



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Gubiani, Paulo Ivonir; Reichert, José Miguel; Reinert, Dalvan José
INDICADORES HÍDRICO-MECÂNICOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO E CRESCIMENTO DE
PLANTAS

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 37, núm. 1, enero-febrero, 2013, pp. 1-10

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180225736021>

- 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

REVISÃO DE LITERATURA

INDICADORES HÍDRICO-MECÂNICOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO E CRESCIMENTO DE PLANTAS⁽¹⁾

Paulo Ivonir Gubiani⁽²⁾, José Miguel Reichert⁽³⁾ & Dalvan José Reinert⁽³⁾

RESUMO

O efeito da compactação do solo sobre o crescimento de plantas é uma informação necessária para orientar o manejo do solo. Embora o intervalo hídrico ótimo (IHO) tenha sistematizado a relação entre compactação e fatores físicos diretamente relacionados com o crescimento de plantas, sua eficiência para prever respostas biológicas, sobretudo a produção de grãos, ainda não foi comprovada. Resultados de pesquisas em nível celular indicam que os níveis de estresses hídricos e mecânicos que ocorrem nas raízes durante o secamento do solo são parcialmente representados pelo IHO. Consequentemente, a previsão de resposta no crescimento e na produção das culturas não se confirma na maioria dos casos. Além do refinamento dos limites do IHO, novos índices precisam ser desenvolvidos, com capacidade de integrar a variação dos fatores físicos do solo ao longo do ciclo de crescimento das plantas, determinados por fatores meteorológicos. Indicadores de frequência, período de ausência e acumulado de estresses hídricos mecânicos foram sugeridos. Sem avanços, a capacidade de previsão do risco de redução na produção das culturas por compactação do solo será pequena e insuficiente para orientar ações de manejo do solo.

Termos de indexação: plantio direto, intervalo hídrico ótimo, alongação celular.

SUMMARY: HYDRIC AND MECHANICAL INDICATORS OF SOIL COMPACTION AND PLANT GROWTH

The effect of soil compaction on plant growth is widely used as orientation for soil management. Although the limiting water range (LLWR) underlies the systematization of the relationship between compaction and physical factors directly related to plant growth, its efficiency to predict biological responses, especially of grain yield, has not yet been proven.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 23 de maio de 2012 e aprovado em 11 de dezembro de 2012.

⁽²⁾ Doutorando em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Campus Universitário, Avenida Roraima nº 1000, Bairro Camobi. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: paulogubiani@gmail.com

⁽³⁾ Professor Titular, Departamento de Solos, UFSM. E-mail: reichert@smail.ufsm.br; dalvan@ccr.ufsm.br

Results of research at the cellular level indicate that the water and mechanical stress levels that occur in the roots during soil drying are partially represented by the LLWR. Consequently, the expected response in crop growth and production cannot be achieved in most cases. In addition to refining the boundaries of the LLWR, new indexes need to be developed, capable of integrating the variation of the physical factors of soil along the growth cycle of plants determined by meteorological factors. Indicators of frequency of the period of absence and of accumulation of water and mechanical stress were suggested. Without advances, the ability to predict the risk of reduced crop yields due to soil compaction will be marginal and insufficient to support actions of soil management.

Index terms: no-tillage, least limiting water range, cell elongation.

INTRODUÇÃO

Um dos objetivos das pesquisas em física do solo é estabelecer a relação quantitativa entre produção das culturas e compactação solo. O conhecimento das propriedades físicas mais influenciadas pela compactação, como essas interagem entre si e como são alteradas pelo manejo são pontos com grande volume de pesquisa. Porém, as pesquisas que relacionam crescimento vegetal com propriedades físicas ainda produzem muitos resultados discordantes.

A importância das propriedades físicas para o crescimento de plantas é definida pela atribuição do conceito de fator físico direto (concentração de oxigênio, resistência mecânica, potencial da água e temperatura do solo) e indireto (textura, agregação e densidade), propostos por Letey (1985); os indiretos modificam os fatores que atuam diretamente sobre processos fisiológicos. Essa classificação não é perfeitamente análoga à de suprimento nutricional da bioquímica das plantas com base no critério de essencialidade. Dentre os fatores físicos do solo com influência direta, o potencial da água, o oxigênio e a temperatura participam em processos bioquímicos da multiplicação celular, mas a resistência mecânica do solo não constitui elemento indispensável do metabolismo celular e dos processos fisiológicos das plantas. Entretanto, essa resistência influencia relações bioquímicas e aspectos morfológicos das raízes (Whalley et al., 2006; Bengough et al., 2011) e tem sido usada para avaliar compactação do solo por apresentar relação estatística com o crescimento de plantas (Beutler et al., 2006a,b, 2008; Kaiser et al., 2009).

Em escala de campo, é grande o desafio de quantificar o efeito “puro” dos fatores físicos do solo em mecanismos que alteram processos biológicos fundamentais como fotossíntese, respiração e nutrição, visto que há participação de outros efeitos como pragas, doenças, plantas invasoras, nutrientes, carbono e oxigênio atmosféricos, energia fotoquímica e térmica da radiação solar. Relações estatísticas empíricas entre medidas biológicas e fatores físicos do solo podem representar apenas parte ou muito pouco do mecanismo responsável pela modificação da

resposta das plantas. Porém, o uso integrado dos fatores físicos diretos aumenta as chances de detectar a relação que pode haver entre crescimento das plantas e estado de compactação, embora não haja conhecimento seguro do mecanismo e do principal fator físico causador da mudança biológica.

