicada quando as plantas estavam com quatro a seis folhas definitivas. As plantas invasoras foram controladas com aplicação de herbicidas (Nicosulfuron, na safra 2010/2011, e Atrazine+Simazine, na de 2011/2012), cujas doses seguiram as indicações técnicas de cada produto.

No pendoamento, foram feitas as seguintes determinações: a) área foliar ( $A_f$ ), para cálculo do índice de área foliar, estimada a partir das medidas do comprimento ( $C_f$ ) e da máxima largura ( $L_f$ ) de todas as folhas de três plantas por parcela. A  $A_f$  foi estimada

por uma equação linear gerada por análise de regressão entre a área foliar real obtida com imagens digitais (Gubiani et al., 2009) de 162 folhas de diferentes tamanhos e o produto  $C_f(L_f)$ :

$$A_f = 0,6872 C_f (L_f), R^2 = 0,97*** \quad (3)$$

b) altura das plantas: considerada como a distância vertical da superfície do solo até a inserção da última folha; e c) crescimento efetivo de raízes: as raízes foram expostas no perfil de uma trincheira aberta cerca de 0,05 m, próxima de uma planta representativa de cada parcela, e usou-se o critério visual, definindo-se como profundidade efetiva a posição a partir da qual poucas raízes eram visualizadas no perfil.

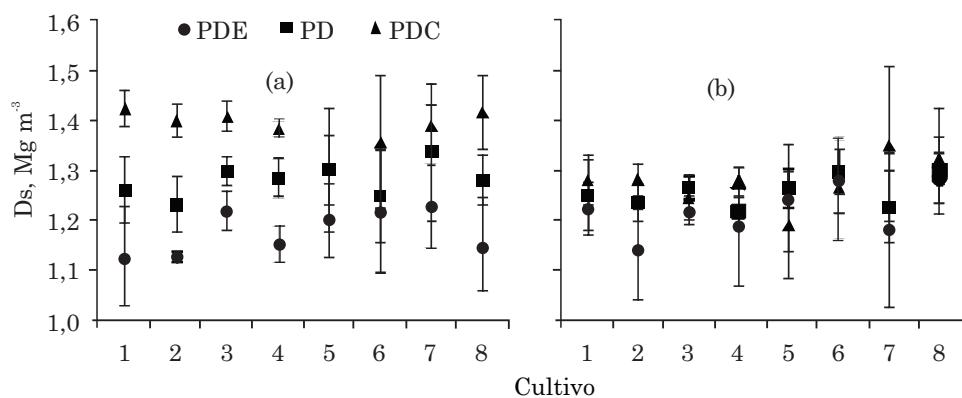
Na maturação fisiológica foram feitas as seguintes medições: a) produção de grãos (a 13 % de umidade a base de massa): estimada colhendo-se quatro linhas de 10 m na safra 2010/2011 e quatro linhas de 5 m na safra 2011/2012 (questões operacionais para o transporte das espigas) na porção central da parcela; b) peso de mil grãos; e c) população de plantas: contagem das plantas colhidas.

A associação das variáveis da cultura do milho com o IHO foi avaliada pela correlação de Spearman, por não ter havido aderência da maioria das variáveis à distribuição normal, verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. A correlação de Spearman pode ser utilizada para variáveis com qualquer distribuição, sobretudo nos casos em que essas não atendem ao pressuposto de normalidade (McDonald, 2009). Em cada cultivo, as variáveis da cultura do milho foram relativizadas, a fim converter todos os dados em base percentual para se efetuarem as correlações com os dados dos oito cultivos em conjunto. Todas as análises foram feitas com o software estatístico SAS (SAS, 1999).

