HIDROLOGIA DO SOLO, DISPONIBILIDADE DE ÁGUA ÀS PLANTAS E ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO

José Miguel Reichert[1], Jackson Adriano Albuquerque[2], Paulo Ivonir Gubiani[3], Douglas Rodrigo Kaiser[4], Jean Paolo Gomes Minella[1] & Dalvan José Reinert[1]

Introdução 1
Disponibilidade de Água às Plantas no Contexto de Sistema Agrícola 3
Relação da Estrutura do Solo e Crescimento Radicular com a Disponibilidade de Água 5
Índices de Qualidade Estrutural do Solo e Restrição ao Crescimento Radicular como Indicadores de Disponibilidade de Água 6
Zoneamento Agrícola e Funções de Pedotransferência para a Retenção de Água no Solo 13
Utilização do Zoneamento Agrícola 17
Pedofunções para Estimar a Disponibilidade de Água no Solo 20
Processos Hidrológicos do Solo Controladores da Retenção e Disponibilidade de Água 28
Infiltração de Água no Solo 29
Drenagem Profunda 37
Ascensão Capilar da Água no Solo 38
Escoamento Superficial 39
Evaporação da Água no Solo 40
Extração Radicular da Água do Solo 41
Considerações Finais 42
Literatura Citada 44

INTRODUÇÃO

A retenção e a disponibilidade de água no solo para as plantas são fatores de produção fundamentais ao desenvolvimento e produtividade das culturas agrícolas. Nas áreas não irrigadas, a quantidade de água disponível no solo para as plantas é diretamente dependente da capacidade do solo em reter e disponibilizar a água e de uma distribuição adequada das chuvas

[1] Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Av. Roraima 1000. CEP 97105-900. Santa Maria, RS. E-mails: reichert@smail.ufsm.br; jminella@gmail.com; dalvan@smail.ufsm.br
[2] Professor, Depto Solos, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CAV). Av. Luis de Camões, 2090, CP 281, Lages, SC, CEP 88520-000. E-mail:albuquerque@pq.cnpq.br
[3] Doutorando do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFSM. E-mail: paulogubiani@gmail.com
[4] Professor do curso de Engenharia Hídrica, Centro de Desenvolvimento Tecnológico - CDTec da Universidade Federal de Pelotas. Av. Ildefonso Simões Lopes, 2791, CEP 96060-290, Pelotas, RS. E-mail: douglasrodrigokaiser@gmail.com

ao longo do ciclo da cultura. Todavia, a água disponível durante o ciclo de determinado cultivo não depende somente da capacidade de armazenamento do solo, mas também do comportamento do ciclo hidrológico no período e de práticas de manejo que favoreçam o acesso pela planta da água no solo.

Neste texto, a disponibilidade de água será tratada de forma mais abrangente. A intenção não é a de discutir conceitos clássicos sobre água disponível no solo, mas, sim, procurar, resumidamente, discorrer sobre processos e práticas que controlam a disponibilidade de água para as culturas agrícolas, numa interpretação mais integrada do efeito das diferentes ações de manejo do solo e culturas. Um enfoque maior será dado à qualidade física do solo, com a finalidade de enfatizar que o impedimento ao crescimento radicular em solos compactados dificulta o acesso da planta a uma quantidade expressiva da água, mesmo que esta seja considerada como disponível do ponto de vista clássico.

Indicadores integradores de propriedades que descrevem a qualidade estrutural do solo e o impacto da mudança desta sobre o crescimento de plantas serão discutidos também no contexto de disponibilidade de água. Uma discussão mais focada na conceituação e problemática das definições de capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, água facilmente extraível e outros limites associados à inter-relação solo-planta pode ser encontrada em Carlesso (1995) e Jong van Lier (2000).

A retenção de água no solo será discutida com o propósito de avaliar a problemática da estimativa da capacidade de armazenamento de água ou da capacidade de água disponível no solo (CAD) e da elaboração do zoneamento agrícola de risco climático. Destaque será dado sobre a estimativa da retenção de água no solo por funções de pedotransferência, suas limitações e avanços necessários para melhorar a previsão da disponibilidade de água e adequar o zoneamento agrícola.

Por fim, serão abordados processos que alteram a retenção e disponibilidade de água no solo sob a análise da partição dos fluxos e da adequação metodológica para a escala de avaliação desses processos. Ênfase maior será dada para a infiltração de água no solo, salientando os fatores que governam sua magnitude e a variabilidade no tempo e no espaço, bem como sua relação com o sistema de uso e manejo do solo.

DISPONIBILIDADE DE ÁGUA ÀS PLANTAS NO CONTEXTO DE SISTEMA AGRÍCOLA

A circulação da água no ambiente agrícola é controlada por todos os elementos desse sistema com os quais ela interage. A disponibilidade de água para as plantas depende não só da quantidade de água que infiltra e é retida no solo, mas também da quantidade que pode ser acessada e utilizada pela planta. As entradas são basicamente função do padrão das precipitações pluviais naturais (frequência, intensidade, duração) e, ou, irrigação, visto que a ascensão do lençol freático tem importância menor, além do que a recarga das águas subterrâneas depende das precipitações pluviais. A quantidade de água que permanece no solo após sua saturação e a drenagem ter-se tornado insignificante (capacidade de campo[5]) é influenciada por várias propriedades do solo (profundidade efetiva, granulometria, agregação, distribuição e continuidade de poros, estratificação, matéria orgânica, dentre outras), sobretudo por aquelas que descrevem a condição estrutural do solo (Hillel, 1998). A quantidade de água que pode ser acessada e removida do solo pela planta depende do volume de solo explorado pelo sistema radicular, do estado energético em que a água se encontra no solo, da facilidade de movimento em direção às raízes e do déficit de vapor na atmosfera (Kirkham, 2005).

A definição exata do que é água disponível sob o ponto de vista conceitual da ciência do solo nem sempre é clara (Jong van Lier, 2000) e limita-se a caracterizar a quantidade de água que está no solo, normalmente delimitada em termos de potencial energético e passível de ser acessada pelas raízes das plantas (Carlesso, 1995). Entretanto, disponibilidade de água sob a perspectiva de sistema agrícola é algo complexo e difícil de ser descrito por um conceito envolvendo apenas o solo, ou o solo e a planta, pois muitos fatores variáveis do sistema atuam de forma integrada no tempo e no espaço, alterando a quantidade de água que pode ser utilizada pela planta (Figura 1). A água que está no solo pode ser caracterizada em termos de movimento e de estado energético, medidas utilizadas para calcular quantidades disponíveis para as plantas (AD e FAD) e também o armazenamento. A reposição desse suprimento é feita principalmente pela precipitação pluvial, cuja frequência, intensidade e volume determinam quanta água será ofertada para reabastecer o solo. Em muitas áreas, a irrigação cumpre esse papel.

[5] ver problemática da definição da capacidade de campo em Jong van Lier (2000).

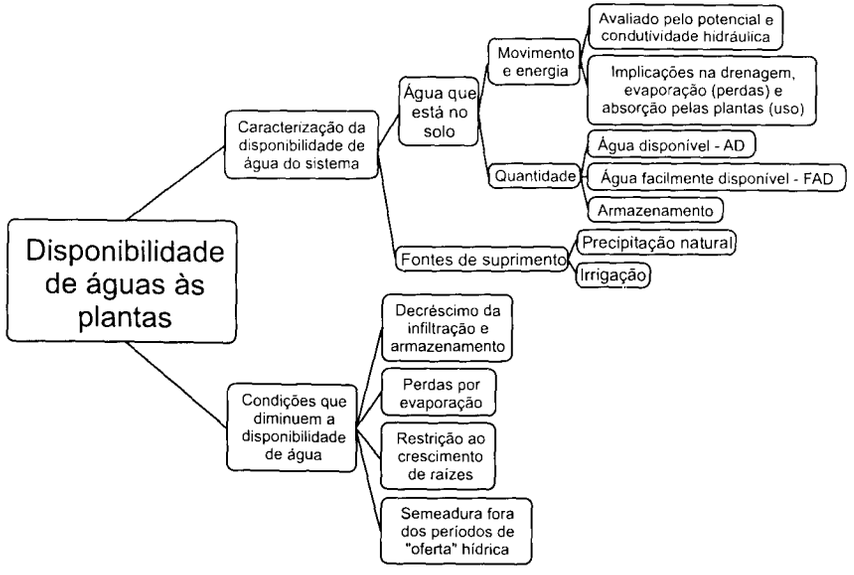


Figura 1. Disponibilidade de água no contexto de sistema agrícola. AD: umidade na capacidade de campo menos a umidade no ponto de murcha permanente; FAD: umidade na capacidade de campo menos a umidade crítica de extração de água pela planta (Ritchie & Jordan, 1972).