Na perspectiva de integrar fatores físicos com base na ideia de que o conteúdo de água controla o nível de estresse dos fatores físicos diretos, Letey (1985) propôs o conceito de faixa de conteúdo de água não limitante (NLWR - *non limiting water range*), adicionando dois limites ao conceito de água disponível para as plantas. Dependendo da densidade do solo, o conteúdo de água máximo para que não houvesse deficiência de aeração poderia substituir o conteúdo de água na capacidade de campo (CC), e o conteúdo mínimo de água para que a resistência mecânica não limitasse o crescimento de raízes poderia substituir o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (PMP). Embora Letey (1985) tenha representado o conceito do NLWR por meio de um diagrama, esse autor não sugeriu valores para os limites de potencial matricial, concentração de oxigênio e resistência mecânica do solo.

O conceito do NLWR foi interpretado por Silva et al. (1994) como faixa hídrica com existência de estresses menores ao crescimento das raízes. O NLWR foi substituído por intervalo de umidade menos limitante (LLWR - *least limiting water range*). Contudo, os fatores físicos diretos, concentração de oxigênio e resistência mecânica ao crescimento de raízes, usados para definir o NLWR, foram substituídos no LLWR pelos seus estimadores, respectivamente porosidade de aeração (PA) e resistência, que o solo oferece à penetração de uma haste metálica (RP). A necessidade de usar esses estimadores, em razão da dificuldade de modelar a concentração de oxigênio (Jong van Lier, 2010) e a resistência mecânica que o solo oferece à elongação radicular (Bengough, 1997, 2006, 2011; Clark et al., 2003), possibilitou a representação matemática do LLWR; no entanto, introduziu relações empíricas ao invés de processos da interface solo-raiz. A partir do trabalho de Orellana et al. (1997), o LLWR passou a ser descrito como “intervalo hídrico ótimo” (IHO), com a mesma abordagem conceitual de Silva et al. (1994) (Figura 1a).

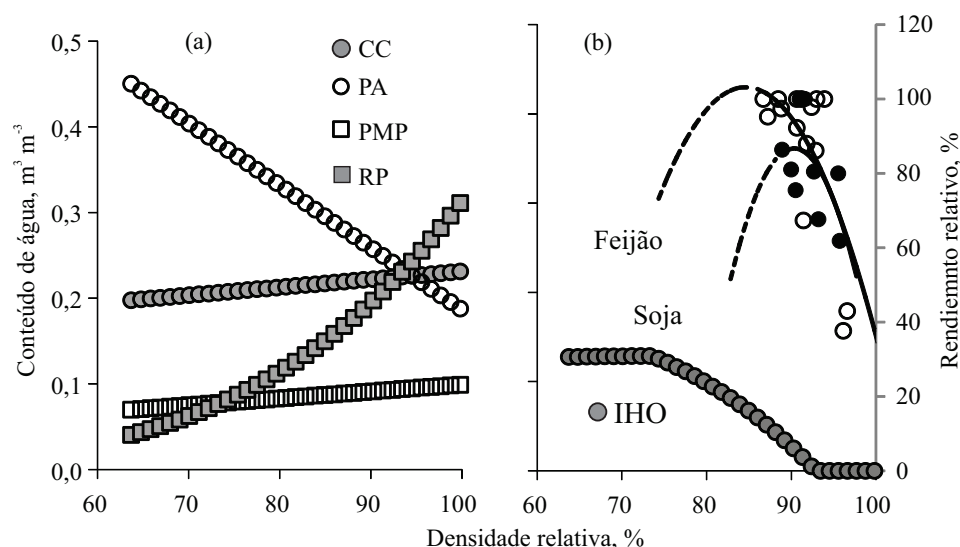


Figura 1. (a) Diagrama do intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Vermelho Distrófico (adaptado de Collares et al., 2006, substituindo-se a densidade do solo pela densidade relativa descrita em Reichert et al., 2009). Os símbolos da legenda representam o conteúdo de água para uma porosidade de aeração de 10 % (PA), a resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP), a capacidade de campo a 0,01 MPa (CC) e o ponto de murcha permanente a 1,5 MPa (PMP). (b) Conteúdo de água do intervalo hídrico ótimo (IHO) e rendimento relativo da soja (Streck, 2003; Collares et al., 2006) e feijão (Streck, 2003; Collares et al., 2006; Gubiani, 2008) no mesmo Argissolo. O valor máximo das equações polinomiais quadráticas não coincide com rendimento relativo 100 % por questões de ajuste aos dados experimentais ($r^2=0,65$ e $p<0,05$ para feijão - círculos sem preenchimento - e $r^2=0,32$ e $p<0,05$ para soja - círculos preenchidos). Os trechos pontilhados representam o prolongamento das equações para valores de densidades menores que os valores verificados nos experimentos de campo.

A maioria das pesquisas publicadas, em que se estudou o IHO, foi desenvolvida no Brasil. Até julho de 2012, 38 títulos de artigos foram indexados na *Base ISI Web of Knowledge* contendo o termo *least limiting water range*. Apenas em 26 % desses artigos foram feitas medições biológicas, mas essas variáveis dependentes não foram analisadas por meio de regressões para investigar a eficiência do IHO, variável independente. Algumas outras pesquisas não indexadas na *Base ISI Web of Knowledge* relataram relação estatística entre variável de planta e IHO (Benjamin et al., 2003; Verma & Sharma, 2008; Gathala et al., 2011; Cavalieri et al., 2012), mas as relações nem sempre foram significativas e em alguns casos foram contraditórias.

LIMITAÇÕES E MELHORIAS NO IHO

O IHO foi fundamentado em processos físicos e fisiológicos, mas representado com base em valores críticos constantes de propriedades hídrico-mecânicas e de espaço poroso. A intensidade de mudança dos fatores físicos e o efeito dessas mudanças no sincronismo entre as taxas de fornecimento e a demanda dos suprimentos que a planta requer ao longo do ciclo de crescimento não são descritos pelo IHO.