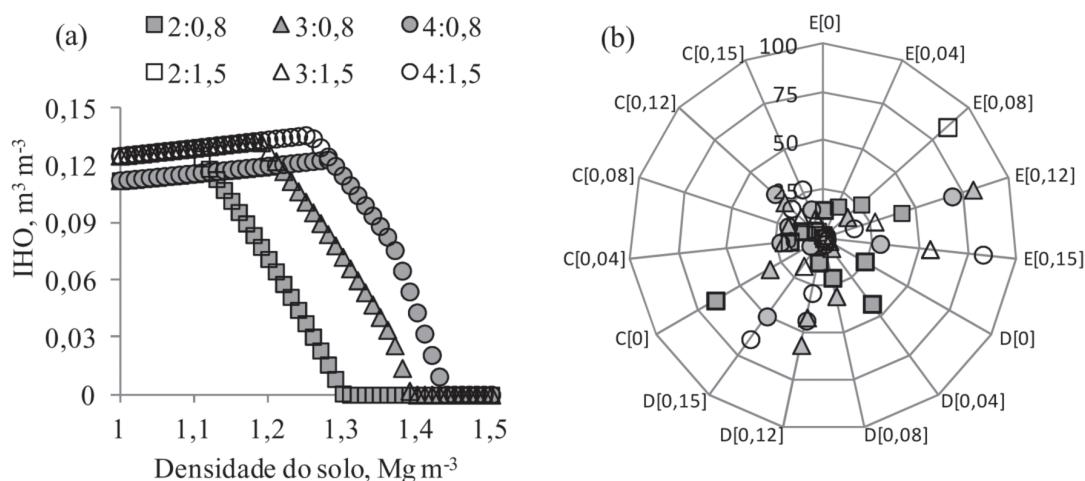
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em razão da pequena variação de densidade da profundidade de 0,45 m (média igual a 1,29 Mg m<sup>-3</sup> e desvio-padrão de 0,06 Mg m<sup>-3</sup>) e da profundidade efetiva de raízes ter sido menor que 0,45 m, na maioria dos casos, a análise e a discussão basearam-se nos dados das profundidades de 0,07 e 0,25 m. Nessas profundidades, os teores médios, seguido pelo desvio-padrão, de areia, silte e argila foram 0,13 ( $\pm 0,01$ ), 0,23 ( $\pm 0,04$ ) e 0,64 ( $\pm 0,05$ ) kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, o que conferiu pequena variação granulométrica em toda a área do experimento, podendo-se assumir desprezível o efeito da granulometria sobre as demais variáveis medidas.

A Ds diminuiu com a escarificação (PDE) e aumentou com o tráfego (PDC), em relação à condição inicial (PD), mais na profundidade de 0,07 m (Figura 1a) do que na de 0,025m (Figura 1b). Os tratamentos causaram ampla variação na Ds, necessária para obtenção do IHO.



**Figura 1.** Efeito dos níveis de compactação na densidade do solo (Ds) das profundidades de 0,07 m (a) e 0,25 m (b). Para os cultivos de 1 a 4, a compactação e a escarificação foram aplicadas em setembro de 2010 e, para os cultivos de 5 a 8, apenas a compactação foi reaplicada em agosto de 2011. Barras verticais representam o desvio-padrão.



**Figura 2.** Intervalo hídrico ótimo (IHO) (a) e frequência de classes de IHO (b) para o conjunto de amostras das profundidades de 0,07 e 0,25 m em cada tratamento (E=PDE; D=PD; e C=PDC). A legenda é comum para ambos os gráficos e o primeiro e o segundo números representam, respectivamente, o valor da RP e do módulo de  $\psi$  usados no limite inferior do IHO. Números entre colchetes representam o limite superior de cada classe de IHO, cujo limite inferior está implícito a partir do limite superior da classe precedente (exceto para IHO=0).

O ajuste dos modelos de RP e CRA do IHO resultou nas equações:

$$RP = 0,063078 Ds^{5,98455} \theta^{-1,99241} \quad (4)$$

$$\theta = EXP(-1,17297 + 0,330277 Ds) |\psi|^{-0,08752} \quad (5)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2 = 1 - SQR/SQT_{corrigida}$ ) foi 0,67 e 0,88 para os modelos de RP e CRA, respectivamente, e os coeficientes de ambos os modelos foram significativos a 1 % pelo teste t. O  $R^2$  do modelo de RP é menor do que os relatados por outros pesquisadores [Imhoff et al. (2000),  $R^2 = 0,95$ ; Silva et al. (2008),  $R^2 = 0,91$ ; Blainski et al. (2008),  $R^2 = 0,83$  a 0,88], usando o modelo de Busscher (1990) e medições em amostras com penetrômetros de laboratório (condição semelhante a deste estudo). Contudo, 86 % dos resíduos do modelo de RP deste estudo estiveram

em classes entre -1 e 1 MPa e apenas 14 % excederam 1 MPa em valores absolutos.