A quantidade de água ofertada ao solo que efetivamente será armazenada e posteriormente disponibilizada para as plantas depende de vários fatores (Figura 1). As condições de superfície e da matriz do solo devem favorecer a máxima infiltração da água que chega ao solo. Nesse aspecto, práticas de manejo que reduzem a permanência da água na superfície do solo (ausência de terraços, faixas de cultivo, cultivo em nível, cobertura permanente do solo) que promovem a compactação do solo (tráfego excessivo, tráfego em solo úmido, máquinas que exercem pressão maior que a capacidade de suporte do solo, pisoteio animal) e que reduzem o teor de matéria orgânica do solo (baixa produção de biomassa, mobilização do solo) são fatores que diminuem a disponibilidade de água.

A superfície do solo deve permanecer protegida para que somente uma fração mínima da água infiltrada no solo seja perdida por evaporação. Assim, práticas que expõem o solo (sazonalidade da produção de biomassa, mobilização do solo) também diminuem a fração de água usada pelas culturas. Mesmo que a água tenha infiltrado e permaneça armazenada no solo, o ambiente físico e químico do solo deve ser favorável para que as raízes possam explorar um volume grande de solo e ter acesso às quantidades de água

requeridas durante o ciclo de produção. Portanto, práticas de manejo que promovam a ocorrência de qualquer fator impeditivo de natureza física (aeração deficiente, elevada resistência mecânica), química (acidificação, estratificação dos nutrientes) ou biológica (simbiose deficiente, doenças) diminuem a capacidade de a planta acessar a água disponível no solo.

A semeadura dos cultivos fora do período de oferta hídrica é outro fator que condiciona o crescimento em situações de baixa disponibilidade de água. A ocorrência de estiagens tem acarretado perdas na produção agrícola, trazendo consequências negativas aos agricultores e demais setores da cadeia produtiva. No Rio Grande do Sul, por exemplo, Berlato & Fontana (2001) relatam prejuízo acumulado de 19,1 milhões de toneladas de soja e milho, decorrente de seis estiagens que ocorreram entre os anos de 1987 a 2000, representando esse montante bem mais que a produção total de todos os grãos obtida num ano normal. Segundo os autores, só nos anos de 1992 a 1997, as estiagens foram responsáveis por cerca de 93 % das perdas de safra da soja e 88 % das perdas de safra do milho.

Nesse contexto mais abrangente, o conceito clássico de água disponível informa apenas a quantidade de água que potencialmente pode ser utilizada por uma planta, independentemente de ela estar ou não nesse solo, sendo, portanto, invariável ao longo do período de cultivo. Num sistema de produção agrícola, a água disponível ao longo de um ciclo de cultivo não é o resultado somente do efeito de um conjunto de propriedades da matriz do solo atuando sobre a retenção da água. Todos os fatores que controlam as entradas e saídas de água do solo são responsáveis pelas modificações na dinâmica, na energia e, portanto, na quantidade de água disponível para as plantas.

Relação da Estrutura do Solo e Crescimento Radicular com a Disponibilidade de Água

O solo é um sistema aberto do qual a água pode passar para a atmosfera e para horizontes mais profundos fora da zona radicular das culturas. A rede de poros representa caminho onde acontece o movimento da água no estado líquido ou de vapor, mas é também um espaço para o armazenamento que garante o fornecimento gradativo de água para o crescimento e desenvolvimento das plantas nos ecossistemas. O sistema poroso do solo é também o local ocupado pelas raízes das plantas, organismos do solo e espaço para as diversas trocas gasosas com a atmosfera. Modificações na organização, tamanho e conectividade dos poros têm reflexo no comportamento da água no solo e no crescimento de raízes.

As ações de manejo alteram o componente pedogenético mais dinâmico do sistema solo: a sua estrutura, a qual determina a funcionalidade do solo para os múltiplos fenômenos que nele ocorrem (Doran & Parkin, 1994). Em sistema de semeadura direta, alterações na estrutura do solo são de difícil correção, uma vez que o solo não é mobilizado nos cultivos subsequentes. Tanto o tráfego de máquinas agrícolas como o pisoteio animal alteram as características estruturais do solo e podem comprometer a infiltração e o armazenamento da água no solo (Hanza & Anderson, 2005; Drewry, 2006). Em áreas de integração lavoura-pecuária, o aumento da frequência de pisoteio bovino altera negativamente a taxa inicial de infiltração de água e a lâmina infiltrada acumulada (Lanzanova et al., 2007).

A disponibilidade de água também pode ser aumentada por práticas que diminuem as perdas da água do solo para a atmosfera. A presença de resíduos vegetais na superfície pode reduzir o aquecimento do solo e as perdas de água por evaporação (Bescansa et al., 2006), além de servir de mecanismo de dissipação das cargas externas aplicadas ao solo (Braida et al., 2006). Ao contrário, o revolvimento do solo promove maior aquecimento da camada superficial (Silva et al., 2006), aumentando as perdas por evaporação.

A qualidade estrutural exerce grande influência na disponibilidade de água, sobretudo por determinar o volume de solo explorado pelo sistema radicular e, consequentemente, a quantidade de água que pode ser acessada pela planta. Um solo bem estruturado é aquele que mantém a funcionalidade do seu sistema poroso de forma que os processos dinâmicos do solo (aeração, movimento de água) sejam mantidos em taxas adequadas ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Forsythe, 1967). A compactação do solo reduz as trocas gasosas no solo, a disponibilidade de oxigênio e aumenta a concentração de gás carbônico, o que prejudica o metabolismo do sistema radicular das plantas (Drew, 1983; Boru et al., 2003), e aumenta a resistência mecânica, diminuindo o crescimento de raízes (Silva et al., 2000a; Beutler & Centurion, 2004; Reinert et al., 2008; Kaiser et al., 2009).

Índices de Qualidade Estrutural do Solo e Restrição ao Crescimento Radicular como Indicadores de Disponibilidade de Água

O processo de absorção da água pela planta é dependente tanto do movimento da água em direção às raízes, devido ao gradiente de potencial que se forma à medida que a planta absorve a água presente na rizosfera (Taiz & Zeiger, 2004), quanto do aprofundamento das raízes, o que encurta o

caminho para o fluxo de água até às raízes e proporciona à planta maior acesso à água armazenada ao longo do perfil. Por isso, o impedimento mecânico ao aprofundamento do sistema radicular aumenta a possibilidade de ocorrência de déficit hídrico nas plantas. O confinamento das raízes nas camadas superficiais do solo, comumente observado quando existem camadas compactadas em subsuperfície (Collares et al., 2006; Reinert et al., 2008; Kaiser et al., 2009), requer que a necessidade transpiratória da planta seja suprida basicamente pelo movimento da água no solo em direção às raízes. Contudo, o movimento de água é dependente da condutividade hidráulica do solo, que decresce exponencialmente à medida que o conteúdo de água do solo diminui (Hillel, 1998). Ao contrário, a resistência ao fluxo de água aumenta à medida que o solo vai secando, e a condutividade hidráulica do solo pode se tornar menor que condutividade hidráulica das raízes em potenciais de água próximos a -0,1 MPa, dependendo da espécie (Draye et al., 2010). Como a demanda transpiratória, normalmente, aumenta progressivamente do final até o início de uma nova precipitação pluvial, a frequência de períodos em que o fluxo de água no solo em direção às raízes não atende à demanda transpiratória aumenta com o secamento do solo. Embora a planta disponha de mecanismos para regular seu balanço hídrico, principalmente via modulação estomática (Taiz & Zeiger, 2004), a ocorrência de déficit hídrico prolongado pode comprometer a produção.

Para que a absorção de água pelas plantas seja menos prejudicada nos períodos de escassez de precipitações pluviais e, ou, grandes demandas transpiratórias, as raízes devem se aprofundar para utilizar a água armazenada ao longo do perfil. Com o aprofundamento, as raízes exploram camadas do solo com maior conteúdo de água que as camadas sobrejacentes, portanto, com menor resistência ao fluxo. Além disso, a distância de fluxo ascendente é menor quanto maior for o aprofundamento das raízes. Portanto, o manejo do solo deve procurar aumentar a faixa de umidade entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente (água disponível), facilitar o reabastecimento dessa parcela de água em todo o perfil (infiltração e redistribuição de água) e favorecer o crescimento radicular para aumentar a eficiência do uso da água pelas plantas.

Restrições ao crescimento radicular por impedimento mecânico ou deficiência de aeração são, normalmente, avaliadas indiretamente por meio da resistência do solo à penetração (Tormena, 1998; Silva et al., 2004; Beutler et al., 2006), porosidade e densidade (Reinert et al., 2008; Reichert et al., 2009b), as quais têm sido utilizadas para identificar condições críticas de compactação. Uma interpretação mais completa da qualidade física do solo

e da probabilidade de restrição ao crescimento das plantas, à medida que o solo sofre compactação (aumento da densidade), pode ser obtida pelo intervalo hídrico ótimo (IHO) (Silva et al., 1994), que integra fatores físicos de crescimento das plantas (Figura 2).