Inúmeros estudos, como os de Lapen et al., 2004; Siegel-Issem et al., 2005; Collares et al., 2006; Klein & Câmara, 2007; Kaiser et al., 2009, relatam a pequena associação entre IHO e resposta das plantas. As principais críticas ao conceito do IHO são com base no argumento que o IHO representa mudança abrupta dos estresses físicos sobre o crescimento das plantas em vez de contínua e gradual (Zou et al., 2000) e que o IHO não inclui o efeito da condutividade hidráulica do solo na absorção de água pelas raízes (Håkansson & Lipiec, 2000). Assim, mesmo que haja relação estreita entre IHO e mudança estrutural, persiste a incerteza sobre como estabelecer uma relação confiável entre produção de plantas e IHO, a fim de que se possa utilizar o IHO para julgar a pertinência de alternativas de descompactação, como escarificação mecânica (Camara & Klein, 2005a), cultivo de plantas para formação de bioporos (Abreu et al., 2004; Nicoloso et al., 2008) ou a combinação dessas (Nicoloso et al., 2008) para aumentar a produção das culturas.

A hipótese de que plantas cultivadas em solos com IHO pequeno são mais vulneráveis à seca e ao excesso de umidade do solo do que as cultivadas em solos com IHO maior seria refutada pela relação do rendimento das plantas com a densidade relativa (Figura 1b). A relação matemática entre rendimento relativo e densidade relativa, ou grau de compactação, é bem descrita por uma função polinomial quadrática

(Håkansson & Lipiec, 2000; Reichert et al., 2009), enquanto o IHO, na maioria dos casos, decresce de um valor máximo até um valor igual a zero com o aumento da densidade (Silva et al., 1994; Collares et al., 2006; Tormena et al., 2007; Klein & Camara, 2007; Kaiser et al., 2009). Assim, o rendimento das plantas e o IHO não têm a mesma relação com a densidade. Resultados de pesquisas que possibilitem avaliar a relação entre produção de grãos e IHO, como o exemplo da figura 1b, são escassos na literatura e as curvas de rendimento da figura 1b carecem de mais dados. Contudo, sabendo que uma função polinomial quadrática descreve bem a relação matemática entre rendimento relativo e densidade relativa, a figura 1b indica que um valor grande do IHO pode significar rendimento tão pequeno quanto o rendimento numa condição de IHO igual a zero.

Nas pesquisas envolvendo o IHO e as medidas de plantas, há evidências de reposta quadrática de medidas biológicas com a densidade, mas não de resposta linear com o IHO. O crescimento radicular e rendimento do feijoeiro (Colares et al., 2006) e o rendimento da soja (Klein & Camara, 2007) não foram maiores em plantio direto escarificado (maior IHO) do que em plantio direto (menor IHO). Em duas safras de soja (2003/04 e 2004/05), Beutler et al. (2008) verificaram que em solo revolvido (maior IHO) e sem compactação adicional o rendimento da soja foi, em muitos casos, menor que no solo trafegado (menor IHO). Esses resultados sugerem que, se o grau de compactação for intermediário, o rendimento das culturas pode ser maior em solo onde houve diminuição do IHO (aumento da densidade) do que onde houve aumento do IHO (diminuição da densidade).

A densidade crítica, definida quando o IHO é igual a zero (Dsc_{IHO}), vem sendo empregada como indicadora de compactação crítica para o crescimento de plantas. A Dsc_{IHO} parece ter boa associação com o teor de argila (Reichert et al., 2009), cuja equação $Dsc_{IHO} = 1,83803 - 0,00078 * \text{Argila}$ ($r^2=0,92$) obtida pelos autores foi usada neste trabalho para estimar a Dsc_{IHO} e avaliar a relação do rendimento relativo com a razão Ds/Dsc_{IHO} (Figura 2). Valores de Ds/Dsc_{IHO} menores, iguais ou maiores que 1 (um) indicam que a Ds era menor, igual ou maior que a Dsc_{IHO} , respectivamente. A associação do rendimento relativo com o afastamento da Ds em relação à Dsc_{IHO} foi fraca, pois a Ds/Dsc_{IHO} variou de 0,6 a 1,15 e em 110 casos (81 % dos dados) o rendimento relativo manteve-se acima de 80 %. Portanto, embora o estado de compactação seja definido como crítico com base na densidade, não há garantia de que o rendimento seja prejudicado.

Houve decréscimo evidente no rendimento relativo apenas quando a Ds/Dsc_{IHO} foi maior que 1,05 (Figura

2). Mesmo que não tenha sido possível investigar o modo como a precipitação pluvial influenciou a relação entre o rendimento de grãos e os fatores físicos do solo nas pesquisas sumarizadas na figura 2, pois o detalhamento disponível sobre variáveis meteorológicas possibilitou, no máximo, agrupar os dados em categorias gerais qualitativas (legenda da figura 2), houve indicação que a partir de Ds/Dsc_{IHO} maior que 1,05 a diminuição do rendimento de grãos ocorreu independentemente das condições meteorológicas. Disso decorre que a densidade crítica em plantio direto poderia ser maior que a Dsc_{IHO} (Reichert et al., 2009). O aumento da Dsc_{IHO} teria ainda como justificativa a maior continuidade e estabilidade dos macroporos, sobretudo os bioporos verticais verificados em maior quantidade nos sistemas de cultivo com mínima mobilização do solo (Abreu et al., 2004; Nicoloso et al., 2008). Entretanto, o aumento da Dsc_{IHO} conduz ao aumento do número de lavours em plantio direto cuja densidade seria menor que a crítica; e o grau de compactação dessas lavours seria ainda tolerável.