A mudança de 2 para 3 ou 4 MPa, no modelo da RP, causou alterações expressivas no IHO, enquanto a mudança de -1,5 para -0,8 MPa para o  $\psi$  no modelo da CRA alterou pouco o IHO (Figura 2a). Esse resultado é concordante com relatos sobre a importância da RP no IHO (Collares et al., 2006; Freddi et al., 2007; Klein & Camara, 2007; Tormena et al., 2007). Além disso, a densidade crítica ( $Ds_c$ ) não foi alterada pela mudança de -1,5 para -0,8 MPa, para o  $\psi$  no modelo da CRA.

Considerando as profundidades de 0,07 m e 0,25 m em conjunto, a frequência de classes de IHO=0 foi de até 65 % no PDC e as demais classes de IHO tiveram

frequências de no máximo 25 % (Figura 2b). No PDE, as maiores classes de IHO foram mais frequentes, chegando a 82 %; classes de IHO menores que  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  não passaram de 18 %, sendo iguais a 0 % na maioria dos casos. As frequências das classes de IHO no PD foram intermediárias às do PDE e PD.

Com o uso de 2, 3 e 4 MPa como RP crítica, as respectivas  $D_{s_c}$  no IHO foram: 1,31; 1,40; e  $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$ . Com esses três limites de densidade, a frequência de amostras coletadas com densidades maiores que a  $D_{s_c}$  foi 13 % no PDE, 24 % no PD e 61 % no PDC, para a  $D_{s_c} = 1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ ; 0 % no PDE, 3 % no PD e 31 % no PDC, para  $D_{s_c} = 1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ ; e 0 % no PDE, 2 % no PD e 8 % no PDC, para  $D_{s_c} = 1,44 \text{ Mg m}^{-3}$ . Usando a equação sugerida por Marcolin & Klein (2011), para calcular a  $D_s$  máxima ( $D_{s\max}$ ) que seria obtida pelo teste de Proctor, em função do teor de argila ( $64 \pm 5 \%$ ),  $D_{s\max} = 2,0138 - 0,0092^* \text{Argila}$  ( $R^2 = 0,92$ ), a  $D_{s\max}$  seria de  $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ . Esse valor é próximo da  $D_s$  de condições que seriam assumidas com compactação extrema para o solo do experimento, ou seja, a densidade de 13 amostras coletadas em uma estrada utilizada para trânsito de máquinas agrícolas, ao lado do experimento ( $1,47 \pm 0,08 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Com base na  $D_{s\max}$  ( $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ ), 73 % dos locais amostrados a 0,07 e 0,25 m no PDC estavam com grau de compactação igual ou maior que 90 %, contra 40 e 17 % dos locais amostrados a 0,07 m e 0,25 m no PD e PDE, respectivamente. Assim, tanto a  $D_s$  como o IHO indicam que as medições de plantas seriam negativamente influenciadas pela compactação do solo do PDC.

Os valores médios, seguidos pelo desvio-padrão, das variáveis de planta foram: população de plantas ( $39726 \pm 8032$  plantas  $\text{ha}^{-1}$ ), altura de plantas ( $1,74 \pm 0,19$  m), índice de área foliar ( $2,88 \pm 1,8$ ), profundidade efetiva de raízes ( $0,39 \pm 0,07$  m), rendimento de grãos ( $3727 \pm 957 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e peso de 1000 grãos ( $0,293 \pm 0,04$  kg). De modo geral, os menores valores dessas variáveis foram verificados nos cultivos da safra 2011/2012, em que houve escassez de chuva (Quadro 1).

As correlações de Spearman do IHO com as

variáveis de planta foram predominantemente positivas para altura de plantas (ApR), profundidade efetiva (ZeR) e índice de área foliar (IAFR) e predominantemente negativas para população de plantas (PopR) e rendimento de grãos (RendR) (Quadro 2). Os coeficientes de correlação variaram de -0,20 a 0,36, mas a maioria das correlações não foi significativa. As correlações para ApR, ZeR e IAFR estiveram de acordo com o que se tem pressuposto em relação ao IHO (quanto maior o IHO, melhor a qualidade física do solo para as plantas), mas não houve concordância entre RendR e qualidade física do solo definida pelo IHO, independentemente da combinação (RP:  $\psi$ ).