De acordo com Silva et al. (1994), a possibilidade de as plantas crescerem sem ou com mínimas restrições é maior quando o conteúdo de água está dentro do IHO. Por outro lado, se o conteúdo de água no solo estiver fora do IHO, limitações ao crescimento podem ocorrer por deficiência de aeração, impedimento mecânico ou deficiência hídrica (Silva et al., 1994). Mesmo que o IHO venha sendo questionado como um indicador do desempenho das plantas (Reichert et al., 2009a) e por utilizar a porosidade de aeração e não o fluxo de oxigênio para definição do limite superior (Asgarzadeh et al., 2010), ele é útil para indicar como o manejo está alterando a estrutura do solo e quais as consequências esperadas em processos como infiltração, drenagem, aeração, disponibilidade de água, dentre outros. Além disso, a permanência do conteúdo de água dentro ou fora do IHO depende da frequência e intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem do solo, os quais são governados pelas condições meteorológicas predominantes durante o crescimento da cultura.

Embora os resultados de medições biológicas (crescimento de raízes, parte aérea e produção de grãos) sejam pouco concordantes sobre a relação do IHO com a resposta das plantas (Collares et al., 2006; Klein & Camara, 2007; Kaiser et al., 2009), é coerente se esperar que, para determinado solo, a probabilidade de as raízes serem submetidas a condições mecânicas que retardem seu crescimento aumenta a partir do valor de densidade em que a resistência do solo à penetração passa a definir o limite inferior do IHO (ponto a da Figura 2) e fiquem críticas a partir do valor de densidade que torna o IHO igual a zero (ponto b da Figura 2). Solos com maiores densidades e sujeitos a ciclos de secagem mais longos impõem às plantas condições mecânicas restritivas mais severas e duradouras. Contudo, se as precipitações pluviais forem regulares, a resistência mecânica do solo pode ser mantida em valores abaixo dos impeditivos ao crescimento de raízes.

Como a redução do crescimento radicular é um dos fatores que limita o acesso à água pela planta, o IHO pode ser interpretado tanto como um descritor da qualidade física do solo, como indicador de provável diminuição da capacidade de água disponível (definida como a água disponível multiplicada pela profundidade efetiva do sistema radicular) e menor uso da água pelas plantas. Assim, o IHO pode ser interpretado também como indicador da dificuldade de a planta utilizar a água disponível com o aumento da

compactação do solo. A planta acessa com maior facilidade toda a água disponível quando os limites do IHO são a umidade na capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Quando a umidade para a porosidade de aeração mínima ou a umidade para RP crítica (a partir do ponto a da Figura 2) definem os limites do IHO, a provável redução do crescimento radicular implica maior distância e restrição para o fluxo de água do solo para as raízes.

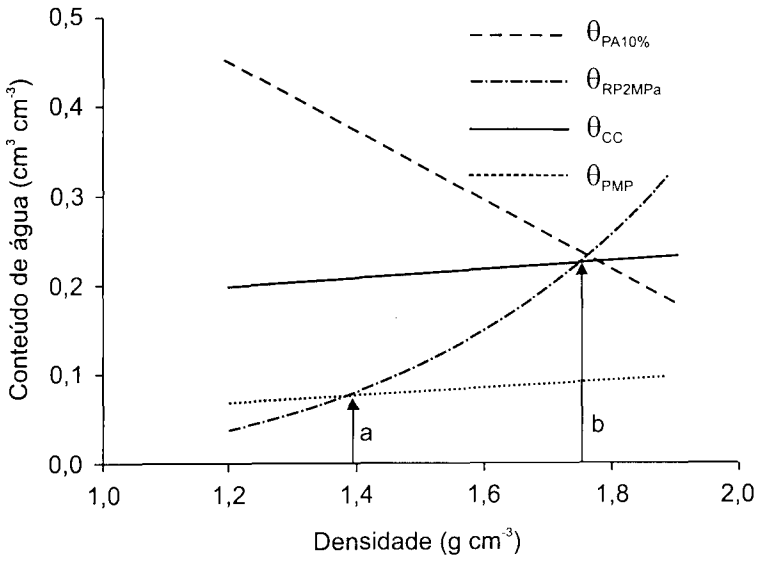


Figura 2. Intervalo hídrico ótimo (diferença entre o limite superior e inferior para cada valor de densidade) para um Argissolo Vermelho Distrófico. Os símbolos da legenda representam o conteúdo de água para uma porosidade de aeração de 10 % (θ_{PA10}%), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{RP2MPa}), capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}).

Fonte: Collares et al. (2006).

Em Argissolo com diferentes níveis de compactação cultivado com feijoeiro, Collares et al. (2006) verificaram que, em todas as camadas onde foi realizada a compactação, a umidade do solo permaneceu 22 dias abaixo do limite inferior (conteúdo de água para uma RP de 2MPa) do intervalo hídrico ótimo (Figura 3). Em todos os tratamentos (com e sem compactação), o conteúdo de água permaneceu dentro dos limites de capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Contudo, na maioria das condições de solo em que o conteúdo de água para uma RP de 2MPa passou a definir o limite inferior do IHO, o rendimento da cultura diminuiu.

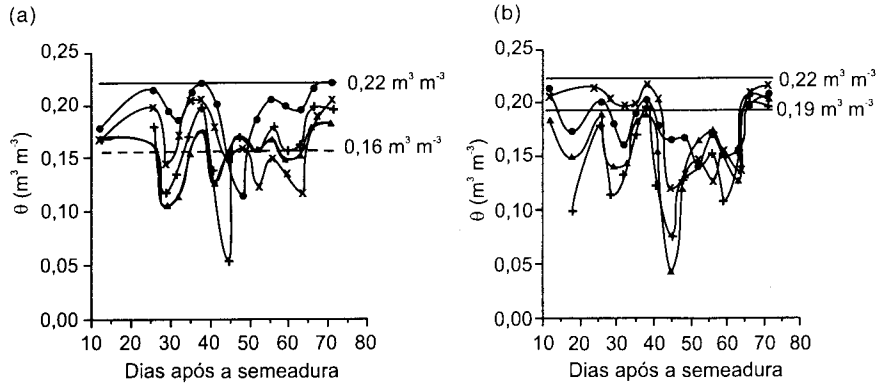


Figura 3. Umidade volumétrica do solo (θ, $m^3 m^{-3}$), limite superior (linha cheia) e inferior (linha pontilhada) do intervalo hídrico ótimo para os tratamentos plantio direto há doze anos (a) e plantio direto que recebeu quatro passadas de uma máquina de 9 Mg (b). A simbologia das linhas representa as diferentes camadas de solo. +: 0,00-0,06 m; ▲: 0,06-0,12 m; ●: 0,12-0,24 m; x: 0,24-0,48 m.

Fonte: Collares et al. (2006).

O crescimento das plantas ocorre numa sequência de etapas geneticamente determinadas através de uma série de reações bioquímicas e fisiológicas, que são condicionadas por fatores ambientais (Tais & Zeiger, 2004). A deficiência de água, nutrientes e oxigênio e a elevada resistência mecânica do solo ao crescimento das raízes em determinada fase do ciclo prejudicam as fases seguintes do desenvolvimento das plantas. Porém, a resposta depende também da espécie, da fase do ciclo em que determinado estresse ocorre e do tempo em que a planta fica submetida sob determinado estresse.

Nesse sentido, Gubiani (2008) verificou que o rendimento de grãos da cultura do feijoeiro decresceu com a diminuição do tempo para a resistência do solo à penetração até atingir o valor de 2 MPa, contabilizado a partir do momento em que a umidade do solo estava na capacidade de campo (Figura 4). Foi verificado também que o acesso à água pela cultura foi decrescente do menor para o maior estado de compactação, avaliado pela quantidade de água extraída do solo. Assim, a água disponível foi parcialmente utilizada pela planta. A paralisação ou diminuição do crescimento das raízes implicou redução do fluxo em virtude do secamento mais rápido do solo em torno das raízes (decréscimo acentuado da condutividade hidráulica) e aumento da distância entre raízes e frentes mais úmidas que se distanciam em profundidade. Por essa razão, a água do solo compactado é extraída a taxas menores que a demanda das plantas e o solo permanece mais úmido.