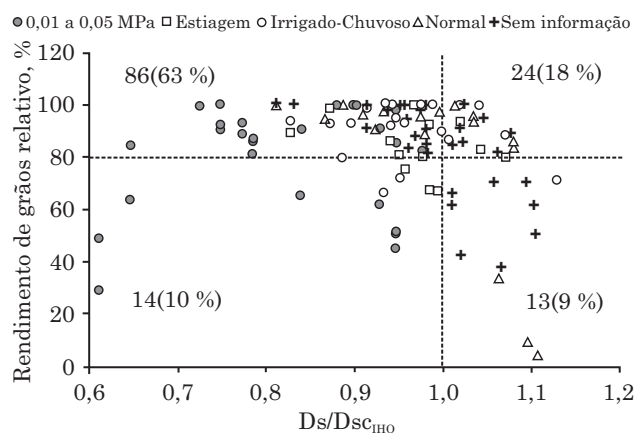


Figura 2. Relação do rendimento relativo com a razão Ds/Dsc_{IHO} . Os dados foram compilados dos trabalhos de Beutler et al. (2004a,b, 2005, 2007); Secco et al. (2004, 2009); Camara & Klein (2005b); Collares et al. (2006); Lima et al. (2006); Marcolan & Anghinoni (2006); Freddi et al. (2007); Gubiani (2008); Klein et al. (2008); Nicoloso et al. (2008); Collares et al. (2008); Amado et al. (2009); e Kaiser (2010). Ao total, são 141 dados de produção de grãos das culturas de arroz, trigo, soja, milho e feijão, densidade do solo e teor de argila. As informações da legenda representam subgrupos conforme indicadores de regime hídrico descrito pelos autores. O rendimento relativo foi calculado dentro de cada grupo de comparação previamente definido nos experimentos. Foi usada a Ds até a camada de 0,3 m, onde se verificava maior diferença entre os manejos de solo.

⁽⁴⁾ Dados cedidos pelo doutorando Marcelo Mentges, obtidos no ano 2010 e ainda não publicados.

Estimando a D_{scIHO} pela equação proposta por Reichert et al. (2009), as densidades para uma relação $Ds/D_{scIHO} = 1,05$ (queda acentuada no rendimento, com base na figura 2) seriam 1,85; 1,60; e 1,36 $Mg\ m^{-3}$ para solos com 0,10; 0,40; e 0,70 $kg\ kg^{-1}$ de argila, respectivamente. Mesmo em lavouras sob plantio direto, valores altos de densidade ocorrem nas áreas de manobra das máquinas onde o tráfego e a compactação são maiores (Silva et al., 2004). Porém, na maior parte da lavoura (Amado et al., 2009) e mesmo em solos com integração soja-bovinos de corte por 10 anos (Carvalho et al., 2011) as densidades são menores que os valores calculados anteriormente. Num conjunto de 1.884 dados provenientes das camadas 0-0,07 e 0,07-0,14 m de diversos solos sob diferentes sistemas de cultivos, em 32 municípios do oeste do Rio Grande do Sul (Fiorin et al., 2007), 50 % das amostras estavam com densidades acima da D_{scIHO} (Figura 3). Em outro conjunto de 648 dados, provenientes das camadas 0-0,075 e 0,075-0,15 m de quatro Latossolos e um Argissolo com históricos de três a 20 anos de plantio direto (lavouras comerciais), sendo dois Latossolos utilizados no sistema integração lavoura-pecuária, apenas em 25 amostras (4 %) a densidade foi maior que a D_{scIHO} (Figura 3).

O aumento da densidade crítica elevaria a segurança em prever a resposta das plantas e orientar ações de manejo em solos com estado de compactação, em que a densidade é igual ou maior que a crítica. Entretanto, há grandes chances de que os novos valores críticos fiquem acima da maioria das densidades que ocorrem nas lavouras de plantio direto. Consequentemente, apenas algumas áreas seriam enquadradas num estado de compactação prejudicial ao crescimento das plantas. Além disso, o aumento da densidade crítica também aumenta a faixa de densidades precedentes à crítica, região onde a frequência de estresse hídrico e mecânico e de redução

no rendimento das plantas contém a incerteza associada às variáveis meteorológicas, como precipitação e evapotranspiração. Assim, aumentaria a proporção de áreas compactadas em que os índices de compactação propostos até o momento não possibilitam fazer previsão do risco de redução da produção e não fornecem confiabilidade suficiente para orientar ações de descompactação.

Quando a relação Ds/D_{scIHO} foi menor que 0,7 o rendimento relativo decresceu acentuadamente (Figura 2). Håkansson & Lipiec (2000) argumentam que o decréscimo no rendimento em solo com densidade baixa é ocasionado pela diminuição da condutividade hidráulica (K) e pelo menor contato solo-raiz. Na visão de Håkansson & Lipiec (2000), a relação entre IHO e rendimento das plantas, com base no rendimento da cevada de 100 experimentos de campo em solo com revolvimento anual, poderia ser melhorada com a inclusão da condutividade hidráulica como um quarto limite no IHO. Para isso, seria necessária uma função $K=f(\theta, Ds)$, em analogia à função $RP=f(\theta, Ds)$, e a definição de limites críticos de K . Valores gerais de K crítica podem ser obtidos de dados experimentais sumarizados por Draye et al. (2010), para diferentes espécies, tipos de raiz e condições de crescimento. Conforme relatado pelos autores, valores de potencial matricial a partir dos quais a K do solo é menor que a K da raiz (início da limitação ao fluxo de absorção de água) podem variar de -0,01 MPa para solos arenosos a -0,1 MPa para os de textura média, enquanto o solo sempre controla a absorção a -1,5 MPa, mesmo para os valores mais baixos de condutividade observados nas raízes. Isso indica que a adoção apenas do PMP a -1,5 MPa como limite inferior hídrico do IHO não representa as diferenças na restrição ao suprimento de água em razão das diferenças na K em solos com granulometria diferentes. Contudo, há primeiro o desafio de se obter uma função $K=f(\theta, Ds)$ para posterior avaliação da importância da condutividade hidráulica no IHO.