A discordância entre rendimento de grãos do milho e IHO sugere que aspectos experimentais podem ter mascarado a relação entre IHO e produção. Nesse sentido, pode ter havido efeito relacionado à variação da população de plantas, uma vez que houve correlação entre RendR e PopR; a cultura do milho tem pequena capacidade de compensar a diminuição no número de espigas por área (Sangui, 2000; Marchão et al., 2005). Contudo, a correlação de Spearman entre RendR e PopR, na sequência do primeiro ao oitavo cultivo (0,52\*; 0,03; 0,00; 0,20; 0,18; 0,69\*; 0,26; e 0,37), indicou que apenas o primeiro e sexto cultivos poderiam conter efeito da população, interferindo na relação entre RendR e IHO.

Se, por um lado, a variação da população de plantas pode ter dificultado a identificação de efeito da compactação, por outro, a escassez de chuva deve ter intensificado estresses mecânicos da compactação. Na safra 2010/2011, as precipitações pluviais foram de apenas 9 mm no período de 04/01/2011 a 20/01/2011 e somente de 2 mm entre os dias 26/02/2011 e 16/03/2011. Na safra 2011/2012, a partir do dia 19/11/2011, a maioria das precipitações foi menor que 10 mm, exceto em três delas: 31/11/2011 (28 mm), 13/01/2012 (15 mm) e 21 e 22/01/2012 (133 mm). Nos cultivos 5, 6, 7 e 8, a precipitação acumulada (Quadro 1) foi, na maioria, menor que o consumo médio da cultura do milho (500 mm), sem restrição hídrica (Matzenauer et al., 2002). Nos cultivos 5 e 6, foram

**Quadro 2. Matriz de sinais (+ e -) da correlação de Spearman das medidas de plantas nos oito cultivos com o intervalo hídrico da profundidade de 0,07 m (sinais da esquerda) e 0,25 m (sinais da direita)**

PopR <sup>(1)</sup>	ApR	ZeR	IAFR	RendR	P1000R
IHO_2:1,5 <sup>(2)</sup>	--	+* +	++	++	--
IHO_3:1,5	--	+* +	++	+* +	--
IHO_4:1,5	--	+* +	+* +	+* -	-+
IHO_2:0,8	--	+* +	++	+* +	--
IHO_3:0,8	--	+* +	+* +	+* +	--
IHO_4:0,8	+-	+* +	+-	+* +	-+

<sup>(1)</sup> A letra R no fim da abreviação das variáveis indica que são valores relativos ao maior valor de cada cultivo. Pop: população de plantas; Ap: altura de plantas; Ze: profundidade efetiva de raízes; IAF: área foliar; Rend: rendimento de grãos; e P1000: peso de 1000 grãos. <sup>(2)</sup> Valor de RP (primeiro número) e do módulo do  $\psi$  (segundo número) utilizados no limite inferior do IHO. \* significativo a 5 %.

necessárias duas irrigações (30 mm em 07/01/12 e 18 mm em 17/02/12); e no 7 foi necessária uma irrigação de 18 mm em 28/03/12, para garantir a sobrevivência das plantas.

Quanto aos nutrientes, a variabilidade dos teores de P, K e Al, avaliados em 24 amostras coletadas aleatoriamente na área experimental, foi pequena para se constituir causa importante da resposta da cultura. Os teores de Al conferiram saturação menor que 2 % em todas as camadas, mas os teores médios de P, a 0,25 e 0,45 m, e de K, a 0,45 m, foram classificados como baixos (CQFS, 2004), o que pode constituir deficiência nutricional, comprometendo ainda mais o crescimento das plantas pela compactação (Santos et al., 2005). Assim, tanto a precipitação como a condição nutricional foram favoráveis e não atenuadoras do efeito da compactação sobre a cultura.

Estudos anteriores também relataram que a produção de grãos tem pouca associação com o IHO. Em dois desses estudos realizados na Índia (Verma & Sharma, 2008; Gathala et al., 2011), o IHO foi definido como sendo a diferença percentual, em relação à porosidade total, do intervalo entre o conteúdo de água para porosidade de aeração de 10 % e o conteúdo de água para RP crítica de 1,7 ou 2 MPa ( $IHO_k$ , %). Para o rendimento de grãos do trigo (RGT,  $Mg\ ha^{-1}$ ), Verma & Sharma (2008) apresentaram, respectivamente, para a safra 2003/2004 e para a safra 2004/2005, as regressões:

$$RGT = -0,86 + 0,19 IHO_k, R^2 = 0,417 \quad (6)$$

$$RGT = -1,37 + 0,30 IHO_k, R^2 = 0,499 \quad (7)$$

Nesses mesmos estudos, os autores não obtiveram relação estatística significativa para arroz, milho e soja. Gathala et al. (2011) apresentaram para a safra 2008/2009, respectivamente, para  $IHO_k$  medido nas camadas de 0,05 e 0,10 m de profundidade, as regressões:

$$RGT = 3,71 + 0,249 IHO_k, R^2 = 0,52 \quad (8)$$

$$RGT = 3,59 + 0,287 IHO_k, R^2 = 0,45 \quad (9)$$

As taxas de aumento do RGT das quatro regressões são relativamente próximas entre si e estiveram no intervalo de 0,19 a 0,30  $Mg\ ha^{-1}$  por percentual de aumento no  $IHO_k$ . Contudo, há grandes diferenças em termos de RGT para o  $IHO_k = 0$ . As equações 6 e 7 indicam que o RGT seria zero antes até do  $IHO_k$  ser reduzido a zero, pois o intercepto das equações é negativo. Ao contrário, as regressões 8 e 9 indicam que poderiam ser produzidas de 3,59 a 3,71  $Mg\ ha^{-1}$  de grãos de trigo (intercepto da equação) se o  $IHO_k$  fosse reduzido a zero. Embora tenha sido observado relação estatística entre RGT e  $IHO_k$ , um mesmo valor de  $IHO_k$  esteve associado a valores muito diferentes de RGT nas diferentes safras, o que evidencia que a relação é bastante dependente de outros fatores que controlam a produção da culturas.

Para a cultura de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), muito sensível à compactação do solo,

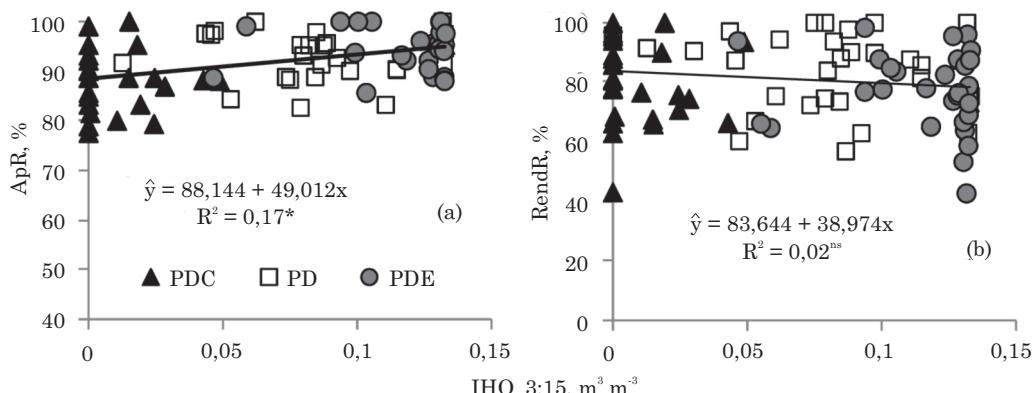
Cavalieri et al. (2012) verificaram que a altura de plantas, a produção de raízes tuberosas e a matéria seca dessas raízes, em plantio convencional, preparo mínimo e sem preparo, num Latossolo com 31 % de argila e 68 % de areia, estiveram relacionadas com o IHO. As regressões obtidas indicaram que mais de 60 % da variação das medidas da cultura foram explicadas pela variação do IHO e que a matéria seca de raízes seria 68 % menor, quando o IHO fosse reduzido a zero.

Para os dados dos oito cultivos de milho desta pesquisa, a melhor associação entre IHO e medidas de plantas foi descrita por uma função linear que explicou apenas 17 % da variação da altura das plantas (Figura 3a). Em termos de rendimento de grãos, mudanças no IHO desde zero a 0,13  $m^3\ m^{-3}$  não estiveram associadas com a variação no RenR (Figura 3b). A correlação de Spearman entre RendR e  $IHO_{3:1,5}$  da camada de 0,07 m em cada cultivo, na sequência do primeiro ao oitavo (0,20; -0,69\*, -0,37; -0,08; -0,03; -0,14; 0,43; e -0,64\*), indica que o sentido da relação e a significância a 5 % foram circunstanciais.

Semelhantemente, inconsistência da relação entre IHO e produção de grãos de milho e trigo já havia sido relatada por Benjamin et al. (2003). Os autores apresentaram apenas o coeficiente de três regressões, das quais apenas a regressão do rendimento de trigo em função do IHO foi significativa ( $R^2 = 0,76^{**}$ ). Portanto, os resultados deste trabalho não foram surpreendentes e estão de acordo com resultados anteriores publicados, agregando evidências de que a atual representação matemática do conceito de IHO requer correções para ser assumido como índice robusto capaz de descrever qualidade física do solo para crescimento e produção de grãos das culturas.