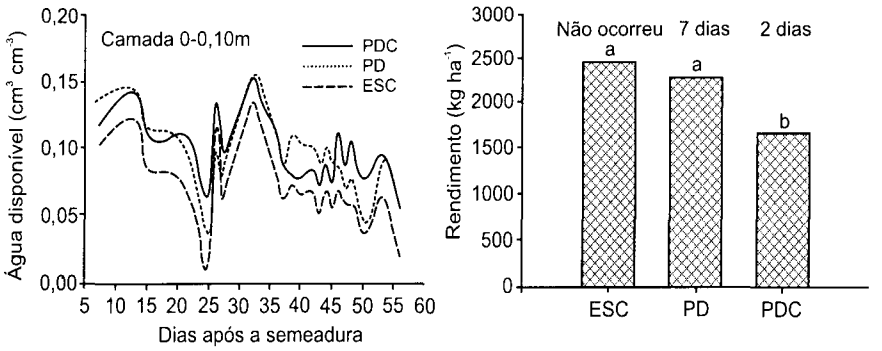


Figura 4. Água disponível no solo na camada de 0-0,10 m e rendimento do feijoeiro em diferentes níveis de compactação. ESC = escarificado; PD = plantio direto; PDC = plantio direto com compactação adicional. A informação de tempo sobre as colunas representa o número de dias até a resistência do solo à penetração atingir o valor de 2 MPa.

Fonte: Gubiani (2008).

Uma associação bastante ilustrativa da relação entre crescimento radicular e qualidade física do solo foi apresentada por Kaiser et al. (2009) (Figura 5). Na condição de solo em que a qualidade física não era restritiva, as raízes cresceram normalmente e exploraram um volume maior de solo. Contudo, em solo com limitações físicas, o crescimento das raízes ficou restrito na camada superficial, limitando o acesso à água e aos nutrientes disponíveis em camadas mais profundas. Além disso, a capacidade de armazenamento de água no solo em estudo (Argissolo) é menor na camada superficial mais arenosa; em condições de estiagem, a água retida no horizonte argiloso (Bt) dificilmente ascende para a superfície, devido às características do sistema poroso (Fiorin et al., 1997), aumentando a susceptibilidade da cultura à deficiência hídrica em curtos períodos de estiagens.

Mesmo que a densidade do solo seja considerada restritiva ao crescimento radicular, se a precipitação pluvial for bem distribuída ao longo do ciclo da cultura, o crescimento e a produtividade podem ser mantidos em padrões aceitáveis. A disponibilidade de água e a aeração do solo são necessárias até o final do ciclo reprodutivo das plantas, enquanto a resistência do solo à penetração das raízes não deve ser restritiva até o início do ciclo reprodutivo, e a temperatura do solo apresenta maior importância na germinação e emergência das plantas (Figura 6).

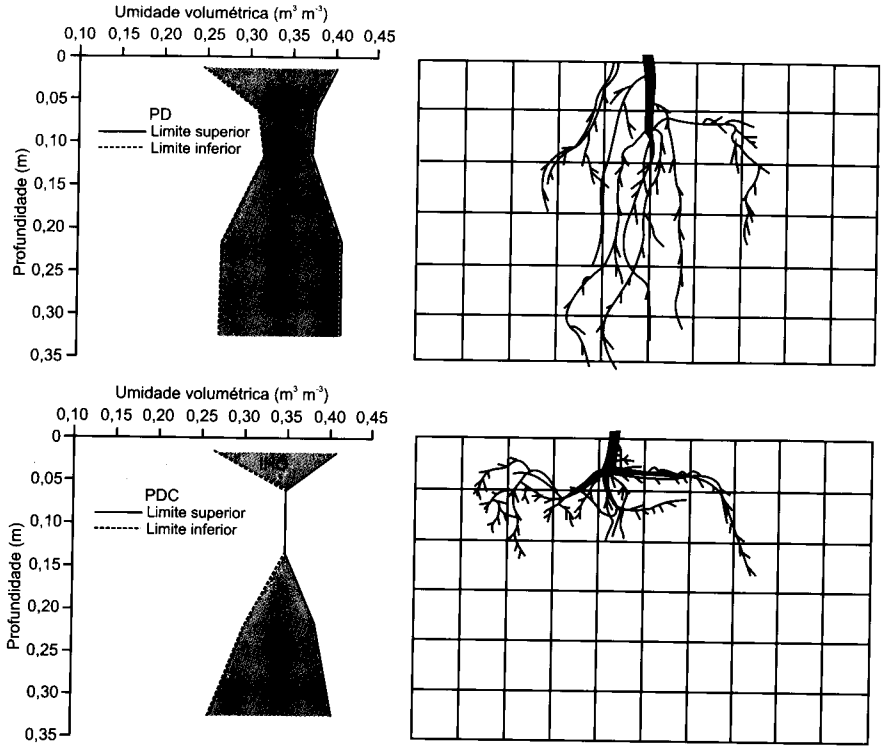


Figura 5. Intervalo hídrico ótimo no perfil do solo e distribuição do sistema radicular do feijoeiro. PD = plantio direto, PDC = plantio direto com compactação adicional, IHO = intervalo hídrico ótimo.

Fonte: Kaiser et al. (2009).

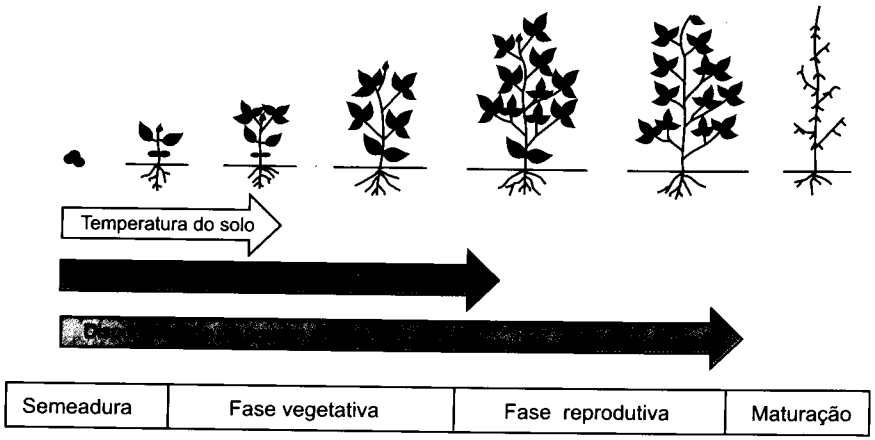


Figura 6. Fatores físicos de crescimento ao longo do ciclo das culturas.

Em áreas manejadas sob plantio direto, a camada compactada encontra-se próxima aos 10 cm de profundidade (Streck et al., 2004; Collares et al., 2006). O revolvimento do solo reduz o estado de compactação, mas a duração do seu efeito sobre as propriedades físico-hídricas e o processo de reconsolidação ao longo do tempo são pouco conhecidos. Em Latossolo Vermelho sob sistema de plantio direto, Rosa et al. (2008) verificaram, com base na demanda de tração de uma haste sulcadora, que o efeito da escarificação foi percebido por até quatro anos após o solo ter sido escarificado. Porém, Abreu et al. (2004) verificaram que quatro meses e meio após a escarificação a condutividade hidráulica de solo saturado não diferiu entre os diferentes manejos de solo, sugerindo que esse intervalo de tempo foi suficiente para ocorrer reconsolidação do solo e rearranjo do espaço poroso. Contudo, embora os estudos conduzidos para avaliação de características físico-hídricas dos solos a partir de amostras com estrutura preservada indiquem a qualidade do solo (Costa et al., 2006) e informem a dinâmica da estrutura, não há, por meio desses estudos, conhecimento do comportamento dinâmico da água ao longo do tempo, sendo essa uma determinação necessária para definir os períodos em que a planta ficou sob estresse físico.

Atualmente, com a disponibilidade de equipamentos modernos, como o TDR (Time Domain Reflectometer) e de tensiômetros equipados com transdutores de pressão, é possível avaliar no espaço e no tempo o conteúdo e o movimento da água em várias camadas e condições estruturais do perfil do solo. Com essas técnicas, fica mais fácil avaliar estratégias de manejo que conservem mais a água no solo e podem mantê-lo por maior tempo na faixa de umidade adequada, favorecendo o crescimento das plantas, como o controle da tráfego, a presença de cobertura morta na superfície e a rotação de culturas. Todas essas práticas, associadas à ausência de revolvimento intenso do solo, ajudam a preservar poros formados pelos organismos do solo e pela decomposição das raízes, o que facilita o crescimento radicular mesmo que o solo apresente alta densidade ou que a resistência à penetração esteja elevada durante períodos com baixa umidade no solo.

ZONEAMENTO AGRÍCOLA E FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

O Brasil apresenta extensa área agricultável, sendo as atividades agrícolas responsáveis por uma parcela significativa do PIB brasileiro. Como a atividade envolve risco climático e grande investimento, foi necessário elaborar o

zoneamento agrícola, o qual é dividido em "Zoneamento de Aptidão Agrícola" e "Zoneamento Agrícola de Risco Climático".

A abordagem a seguir é para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático, que estabelece períodos de plantio consoante o ciclo de cultivares e os tipos de solos para as diferentes culturas e deve ser utilizado nas aplicações de crédito e seguridade agrícola no Brasil, uma determinação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Visa a subsidiar o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO), para reduzir o déficit financeiro deste programa por meio da redução das taxas de sinistralidade agrícola no Brasil. Para a elaboração do zoneamento, são necessárias informações das condições climáticas e edáficas de cada região.