Nos limites críticos inferiores do IHO não há representação da diminuição gradual do estresse mecânico com a perda do turgor celular. O modelo simplificado, $R = m(P - W_c - \sigma)$, tem sido utilizado para se analisar o efeito do turgor celular na elongação celular (Bengough et al., 1997). Nesse modelo, R é a taxa de elongação celular; m , o coeficiente de extensibilidade da parede celular; W_c , o limite de resistência da parede celular para a elongação; P , a pressão de turgor; e σ , a resistência mecânica oferecida pelo solo. O modelo indica que a elongação só acontece quando a pressão promotora da expansão ($P - W_c$) for maior que a resistência oferecida pelo solo (σ).

Analisando algumas publicações, Bengough et al. (2011) relatam que a resistência mecânica do solo suficiente para interromper a elongação radicular de milho (σ_{max}) decresceu com o aumento do módulo do potencial matricial ($|\psi_m|$), de acordo com a equação $\sigma_{max} = 4 - 2,33 |\psi_m|$. Essa equação foi obtida para medidas de resistência mecânica no intervalo 0 a 2,9 MPa e potenciais matriciais maiores que -0,63 MPa.

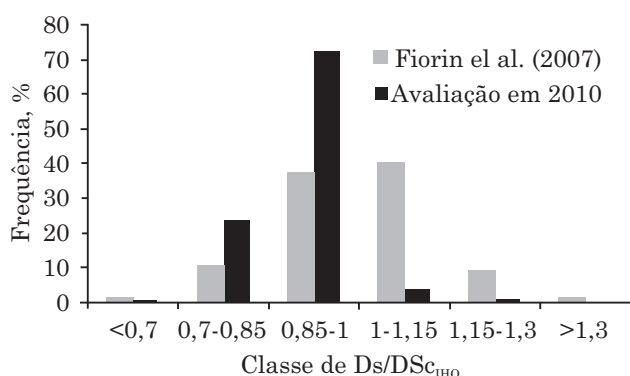


Figura 3. Razão Ds/D_{scIHO} [1.884 dados de 32 municípios do oeste do Rio Grande do Sul publicados por Fiorin et al. (2007) e 648 dados cedidos pelo doutorando Marcelo Mentges]. A densidade crítica (D_{scIHO}) foi calculada pela equação $D_{scIHO} = 1,83803 - 0,00078 \cdot \text{Argila}$ (Reichert et al., 2009).

Como a pressão exercida pelas raízes é de mesma magnitude que σ_{\max} , a equação informa, com a ressalva que valores estimados pela equação para potenciais menores que -0,63 MPa possam conter erro, que quando o $|\psi_m|$ for igual a 1,72 MPa a raiz não exerce nenhuma força contra o solo ($\sigma_{\max} = 0$) e, por conseguinte, não há manifestação de resistência mecânica do solo contra a elongação radicular. Entretanto, a superfície da raiz pode deixar de exercer pressão contra as partículas de solo do seu entorno mesmo antes do $|\psi_m|$ ser igual a 1,72 MPa, se P for menor que W_c . Portanto, à medida que decresce o conteúdo de água no solo (aumento de $|\psi_m|$), decresce também a σ_{\max} em direção ao limite inferior do IHO (-1,5 MPa). Assim, as medidas do estimador da resistência mecânica do solo (RP), que sempre aumentam com o aumento de $|\psi_m|$, podem estar em desacordo com a resistência mecânica que se manifesta na interface solo-raiz.

O influxo de água em resposta ao gradiente de potencial osmótico entre o interior e o exterior celular pressiona o protoplasto contra a pressão confinante da parede celular rígida e gera a pressão de turgor $P = \pi_0 - \pi_i$, em que π_0 e π_i são o potencial osmótico fora e dentro da célula, respectivamente (Bengough et al., 1997). De acordo com Pritchard (1994), valores típicos de π_i de células da zona de crescimento sem impedimento mecânico são em torno de -0,7 MPa, normalmente avaliado em solução. No solo, o potencial da água no exterior de uma raiz é comumente representado pelo potencial matricial (ψ_m). Usando ψ_m para representar π_0 , e caso não houvesse osmorregulação celular (aumento da concentração de espécies iônicas e moleculares no vacúolo para promover a diminuição de π_i e manter o influxo de água e o turgor), P seria igual a zero quando $\psi_m = \pi_i$. Assim, para ψ_m menores que -0,7 MPa (considerando $\pi_i = -0,7$ MPa), o mecanismo de ajuste osmótico deve operar com máxima eficiência para garantir que P seja, pelo menos, maior que W_c e possa promover expansão celular.

Em experimento com estresse hídrico controlado, Whalley et al. (1998) verificaram que a pressão máxima de crescimento (σ_{\max}) de raízes de ervilha reduziu linearmente com a diminuição do potencial osmótico da solução externa (π_0), de acordo com a equação $\sigma_{\max} = 0,663 - 0,707 |\pi_0|$. Utilizando essa equação, σ_{\max} seria zero (interrupção da elongação radicular) quando $\pi_0 = -0,94$ MPa, valor bem próximo do valor de $\pi_i = -0,7$ MPa de células da zona de crescimento sem impedimento mecânico (Pritchard, 1994). Quando o crescimento de raízes ocorre sob estresse mecânico, há pequena diminuição de π_i e aumento de no máximo 0,2 MPa em P (Clark et al., 2003). Além disso, a elevação de P depende do influxo de água para o interior da célula, mecanismo que pode ser comprometido pelo decréscimo da condutividade hidráulica na interface solo-raiz com o esgotamento de água do solo (Draye et al., 2010). Embora existam diferenças no valor de σ_{\max} , consequência das particularidades experimentais, as estimativas de σ_{\max} sugerem que a resistência mecânica passa a ter

participação progressivamente menor como fator de estresse à medida que o potencial matricial diminui de valores em torno de -1 MPa.