Sendo o IHO muito sensível ao limite crítico de RP adotado, mas sendo a resposta das culturas pouco concordante com a mudança do IHO, a hipótese é que o estresse mecânico não foi descrito adequadamente pela RP. Na proposição do IHO, Silva et al. (1994) anteciparam essa questão, salientando que a resistência do solo obtida com um penetrômetro é mais aplicável a uma matriz homogênea, mas não é diretamente relacionada ao crescimento de plantas em solos com macroestrutura. Embora Silva et al. (2004) tenham relatado relação estatística entre taxa de crescimento em altura de plantas de milho e resistência do solo à penetração ( $R^2 = 0,75^{***}$  em cultivo convencional e  $R^2 = 0,43^{***}$  em plantio direto), recentemente foi apontado novamente que a RP é fator de pouca relevância em solos compactados com abundância de bioporos (Silva et al., 2010).

Críticas ao uso da RP para representar a resistência mecânica ao crescimento de raízes basearam-se no fato de que as medidas de RP são feitas em direção invariável e que se assume que a resistência limite para o crescimento de raízes não muda com o decréscimo do conteúdo de água, o que está em desacordo, respectivamente com as mudanças de



**Figura 3.** Regressão linear entre altura de plantas relativa (ApR) (a) e rendimento de grãos relativo (RendR) (b), em função do IHO\_3:1,5. \* significativo a 5%; \*\* não significativo.

direção e pressão de turgor celular durante o crescimento das raízes (Whalley et al., 1998; Clark et al., 2003; Bengough et al., 2011). Além disso, nenhum critério, levando em conta o fluxo de fornecimento de água para a planta, é considerado para o traçado da curva limite de RP no diagrama do IHO. Nesse ponto, Håkansson & Lipiec (2000) sugerem a inclusão da condutividade hidráulica no limite inferior do IHO, consistindo num limite com propriedades relacionadas ao fluxo de água. Além disso, a conexão da taxa de absorção de água da planta com a demanda atmosférica por meio do potencial de fluxo matricial (Jong van Lier et al., 2009) poderia aperfeiçoar o limite inferior do IHO. Caso essas correções não sejam implementadas, o IHO continuará impreciso para dimensionar o risco de perdas na produção de grãos por efeito da compactação do solo. Tento em vista que aproximadamente 26 milhões de hectares de plantio direto no Brasil (FEBRAPDP, 2010) dependem de melhor conhecimento da relação entre compactação e produção das culturas, há grande espaço e necessidade de novos estudos nesse tema.

## CONCLUSÕES

1. A significância da correlação entre IHO e variáveis de crescimento da cultura do milho dependeu da combinação de valores de resistência à penetração e do potencial matricial usados no limite inferior do IHO e da profundidade do solo, em que o IHO foi calculado. Contudo, a melhor associação pode ser descrita por uma relação linear que explicou apenas 17% da variação da altura das plantas em função da variação do IHO.

2. Não houve correlação entre IHO e produção de grãos de milho, indicando que, embora o IHO seja sensível à compactação do solo, ele é impreciso com índice agronômico de manejo da compactação para culturas, cujo objetivo principal é a produção de grãos.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à CAPES, pelo auxílio financeiro; e à UNIJUÍ-RS, pelo apoio na condução do experimento.

## LITERATURA CITADA

- BENGOUGH, A.G.; MCKENZIE, B.M.; HALLETT, P.A. & VALENTINE, T.A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.*, 62:59-68, 2011.
- BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C. & VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116:137-148, 2003.
- BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:975-983, 2008.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 33:519-524, 1990.
- CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A. & VIDIGAL FILHO, P.S. Intervalo hídrico ótimo versus produção de mandioca sob diferentes sistemas de preparo num Latossolo Vermelho distrófico. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 19., Lages, 2012. Anais... Lages, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. CD-ROM
- CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R. & BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil*, 255:93-104, 2003.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:1663-1674, 2006.

- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS.** Manual de adubação e de calagem para os estados do RS e SC. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2004. 394p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.** Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Brasília, Embrapa, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.** Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP.** Evolução da área de plantio direto no Brasil - Dados estatísticos. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br/>>. Acesso em 30 mar. 2010
- FREDDI, O.S.; CENTURON, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. & SILVA, A.P.** Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. Bragantia, 66:477-486, 2007.
- GATHALA, M.K.; LADHA, J.K.; SAHARAWAT, Y.S.; KUMAR, V.; KUMAR, V. & SHARMA, P.K.** Effect of tillage and crop establishment methods on physical properties of a medium-textured soil under a seven-year rice-wheat rotation. Soil Sci. Soc. Am. J., 75:1851-1862, 2011.
- GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; GELAIN, N.S.; OLIVEIRA, A.E. & UHDE, L.T.** Identificação de camadas com diferentes estados de compactação pela análise fatorial da resistência do solo à penetração. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 8., Santa Maria, 2010. Anais... Santa Maria, SBCS-Núcleo Regional Sul, 2010. CD-ROM
- GUBIANI, P.I.; WINK, C.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & GELAIN, N.S.** Software AreaMed desenvolvido para medição de áreas a partir de imagens digitais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., Fortaleza, 2009. Anais... Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 2009. CD-ROM
- HÅKANSSON, I. & LIPIEC, J.** A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil Till. Res., 53:71-85, 2000.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A.** Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. Pesq. Agropec. Bras., 35:1493-1500, 2000.
- JONG van LIER, Q.; DOURADO NETO, D. & METSELAAR, K.** Modeling of transpiration reduction in van Genuchten-Mualem type soils. Water Res. Res., 45:1-9, 2009.
- KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K.** Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. R. Bras. Ci. Solo, 31:221-227, 2007.
- KLEIN, V.A.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J.** Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 10:646-650, 2006.
- KLUTE, A.** Water retention: Laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods. Madison, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. p.635-662.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E. & TORMENA, C.A.** An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 97:1210-1215, 2005.
- LETEY, J.** Relationship between soil physical properties and crop productions. Adv. Soil Sci., 1:277-294, 1985.
- MARCHÃO, R.L.; BRASIL, E.M.; DUARTE, J.B.; GUIMARÃES, C.M. & GOMES, G.A.** Densidade de plantas e características agronômicas de híbridos de milho sob espaçamento reduzido entre linhas. Pesq. Agropec. Trop., 35:93-101, 2005.
- MARCOLIN, C.D. & KLEIN, V.A.** Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. Acta Sci. Agron., 23:349-354, 2011.
- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MALUF, J.R.T.; BARNI, N.A.; BUENO, A.C.; DIDONE, I.A.; ANJOS, C.S.; MACHADO, F.A. & SAMPAIO, M.R.** Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Fepagro, 2002. 105p. (Boletim Fepagro, 10)
- McDONALD, J.H.** Handbook of biological statistics (versão online). 2.ed. Baltimore, Sparky House Publishing, 2009. 319p. Disponível em: <<http://udel.edu/~mcdonald/statintro.html>>. Acesso em: 18 fev. 2010.
- REINERT, D.J. & REICHERT, J.M.** Coluna de areia para medir a retenção de água no solo - protótipos e teste. Ci. Rural, 36:1931-1935, 2006.
- RODRIGUES, L.R.; GUADAGNIN, J.P. & PORTO, M.P., orgs.** In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO E SORGO (54 e 37). Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul, safras 2009/2010 e 2010/2011. Veranópolis, Fepagro - Serra, 2009. 179p.
- SANGOI, L.** Understanding plant density effects on maize growth and development: An important issue to maximize grain yield. Ci. Rural, 31:159-168, 2000.
- SANTOS, G.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G. & FURTINI NETO, A.E.** Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. Ci. Agrotecnol., 29:740-752, 2005.
- SAS Institute.** SAS/STAT procedure guide for personal computers. 5.ed. Cary, 1999.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; IMHOFF, S. & KLEIN, V.A.** Indicadores da qualidade física do solo. In: JONG van LIER, Q., ed. Física do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.241-281.

- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1-10, 2008.
- SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & KAY, K. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Sci. Agric.*, 61:451-456, 2004.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- VERMA, S. & SHARMA, P.K. Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). *Soil Till. Res.*, 98:1-10, 2008.
- WHALLEY, W.R.; BENGOUGH, A.G. & DEXTER, A.R. Water stress induced by PEG decreases the maximum growth pressure of the roots of pea seedlings. *J. Exp. Bot.*, 49:1689-1694, 1998.