O PROAGRO foi criado em 1973 e é gerenciado pelo Banco Central do Brasil. Prevê indenizações aos agricultores após a constatação de perdas nas lavouras em função de determinados tipos de sinistro. Em decorrência do grande acesso ao programa pelas frustrações de safras, em 1987/1988, foi constatado um déficit de recursos do programa para o pagamento de coberturas aos agricultores. Em 1990, o Banco Central do Brasil suspendeu o pagamento das indenizações, pois o débito havia se agravado. A partir desse momento, várias alterações foram implementadas para garantir seu funcionamento, as quais constam na Lei Agrícola nº 8.171, de 17 de janeiro de 1991. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento alertou sobre os problemas estruturais do programa, por meio de um relatório divulgado em 1993 pela Secretaria Executiva CER/PROAGRO denominado: "Eventos Generalizados e Seguridade Agrícola". Este relatório foi elaborado por técnicos da Secretaria da Comissão Especial de Recursos, da Universidade de Brasília e do IPEA (Rossetti, 2001), sobre eventos climáticos sinistrantes de maior incidência em todas as regiões do País.

No referido relatório, foi evidenciado que: as variações climáticas por excesso ou falta de chuva devessem ser consideradas para reduzir os riscos; que os órgãos de pesquisa deveriam determinar a técnica utilizada nos cultivos; que o MAPA deveria ser responsável pela representatividade do setor agrícola; e que o PROAGRO seria um indutor de técnica e não apenas um pagador de seguros. Para isso, foi necessário adotar uma série de procedimentos e, dentre os sugeridos pelo MAPA, destacou-se a necessidade de regionalizar o Brasil em "zonas de riscos", predeterminando-se as técnicas a serem adotadas.

Em 1994, o MAPA recomendou alterações no PROAGRO, mas o modelo de gestão aplicado ainda resultou em dívidas acumuladas junto aos produtores. Com isso, houve a necessidade de implantação em 1995 do "Projeto de Redução de Riscos Climáticos na Agricultura" importante para concretizar o

Zoneamento Agrícola no Brasil (Rossetti, 2001). O projeto objetivou o "desenvolvimento de estudos de regionalização dos sinistros climáticos no Brasil, visando a minimizar as perdas na produção agrícola, disponibilizando ao produtor rural técnicas que permitiram fugir de riscos climáticos oriundos de regime de chuva".

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático começou a ser praticado pelo MAPA, sob coordenação da Secretaria da Comissão Especial de Recursos - Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (CER/PROAGRO), a partir da safra de inverno de 1996, com a cultura do trigo (Cunha & Assad, 2001). Na safra de 1996/1997, foram incluídas as culturas de soja, milho, arroz, feijão, maçã e sorgo. Atualmente, as de ciclo anual contemplam abacaxi, algodão, amendoim, arroz, cana de açúcar, canola, cevada, feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.), e feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), girassol, mandioca, milho, soja, sorgo e trigo, e de ciclo permanente compreendem ameixa, banana, cacau, café, caju, côco, dendê, eucalipto, maçã, mamão, mamona, maracujá, nectarina, pêra, pêssego, pinus e uva (retirado de www.agricultura.gov.br, em 10/10/2010).

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático é obtido por meio de modelos matemáticos, probabilísticos e agrometeorológicos e tem como objetivo indicar o local e o período de plantio/semeadura de determinada cultura, a qual deve ter probabilidade de sucesso superior a 80 % (Assad, 2004). Envolve o cálculo das exigências mínimas de cada cultura a ser zoneada, e é baseado em estudos de séries históricas climáticas de 15 ou mais anos e nos atributos dos solos. Com isso, o MAPA divulga um calendário de plantio por município, por tipo de solo e por cultivar, com o objetivo de evitar que adversidades climáticas recorrentes atinjam as lavouras em suas fases de desenvolvimento mais sensíveis. Esses estudos são revisados anualmente e indicam também os cultivares e respectivos ciclos adaptados às diversas regiões.

Basicamente, para a elaboração do zoneamento, são necessários os dados de entrada de: **clima** (precipitação pluvial; temperatura do ar; insolação; evaportranspiração potencial por meio do método de Penman-Monteith - ETP); **cultura** (duração do ciclo vegetativo; duração das fases fenológicas; coeficiente de cultura - Kc; e profundidade efetiva do sistema radicular), e **solo** (profundidade; capacidade de armazenamento de água ou capacidade de água disponível - CAD).

Para ampliar e completar o "Projeto de Redução de Riscos Climáticos", em 1997, foi implantado o Zoneamento Pedoclimático por cultura. Para isso, foi necessário inserir no modelo elementos relacionados com as aptidões agroclimáticas e pedológicas das lavouras economicamente expressivas para

as diversas regiões do Brasil (Rossetti, 2001). Especificamente, para os dados sobre solo, é necessário determinar a sua textura em laboratórios. Assim, em 14 de junho de 2005, foi publicada a Instrução Normativa nº 12 do MAPA (Brasil, 2005), a qual considera: 1- que o Zoneamento Agrícola de Risco Climático implementado pelo MAPA estabelece períodos de plantio consoante com o ciclo de cultivares e os tipos de solos para as diferentes culturas; 2- a necessidade de atualizar a nomenclatura dos solos, bem como redefinir as características específicas dos diferentes tipos de solos atualmente utilizadas no Zoneamento Agrícola de Risco Climático. Para este objetivo, resolve em seu artigo 1º: "*Adotar no zoneamento de riscos climáticos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento a seguinte especificação para solos: Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3*".

A nomenclatura dos solos foi atualizada conforme as classes do sistema brasileiro de classificação do solo (Embrapa, 2006) e os teores de argila, silte e areia, com o objetivo de separar os solos em função da "capacidade de água disponível" para as culturas, a qual considera o teor de água disponível e a profundidade efetiva do sistema radicular. Com essa publicação, foi originado mais um sistema de classificação de solos.

No entanto, em 2008, essa Instrução Normativa precisou ser alterada para evitar dúvidas de interpretação, simplificar a tipificação dos solos e facilitar o entendimento por parte dos laboratórios que realizavam a análise granulométrica de solos e para os usuários do zoneamento; especificar que na análise granulométrica são determinados os teores de argila, de areia e de silte no solo, constituindo-se esta em etapa fundamental para o seu enquadramento nos diferentes tipos previstos no Zoneamento Agrícola (Brasil, 2008).

Na Instrução Normativa de 2008, o sistema de classificação ficou mais simplificado do que o publicado em 2005 e considera: **SOLOS TIPO 1**: Solos de textura arenosa, com teor mínimo de 10 % de argila e menor do que 15 % ou com teor de argila igual ou superior a 15 %, nos quais a diferença entre o percentual de areia e o percentual de argila seja superior ou igual a 50. **SOLOS TIPO 2**: Solos de textura média, com teor mínimo de 15 % de argila e menor do que 35 %, nos quais a diferença entre o percentual de areia e o percentual de argila seja menor do que 50. **SOLOS TIPO 3**: Solos de textura argilosa, com teor de argila superior ou igual a 35 %.

Essa classificação é utilizada nas orientações técnicas publicadas nas portarias de zoneamento agrícola pelo MAPA. Além dessa classificação, as portarias proíbem o plantio de culturas nas seguintes condições: em áreas de preservação obrigatória, de acordo com a Lei 4.771 do Código Florestal; em solos que apresentem teor de argila inferior a 10 % nos primeiros 50 cm

de solo; em solos que apresentem profundidade inferior a 50 cm; em solos que se encontram em áreas com declividade superior a 45 %; e em solos muito pedregosos, isto é, solos nos quais calhaus e matacões ocupam mais de 15 % da massa e, ou, da superfície do terreno.

Utilização do Zoneamento Agrícola

Vários estudos foram e estão sendo realizados no Brasil para definir o zoneamento agrícola utilizando a classificação do solo proposta. Com a ampliação da base de dados sobre solo, clima e culturas, além do uso de técnicas mais adequadas para realizar a análise dos dados, o zoneamento agrícola torna-se cada vez mais detalhado e com melhor previsão dos riscos climáticos (Pinto et al., 2001). Além disso, estudos indicam que as mudanças climáticas modificam sensivelmente o zoneamento da maioria das culturas (Prentice et al., 1993; Pinto et al., 2001; Alexander et al., 2006), o qual deve evoluir constantemente.

A seguir, são apresentados alguns estudos de Zoneamento Agrícola de Risco Climático, considerando principalmente o índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) e a capacidade de água disponível no solo (CAD).

Geralmente, são considerados aptos para o cultivo os municípios que apresentaram, em pelo menos 20 % de seu território, ISNA superior ou igual ao valor especificado, com frequência de 80 % nos anos avaliados. O ISNA é calculado com programas específicos e é definido como a relação existente entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima da cultura (ETm). Para o cálculo, são necessários dados de: precipitação pluvial diária; evapotranspiração potencial decendial; coeficientes de cultura; duração do ciclo e das fases fenológicas da cultura; e a capacidade de água disponível do solo em função da profundidade do sistema radicular.