Há alguns relatos que a resistência mecânica, de maneira geral, influencia o crescimento radicular no intervalo de potenciais hídricos -0,01 a -0,1 MPa, e o estresse hídrico é o principal fator em potenciais menores que -0,35 MPa (Siegel-Issem et al., 2005). De acordo com o modelo empírico de Feddes (Feddes et al., 1980), potenciais menores que -0,8 MPa podem cessar o crescimento radicular para grande número de plantas. A perda de turgor pode ser acompanhada de diminuição de até 50 % no diâmetro das raízes (Huck et al., 1970), efeito também verificado por Bois & Couchat (1983). Por meio de imageamento do sistema radicular de tremoço branco (*Lupinus albus* L.) com tomografia de raios-X, Carminati et al. (2009) verificaram que, após severo estresse hídrico (0,025 m³ m⁻³ de água num solo arenoso), espaços preenchidos com ar foram detectados na interface solo-raiz, no ápice da raiz principal e ao longo das raízes laterais. Restabelecido o turgor após irrigação (0,135 m³ m⁻³ de água no solo), houve aumento de 20 a 50 % do diâmetro das raízes. Assim, há evidências morfológicas e fisiológicas que a substituição do conteúdo de água a -1,5 MPa por outro limite hídrico maior que -1,5 MPa poderia melhorar a relação do IHO com a resposta das plantas.

Nesse ponto, há poucos estudos que procuram identificar as faixas de conteúdos de água em que predominam estresses mecânicos ou hídricos. Os valores de conteúdo de água indicadores de início do estresse hídrico, como uma fração de 0,3 a 0,5 da água disponível (inúmeras pesquisas sumarizadas por Carlesso, 1995), 0,4 a 0,5 da água disponível (Pereira et al., 1997) e conteúdos de água com potenciais de -0,8 MPa (Feddes et al., 1980), podem ser aproximações úteis de limites para se ponderar a participação dos fatores hídrico e mecânico. O uso de alguma restrição para a atuação do estresse mecânico parece ser razoável, pois a suposição de que a severidade do efeito da resistência mecânica é proporcional à diminuição do potencial matricial pode não ser verdadeira para toda a faixa de água disponível.

Para os parâmetros do limite superior do IHO, praticamente não há críticas relatadas nos estudos brasileiros. A maioria das culturas agrícolas é cultivada em solos bem drenados, onde o monitoramento do conteúdo de água no solo ao longo do ciclo de crescimento tem evidenciado que a frequência de períodos com excesso de água (deficiência de aeração) no solo é bem menor que a de períodos de déficit hídrico (Collares et al., 2006; Klein & Camara, 2007; Kaiser, 2010). Nessas condições de lavoura, reproduzidas nos experimentos, as pesquisas indicam relação do desempenho das plantas com a RP (Beutler et al., 2006a; Gubiani, 2008; Kaiser et al., 2009) bem mais frequente do que com a PA (Lapen et al. 2004). Isso pode ser inferido do IHO, pois se a curva da RP fosse retirada de inúmeros diagramas do IHO de áreas

agrícolas (Collares et al., 2006; Freddi et al., 2007; Klein & Camara, 2007; Tormena et al., 2007), os limites passariam a ser a CC e o PMP. Entretanto, a melhoria da relação entre resistência mecânica e crescimento de plantas requer a delimitação da faixa de conteúdo de água em que predomina o efeito do estresse mecânico, pois fora dessa faixa o que estatisticamente se atribui a efeito mecânico pode ser predominantemente efeito hídrico.

DESENVOLVIMENTO DE NOVOS ÍNDICES

A busca por índices que sumarizem os valores de um fator de estresse (ou seu estimador) no período de suscetibilidade da planta ao estresse possibilita uma relação mais completa com as consequentes respostas biológicas (produção de raízes, caules, folhas e frutos). A estratégia utilizada por Whalley et al. (2006) foi calcular os valores acumulados no tempo do potencial matricial (ψ_m), grau de saturação (S) e estresse efetivo ($\psi_m \cdot S$). Para duas safras, a matéria seca das plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) na maturidade fisiológica diminuiu linearmente com o aumento do ψ_m e do $\psi_m \cdot S$ acumulados. Nessa ideia, o acumulado de valores de RP também pode ser um índice bem associado com a produção das culturas. Contudo, ele deve ser calculado apenas no período de crescimento de raízes e restrito à faixa de conteúdo de água no solo que mantém o turgor celular e, consequentemente, o predomínio do estresse mecânico sobre o estresse hídrico.

Outra possibilidade seria avaliar a utilidade de se conhecer o período de tempo em que a RP permanece abaixo de valores críticos, considerando a evapotranspiração real (ET_r) para dada condição de cultivo (sistema solo-planta-atmosfera). Um índice com essa característica integraria a taxa de aumento da resistência mecânica na camada de solo que perde água por evapotranspiração e a variação da ET_r, que por sua vez requer parâmetros de cultura como o K_c ou o índice de área foliar e os parâmetros meteorológicos para o cálculo da evapotranspiração potencial (Pereira et al., 1997). Esses parâmetros reúnem efeitos de planta e atmosfera, agregando particularidades dos cultivos que não são representadas nas funções $RP=f(\theta)$.