Para a diferenciação dos ambientes no Estado de São Paulo para o zoneamento agrícola da cultura do milho, Brunini et al. (2001) utilizaram três classes de ISNA e afirmaram que é uma variável importante na definição dos riscos climáticos, pois indica o atendimento da necessidade de água pela planta: ISNA > 0,55 - região agroclimática favorável, com pequeno risco climático; 0,55 > ISNA > 0,45 - região agroclimática intermediária, com médio risco; e ISNA < 0,45 - região agroclimática desfavorável, com alto risco climático e elevado déficit hídrico. Em estudo realizado em Londrina para analisar a condição hídrica para a cultura da soja, Marion (2004) observou maior correlação entre o rendimento de grãos da soja quando o ISNA foi calculado para a fase mais crítica (estádio R1 ao R6) do que quando calculado para todo o ciclo da soja.

A capacidade de água disponível é dependente da classificação do solo em função de sua textura (Godoy & Lopes-Assad, 2002) e é calculada pela multiplicação do teor de água disponível pela profundidade efetiva do sistema radicular das culturas. Esta profundidade é variável entre solos e culturas, mas não deve ser superior a 50 cm, pois a coleta para determinação da textura é realizada nesta camada (Brasil, 2008). Brunini et al. (2001) utilizaram, para a cultura do milho em SP, a profundidade de 40 cm; Farias et al. (2001) para a cultura da soja no Brasil utilizaram de 35 a 50 cm; Godoy & Lopes-Assad (2002) no Distrito Federal utilizaram duas profundidades (60 e 102 cm), considerando diferentes taxas de crescimento radicular da cultura do milho (1 e 1,7 cm dia^{-1}), as quais são mais profundas que a determinada pela resolução que trata da coleta de solo para determinação da textura (Brasil, 2008); Cunha et al. (2001b) utilizaram profundidade inicial das raízes de 20 cm e crescimento exponencial até 50 cm, alcançado no espigamento, profundidade que foi mantida até o fim do ciclo do trigo.

As portarias publicadas pelo MAPA especificam para cada estado, cultura e tipo de solo, a capacidade de água disponível e o índice de satisfação das necessidades de água (Quadro 1).

Observa-se que não há uma padronização para a CAD, nem entre os Estados nem entre a mesma cultura em diferentes Estados (Quadro 1). Para a cultura do trigo, a CAD está definida para o Paraná, no qual utilizam dois estádios de crescimento da cultura. Brunini et al. (2001) utilizaram no cálculo do balanço hídrico para o milho em São Paulo, CAD de 30, 50 e 70 mm para solos de textura arenosa, média e argilosa, respectivamente, na profundidade de até 40 cm, o que representa teor de água disponível de 0,075, 0,125 e 0,175 $m^3\ m^{-3}$. Concluíram que, para os solos de baixa disponibilidade de água, existe uma forte restrição à semeadura de milho durante praticamente toda a estação chuvosa. Para a cultura da soja no RS, Cunha et al. (2001a) utilizaram a CAD de: 35, 50 e 75 mm, para solos de textura arenosa, média e argilosa, respectivamente, mas não definiram qual foi a profundidade utilizada para este cálculo. Evidenciaram que, quanto menor a CAD, maiores são os riscos para a cultura, independentemente do ciclo dos cultivares. Observaram, para os solos tipo 1, que a área considerada favorável para o cultivo de soja está concentrada onde ocorre maior precipitação pluvial e menor evapotranspiração, ou seja, na parte nordeste do Rio Grande do Sul, em razão do regime térmico mais frio. Para o cultivo do trigo no PR, os tipos de solos de textura arenosa, média e argilosa apresentam, respectivamente teor de água disponível na região radicular de 0,07, 0,10 e 0,12 $m^3\ m^{-3}$ (Cunha et al., 2001b). Esta forma de expressar a retenção de água é mais adequada, pois permite calcular a CAD para cada profundidade do solo explorada pelas raízes nas diferentes fases de crescimento das culturas.

No zoneamento do Estado do Piauí para as culturas de soja e milho (Andrade Júnior et al., 2001) e, mais recentemente, no zoneamento do Estado do Ceará para a cultura do feijão caupi (Andrade Júnior et al., 2007), os autores concluíram que, quando as chuvas são distribuídas uniformemente em determinada região, a capacidade de água disponível (CAD) do solo torna-se fator fundamental na definição da aptidão climática pois determina o armazenamento e a disponibilidade de água para as plantas.

Quadro 1. Capacidade de água disponível (CAD) para os solos tipo 1, 2 e 3 e índice de satisfação da necessidade de água (ISNA) para algumas culturas em cinco Estados (www.agricultura.gov.br; acessado em 20 de julho de 2010)

Cultura	Estado	Tipo de solo			ISNA
		1	2	3	
		mm			
Cana	RS, MG, SP e PR	Deficiência hídrica anual < 400 mm			≥ 0,50
Feijão	RS	30	45	60	≥ 0,60
Feijão	MG	30	40	50	≥ 0,60
Feijão	SP	30	40	50	≥ 0,60
Feijão	PR	30	45	60	≥ 0,60
Girassol	RS, MG, SP e PR	30	50	75	≥ 0,65
Milho	RS	30	50	70	≥ 0,55
Milho	MG	20	40	60	≥ 0,55
Milho	PR	30	50	70	≥ 0,55
Milho	SP	20	40	60	≥ 0,55
Soja	RS	35	50	75	≥ 0,65
Soja	MG	20	40	60	> 0,60
Soja	SP	20	40	60	≥ 0,60
Soja	PR	30	50	75	≥ 0,65
Trigo	RS	Nd [1]	Nd	Nd	≥ 0,55
Trigo	MG	Nd	Nd	Nd	≥ 0,55
Trigo	SP	Nd	Nd	Nd	≥ 0,55
Trigo	PR – CAD inicial	14	20	24	Nd
	PR – CAD final	42	60	72	Nd

[1] Nd = não definido.

Observa-se do exposto que, quando a CAD é utilizada para definir a aptidão dos solos, é necessário determinar dois atributos do solo que são utilizados no cálculo da CAD, a saber: profundidade efetiva do sistema radicular e teor de água disponível.

Pedofunções para Estimar a Disponibilidade de Água no Solo

Uma função de pedotransferência ou pedofunção é gerada para estimar um dado não disponível, no caso água disponível, a partir de dados disponíveis como estrutura, textura e teor de matéria orgânica (Bouma, 1989). Algumas pedofunções geradas para calcular a retenção de água no solo são denominadas "pontuais", pois estimam a retenção em determinada tensão (Gupta & Larson, 1979; Rawls et al., 1982), as quais são amplamente difundidas, úteis e práticas (Rawls et al., 1991). Outras são denominadas "paramétricas", pois originam os parâmetros das equações propostas por Brooks & Corey (1964), Campbell (1974) e van Genuchten (1980), como as pedofunções apresentadas por Vereecken et al. (1989) e Tomasella et al. (2000). Estas têm a vantagem de gerar toda a curva de retenção (Borgesen & Schaap, 2005).

No Brasil, alguns estudos foram desenvolvidos para estimar a retenção de água como, por exemplo: Arruda et al. (1987) com solos de São Paulo; Silva et al. (1990) com solos do semiárido do Nordeste; Masutti (1997) com solos da Zona da Mata de Pernambuco; Tomasella & Hodnett (1998) com solos da Amazônia; Tomasella et al. (2000) com solos de 14 Estados do Brasil; Lopes-Assad et al. (2001) com solos principalmente de Minas Gerais e São Paulo; Oliveira et al. (2002) com solos do Estado de Pernambuco; Giarola et al. (2002) com solos de Santa Catarina e Rio Grande do Sul; Reichert et al. (2009a) com solos do Rio Grande do Sul; e Michelon et al. (2010) com solos irrigados do Rio Grande do Sul. Existem várias regiões ou Estados que não possuem essas estimativas e, em alguns estudos realizados, as equações foram geradas com pequeno número de solos, o que reduz a acurácia da estimativa. Além destes estudos outros foram desenvolvidos em regiões de clima tropical, como o de Aina & Periaswamy (1985) e de van den Berg et al. (1997).

A utilização de pedofunções geradas com solos de outras regiões podem não estimar com a acurácia necessária a retenção de água (Rawls et al., 1982; Saxton et al., 1986; Hodnett & Tomasella, 2002). No Brasil, considerando a grande diversidade dos fatores de formação, os solos têm diferenças marcantes, principalmente na textura, mineralogia e teor de matéria orgânica,

atributos que alteram significativamente a retenção de água no solo (Petersen et al., 1968; Wösten & van Genuchten, 1988; Saxton & Rawls, 2006).

Vários estudos que relacionam atributos do solo com a retenção de água para determinada tensão, por exemplo, a 10, 33 e 1.500 kPa, obtiveram de médios a altos coeficientes de determinação; entretanto, para a estimativa do teor de água disponível geralmente o coeficiente é menor (van den Berg et al., 1997; Giarola et al., 2002; Reichert et al., 2009a; Costa et al., 2010), pois esta depende de duas determinações: a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Além disso, Jong van Lier (2000) sugere que a disponibilidade de água seja mais estudada, pois é um atributo importante, mas muito dependente do método de determinação utilizado. Também é importante considerar que, além do teor de água disponível, o fornecimento de água as plantas pode ocorrer por processos de ascensão de água no perfil (Lima et al., 1990), o qual é dependente da textura do solo bem como da sequência de horizontes. Além disso, algumas classes de solos, mesmo com textura arenosa no horizonte A, podem ter adequado suprimento de água às plantas, pois estão localizadas em relevo que proporciona ascensão de água graças à proximidade e oscilação do lençol freático.

Considerando todas as incertezas envolvidas na determinação da água disponível, após a publicação da primeira Instrução Normativa nº 12/2005 (Brasil, 2005), muitos questionamentos surgiram, principalmente para os usuários deste sistema, tanto técnicos e produtores rurais como pesquisadores da ciência do solo. Isso ocorreu, pois o sistema determinava restrições aos agricultores que precisavam acessar o seguro agrícola. Além disso, não foram inseridos na Instrução dados ou estudos que justificassem a classificação proposta.

Um dos estudos básicos para os cálculos de balanço hídrico por cultura, para os três tipos de solo considerados no zoneamento agrícola, foi o de Lopes-Assad et al. (2001), conforme mencionam Cunha & Assad (2001). Aqueles autores apresentam relações da textura com a retenção de água nas tensões de 10 e 1.500 kPa e a água disponível, geradas a partir de um banco com 228 amostras de 57 perfis de solos, principalmente do Estado de Minas Gerias e algumas amostras dos Estados da Bahia, Paraná, Espírito Santo e São Paulo. Para validar as equações, foram utilizadas 135 amostras de 27 perfis de solos, coletadas no Estado de São Paulo. Observaram que a água disponível (AD, % em volume) pode ser estimada mediante o teor de areia total do solo (AT em %): $AD = 12,76 - 9,87\ (AT)^3$, equação que explica 48 % da retenção de água. Consideraram que o erro-padrão do ajuste é aceitável para os objetivos propostos (0,033 $m^3\ m^{-3}$) e salientaram que a diferença entre o teor medido e o estimado ocorre, principalmente, por diferentes teores de matéria orgânica, bem como pela granulometria da fração areia (desde muito fina a muito grossa).

Entretanto, é importante considerar também as diferenças na mineralogia do solo e sua grande influência na retenção e disponibilidade de água para as culturas (Reichert et al., 2009a), bem como melhorar o sistema de classificação proposto para que o mesmo expresse com a acurácia necessária a relação entre os atributos do solo e o teor de água disponível. Para isso, mais estudos realizados nas diferentes regiões do País devem ser conduzidos, pois o banco de dados utilizado por Lopes-Assad et al. (2001) para gerar a classificação proposta pode ser considerado pequeno.

Na Instrução Normativa do MAPA (Brasil, 2005; 2008) fica explícito que os tipos de solos foram separados, principalmente pelo teor de argila, o que indicaria que a disponibilidade de água varia com o teor de argila. Entretanto, alguns estudos indicam que a capacidade de armazenamento de água tem correlação negativa com o teor de areia (Lopes-Assad et al., 2001) ou positiva com a soma das frações silte mais argila (Arruda et al. 1987; Masutti, 1997). Conforme demonstrado no estudo de Reichert et al. (2009a), a água disponível não varia apenas com uma das frações texturais do solo. Observaram mais água disponível nos solos com menos areia e mais silte. Outros estudos incluem nas pedofunções mais de uma fração granulométrica como variável de entrada no modelo (Gupta & Larson, 1979; Rawls et al., 1982; van den Berg et al., 1997; Giarola et al., 2002; Oliveira et al., 2002).

Apesar dos questionamentos sobre a classificação proposta pelo MAPA, com o zoneamento agrícola surgiu a necessidade de determinar a textura dos solos utilizados para o cultivo, informação que possibilita um melhor conhecimento e planejamento das atividades agrícolas. Além disso, a compilação dos dados gerados pelos laboratórios de análise física permite a confecção de mapas de textura para determinada região ou Estado com as médias dos teores de argila, silte e areia de cada município. A acessibilidade a equipamentos de georreferenciamento permite coletar o solo e determinar as coordenadas do local, o que resulta em maior confiabilidade das informações. Isso também possibilita a confecção de mapas por meio da geoestatística, bem como o desenvolvimento de funções de pedotransferência que usam como variáveis de entrada a granulometria do solo e de saída a retenção ou a disponibilidade de água no solo.

Para aperfeiçoar a classificação de solos utilizada no zoneamento agrícola, é necessário considerar estudos realizados recentemente e propor novos estudos para melhorar as estimativas da disponibilidade de água. Nesse sentido, serão considerados dois estudos recentes que avaliaram o teor de água disponível, realizados com dados de solos do RS (Reichert et al., 2009a) e de SC (Costa et al., 2010).

Num estudo com 354 amostras com dados de água disponível de solos do Rio Grande do Sul, Reichert et al. (2009a) observaram que o teor de água disponível entre as tensões de 10 e 1.500 kPa variou de acordo com a classe textural do solo, desde 0,09 $m^3 m^{-3}$, para a classe areia, a 0,19 $m^3 m^{-3}$ para a classe argilo-siltosa (Figura 7). Ao analisar cada classe textural individualmente, observa-se uma grande amplitude da água disponível. Para as classes com maior número de amostras a AD variou de: 0,04 a 0,32 $m^3 m^{-3}$ para a classe textural "franca" (n = 60); de 0,03 a 0,26 $m^3 m^{-3}$ para a classe textural "franco-argilo-arenosa" (n = 79); e de 0,04 a 0,37 $m^3 m^{-3}$ para a classe "argila" (n = 64) (dados não apresentados). As variações na AD foram mais dependentes da relação entre o teor de areia e silte do que da argila. Além disso, afirmaram que os solos com maior relação silte/argila, menos intemperizados e com maior quantidade de argilominerais do grupo das esmectitas, apresentaram maior retenção e disponibilidade de água.

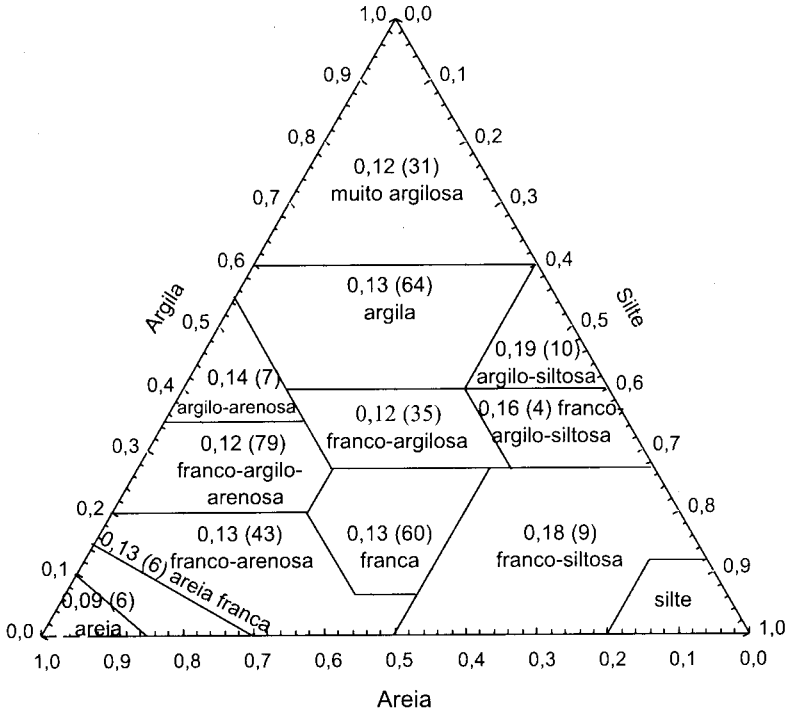


Figura 7. Teor de água disponível ($m^3 m^{-3}$) média para cada classe textural, calculado a partir de 354 amostras de solos do Rio Grande do Sul. Teores de argila, silte e areia em kg kg^{-1}. Número entre parênteses é o número de amostras utilizadas para calcular a média.

Fonte: Modificados de Reichert et al. (2009a).