Sem aplicar técnicas de modelagem, Gubiani (2008) quantificou diariamente o conteúdo de água e a RP durante o período de crescimento do feijoeiro e verificou relação ($r=0,78$; $p<0,05$) entre o rendimento de grãos e o número de dias transcorridos para a RP atingir o valor de 2 MPa. Essa estratégia difere do cálculo do número de dias que a umidade permanece dentro do IHO (Lapen et al., 2004; Klein & Camara, 2007), que é contabilizado e acumulado em todo o período de crescimento. O número de dias para a RP ser crítica indica qual a chance de haver estresse mecânico e retardo no crescimento

radicular. Se modelado, pode informar a rapidez que a RP atinge valor crítico em diferentes condições de solo, atmosféricas e estádios de crescimento de uma planta.

Com objetivo de avaliar a dinâmica da resistência mecânica do solo e sua relação com variáveis meteorológicas, Whitmore et al. (2010) simularam o conteúdo de água no solo no período de crescimento do trigo no sul da Inglaterra, com base na curva de retenção de água, na precipitação pluvial, na temperatura, na evaporação potencial e nas características da cultura. A RP modelada foi pouco sensível às mudanças na precipitação (de 0,7 a 1,3 mm), temperatura e evaporação (0,95 a 1,10 mm). Porém, os autores acreditam que, em regiões tropicais com maiores temperaturas e evaporação, as variáveis meteorológicas podem ter contribuição importante na modelagem da RP, o que merece investigação.

A frequência de ocorrência ou permanência do estresse mecânico também poderia ser uma informação importante em escala de lavoura. Há indicações que o crescimento das raízes é retardado não somente no período em que a resistência mecânica está acima dos valores críticos, mas também durante alguns dias após ter havido alívio da resistência (Bengough et al., 1997). Esses autores verificaram que a taxa de elongação radicular e o potencial osmótico do vacúolo das células de raízes de plântulas de ervilha foram restabelecidos somente 72 h após a remoção da restrição mecânica. A modelagem da frequência da RP acima de valores críticos pode fornecer um índice de risco de redução no crescimento com base na probabilidade de permanência do estresse mecânico.

A eficiência de qualquer estratégia de estimativa do estresse mecânico depende da correspondência entre o estimador (RP) com a resistência mecânica que as raízes enfrentam. Os valores críticos de RP de uma condição particular de técnica de medida, solo e espécie vegetal podem não representar o valor crítico para outras situações. A RP pode variar dependendo do método de medida (Beutler et al., 2007), e o valor crítico de RP pode variar dependendo das características da estrutura do solo (rachaduras, bioporos e regiões inter e intra-agregados com diferentes resistências que são percebidas pelas raízes, mas não discriminadas pela haste de penetração), das diferenças na habilidade anatômica do sistema radicular de espécies distintas para ajuste à geometria do espaço poroso do solo (Clark et al., 2003; Bengough et al., 2006) e da fase do ciclo de crescimento. Embora existam esses agravantes e sendo a modelagem mecanística do estresse mecânico complexa e dependente de avanços instrumentais e técnicas experimentais (Bengough et al., 2011), há necessidade e possibilidade de avanços na elaboração e melhoria de modelos empíricos para relacionar produção das culturas com compactação do solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração das propriedades físicas do solo diretamente relacionadas com o crescimento de plantas num único índice, o intervalo hídrico ótimo, foi um avanço no sentido de sistematizar a relação entre essas propriedades e o efeito da degradação da estrutura do solo sobre essa relação. Contudo, a eficiência do intervalo hídrico ótimo para prever o crescimento de plantas e, sobretudo, a produção de grãos ainda não foi devidamente comprovada.

As melhorias no intervalo hídrico ótimo podem ser obtidas pela readequação dos valores dos fatores físicos que constituem o limite inferior. Para produção vegetal, sobretudo com propósitos econômicos, o ponto de murcha permanente não é um limite que separa condições mais adequadas de condições menos adequadas para crescimento, mas sim constitui limite hídrico entre a vida e a morte da planta, ou seja, um estresse severo que deve ser evitado na lavoura. Também não é razoável atribuir ao fator mecânico efeito semelhante ao fator hídrico sobre a multiplicação e expansão celular nas proximidades do ponto de intersecção da curva da resistência à penetração com a curva do ponto de murcha permanente. A perda do turgor celular próximo ao ponto de murcha permanente pode extinguir o efeito mecânico do solo. Assim, a inclusão da condutividade hidráulica como terceiro limite inferior pode sinalizar quanto o limite hídrico inferior precisa ser deslocado para maiores conteúdos de água.

Os avanços para relacionar o crescimento de plantas com fatores físicos do solo incluem a modelagem da dinâmica dos fatores físicos a partir das variações das condições meteorológicas e de plantas, que determinam a taxa de extração de água do solo e a dinâmica do estresse hídrico, mecânico e por aeração. O crescimento de cada espécie vegetal é um processo com tempo de duração bem conhecido, em que os estresses físicos não são constantes e, por isso, não são adequadamente representados por propriedades físicas estáticas ou por medidas pontuais das propriedades físicas dinâmicas. Novos indicadores precisam ser desenvolvidos de modo a ponderar a variação dos estresses físicos. Algumas possibilidades foram abordadas nesta revisão e podem ser avaliadas quanto à sua capacidade de representar o risco de redução na produção das culturas por compactação do solo e orientar ações de manejo do solo.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à CAPES, pelo auxílio financeiro. Ao Dr. Jackson E. Fiorin e ao doutorando Marcelo Mentges, pela cessão de dados de propriedades físicas do solo.

LITERATURA CITADA

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo Franco-Arenoso sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:519-531, 2004.
- AMADO, T.J.C.; PES, L.Z.; LEMAINSKI, C.L. & SCHENATO, R.B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:831-843, 2009.
- BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J. & VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J. Exper. Bot.*, v.57, n.2, p.437-447, 2006.
- BENGOUGH, A.G.; CROSER, C. & PRITCHARD, J.A. biophysical analysis of root growth under mechanical stress. *Plant Soil*, 189:155-164, 1997.
- BENGOUGH, A.G.; MCKENZIE, B.M.; HALLETT, P.D. & VALENTINE, T.A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exper. 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.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L. & FREDDI, O.S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:1591-1600, 2008.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; SÃO JOÃO, A.D.C.G. & FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1223-1232, 2007.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. & BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 10:639-645, 2006a.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C. & SILVA, A.P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:787-794, 2006b.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:843-849, 2005.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:575-580, 2004a.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & ROQUE, C.G. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em latossolos. *Ci. Rural*, 24:361-371, 2004b.

- BOIS, J.F. & COUCHAT, P.H. Comparison of the effects of water stress on the root systems of two cultivars of upland rice (*Oryza sativa* L.). Ann. Bot., 52:479-487, 1983.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. R. Bras. Ci. Solo, 29:789-796, 2005a.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. Ci. Rural, 35:813-819, 2005b.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. Ci. Rural, 25:183-188, 1995.
- CARMINATI, A.; VETTERLEIN, D.; WELLER, U.; VOGEL, H. & OSWALD, S.E. When roots lose contact. Vadose Zone J., 8:805-809, 2009.
- CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T.R.; MARTINS, A.P.; COSTA, S.E.V.G.A.; SILVA, F.D.; ASSMANN, J.M.; LOPES, M.L.T.; PFEIFER, F.M.; CONTE, O. & SOUZA, E.D. Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. 60p. (Produção Técnica - Boletim Técnico).
- 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, 12., 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. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. R. Bras. Ci. Solo, 32:933-942, 2008.
- 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., 4:1663-1674, 2006.
- DRAYE, X.; KIM, Y.; LOBET, G. & JAVAUX, M. Model-assisted integration of physiological and environmental constraints affecting the dynamic and spatial patterns of root water uptake from soils. J. Exper. Bot., 61:2145-2155, 2010.
- FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J. & ZARADNY, H. Simulation of field water use and crop yield. J. Hydrol., 45:160-161, 1980.
- FIORIN J.E.; SCHNELL, A. & RUEDELL, J. Diagnóstico das propriedades rurais na região de abrangência das cooperativas: COOPATRIGO, COOPERROQUE, COTAP, COTRISA, CORISAL (SB) e tritícola. Cruz Alta, FUNDACEP FECOTRIGO, 2007. 172p.
- 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. Tempo para a ocorrência da resistência à penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2008.110p. (Dissertação de Mestrado)
- HÅKANSSON, I. & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil Tillage Res., 53:71-85, 2000.
- HUCK, M.G.; KLEPPER, B. & TAYLOR, H.M. Diurnal variations in root diameter. Plant Physiol., 45:529-530, 1970.
- JONG VAN LIER, Q. Gases no solo. In: JONG VAN LIER, Q., org. Física do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. v.1. p.153-176.
- KAISER, D.R. Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2010. 151p. (Tese de Doutorado)
- KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L. & KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. R. Bras. Ci. Solo, 33:845-855, 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.; VIEIRA, M.L.; DURIGON, F.F.; MASSING, J.P. & FAVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. Ci. Rural, 38:365-371, 2008.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNONE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. Soil Tillage Res., 78:151-170, 2004.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. Adv. Soil Sci., 1:277-294, 1985.
- LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. & GUBIANI, P.I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. Ci. Rural, 36:1172-1178, 2006.
- MARCOLAN, A.L. & ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 30:163-170, 2006.
- NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C. & BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. R. Bras. Ci. Solo, 32:1723-1734, 2008.
- ORELLANA, J.A.; PILATTI, M.A. & GRENÓN, D.A. Soil quality: An approach to physical state assessment. J. Sustain. Agric., 9:91-108, 1997.

- PEREIRA, A.R.; VILA NOVA, N.A. & SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba, FEALQ, 1997. 183p.
- PRITCHARD, J. The control of cell expansion in roots. *New Phytol.*, 127:3-26, 1994.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.*, 102:242-254, 2009.
- SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:797-804, 2004.
- SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SILVA, V.R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ci. Rural*, 39:58-64, 2009.
- SIEGEL-ISSEM, C.M.; BURGERA, J.A.; POWERSB, R.F.; PONDERC, F. & PATTERSONS, S.C. Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:215-226, 2005.
- 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.
- SILVA, V.R.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. *Ci. Rural*, 34:399-406, 2004.
- STRECK, C.A. Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular da cultura do feijoeiro e da soja. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 83p.(Dissertação de Mestrado)
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico 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 Tillage Res.*, 98:1-10, 2008.
- WHALLEY, W.; CLARK, L.; GOWING, D.; COPE, R.; LODGE, R. & LEEDS-HARRISON, P. Does soil strength play a role in wheat yield losses caused by soil drying?. *Plant Soil*, 280:279-290, 2006.
- 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. Exper. Bot.*, 49:1689-1694, 1998.
- WHITMORE, A.; BIRD, N.; WHALLEY, R.; WATTS, C. & GREGORY, A. Modelling soil strength and its effects on winter wheat dry matter production. In: *WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE*, 19., Brisbane, 2010. Anais... Brisbane, 2010. CD ROM.
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. *Austr. J. Soil Res.*, 38:947-58, 2000.