No estudo de Costa et al. (2010) com 438 amostras de solos de Santa Catarina, o teor de água disponível variou desde 0,10 $m^3 m^{-3}$ para as classes areia, argilo-arenosa, argila e muito-argilosa, até 0,16 $m^3 m^{-3}$, para a classe argilo-siltosa (Figura 8). Os autores também observaram grande amplitude em cada classe textural. Para as classes com maior número de amostras, a variação foi: "areia" com AD de 0,05 a 0,17 $m^3 m^{-3}$ (n = 48); "argila" com AD de 0,06 a 0,16 $m^3 m^{-3}$ (n = 62) e "muito argilosa" com AD de 0,04 a 0,17 $m^3 m^{-3}$ (n = 251) (dados não apresentados).

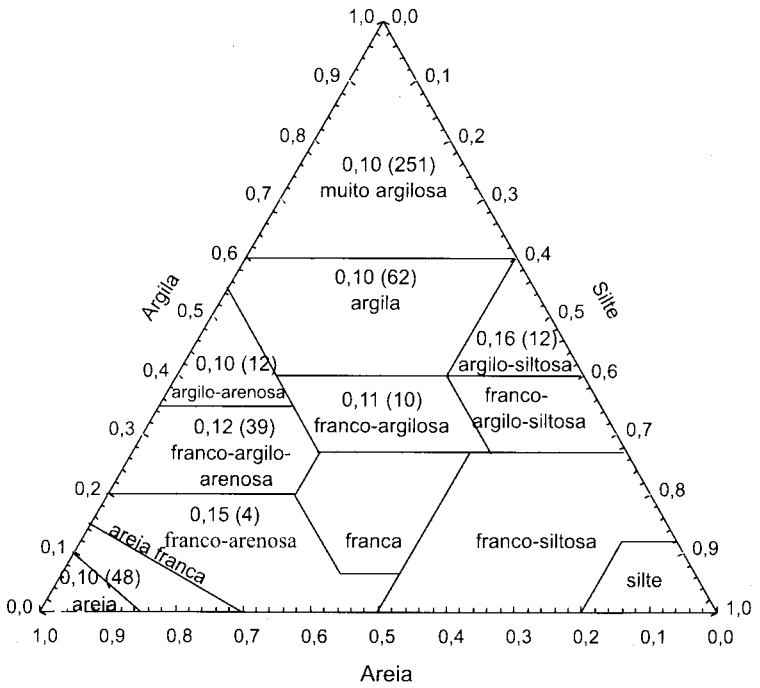


Figura 8. Teor de água disponível ($m^3 m^{-3}$) média para cada classe textural, calculado a partir de 438 amostras de solos de Santa Catarina. Teores de argila, silte e areia em kg kg^{-1}. Número entre parênteses é o número de amostras utilizadas para calcular a média.

Fonte: Modificado de Costa et al. (2010).

Os dados destes dois estudos foram submetidos à análise de regressão simples e múltipla para estimar a retenção e a disponibilidade de água em função da textura do solo (Quadros 2 e 3). Verificou-se que a fração areia teve os maiores coeficientes de determinação com a retenção de água (R^2 de 0,26 até 0,69), para o conjunto de dados dos solos do RS e de SC (Reichert et al., 2009a; Costa et al., 2010), seguido da fração argila (R^2 de 0,21 até

0,67) e da fração silte com menores coeficientes (R^2 de 0,02 até 0,55). Entretanto, a correlação com água disponível foi baixa para todas as frações nos dois estudos (R^2 de 0 até 0,20).

Por meio de análise de regressão múltipla utilizando o procedimento "stepwise", as estimativas da retenção de água a 10 e 1.500 kPa não aumentaram o coeficiente de determinação significativamente, enquanto para água disponível o coeficiente foi maior no estudo de Costa et al. (2010), mas ainda baixo (R^2 de 0,06 a 0,29) (Quadros 2 e 3).

Em outros estudos também foi observada média a alta correlação entre a textura do solo com a retenção de água a 10 e 1.500 kPa, bem como baixa correlação entre a textura e a água disponível (van den Berg et al., 1997; Giarola et al., 2002). Perazza (2003), em estudo realizado com 85 horizontes de 34 solos do Rio Grande do Sul, observou que a água retida a 10 e 1.500 kPa teve maior correlação com o limite de liquidez e teor de areia. A correlação entre água disponível e a CTC efetiva foi de 0,76 entretanto, com a textura do solo foi baixa. Isso pode ocorrer, porque o teor de água disponível tem relação não somente com a textura, mas também com teor de matéria orgânica e mineralogia do solo, tipo de estrutura e grau de compactação (Araújo et al., 2004).

No estudo de Hodnett & Tomasella (2002) e de Perazza (2003), os autores salientaram a necessidade de separar os solos em grupos para estimar funções de pedotransferência, visto que uma única função para todos os solos dificilmente vai estimar com acurácia a retenção de água. A partir dessa constatação, apresentaram funções para grupos texturais e classes de solos específicos. Melhoria na estimativa de água no solo com o uso de grupos de solos com características mais homogêneas também foi relatada por van Genuchten (1980), Arruda et al. (1987), Vereecken et al., (1989), Bell & van Keulen (1995), Wösten et al. (1995), Salchow et al. (1996), Masutti (1997) e Pachepsky & Rawls (1999). Nos estudos de Petersen et al. (1968), Puckett et al. (1985), Wösten & van Genuchten (1988), Giarola et al. (2002) e Oliveira et al. (2002), os autores enfatizaram que a análise dos dados por horizonte melhora a acurácia dos modelos gerados.

Além da classe de solo ou tipo textural, é importante considerar que o sistema de manejo utilizado e as práticas complementares alteram a eficiência de uso da água pelas culturas (Deng et al., 2006). O sistema de manejo influi também na partição dos fluxos de água no solo e, para haver maior disponibilidade de água às plantas, as práticas de manejo devem favorecer a infiltração e reduzir o escoamento superficial e a evaporação da água do solo. Nesse sentido, estratégias de manejo devem ser testadas e usadas em áreas de produção agrícola, com a finalidade de melhorar a eficiência no uso da água pelas plantas.

Quadro 2. Equações de regressão simples e múltipla, para estimar a umidade volumétrica-UV ($m^3\ m^{-3}$) nas tensões de 10 kPa e 1.500 kPa, e a disponibilidade de água (AD em $m^3\ m^{-3}$), considerando os teores de areia, silte e argila (em kg kg^{-1}), para um conjunto de dados com 354 amostras coletadas no Estado do Rio Grande do Sul

	Horizonte A e B (354)			Horizonte A (237)			Horizonte B (117)		
	UV 10	UV 1.500	AD	UV 10	UV 1.500	AD	UV 10	UV 1.500	AD
Equação da reta ajustada para a relação entre disponibilidade de água e fração textural									
					Areia				
a [1]	0,47	0,32	0,15	0,47	0,31	0,16	0,48	0,33	0,15
b	-0,31	-0,25	-0,06	-0,31	-0,24	-0,06	-0,34	-0,26	-0,08
R^2 [2]	0,37**	0,31**	0,03^{ns}	0,34**	0,26**	0,04**	0,41**	0,38**	0,04*
					Silte				
a	0,29	0,19	0,10	0,27	0,17	0,10	0,29	0,21	0,09
b	0,23	0,11	0,12	0,23	0,13	0,10	0,29	0,14	0,15
R^2	0,08**	0,02**	0,05**	0,08**	0,03**	0,04**	0,11**	0,04*	0,06**
					Argila				
a	0,26	0,14	0,12	0,26	0,14	0,12	0,25	0,13	0,11
b	0,27	0,25	0,02	0,28	0,25	0,03	0,28	0,26	0,03
R^2	0,23**	0,26**	0,00^{ns}	0,22**	0,21**	0,01^{ns}	0,23**	0,29**	< 0,01^{ns}
Equação múltipla ajustada entre retenção e disponibilidade de água com todas as frações texturais									
a	0,47	0,27	0,12	0,47	0,26	0,13	0,48	0,33	0,09
Areia	-0,31	-0,19	-0,03	-0,31	-0,18	-0,04	-0,34	-0,26	-
Silte	-	-	0,10	-	-	0,07	-	-	0,15
Argila	-	0,09	-	-	0,09	-	-	-	-
R^2	0,37**	0,33**	0,06**	0,34**	0,27**	0,06**	0,41**	0,38**	0,06**

[1] a e b = são o intercepto e o coeficiente angular da equação. [2] * = significativo a 5 %; ** = significativo a 1 %; e ns = não-significativo respectivamente.
Fonte: Reichert et al., 2009a.

Quadro 3. Equações de regressão simples e múltipla, para estimar a umidade volumétrica-UV ($m^3\ m^{-3}$)nas tensões de 10 kPa e 1.500 kPa e a disponibilidade de água (AD em $m^3\ m^{-3}$), considerando os teores de areia, silte e argila (em kg kg^{-1}), para um conjunto de dados com 429 amostras coletadas no Estado de Santa Catarina

	Horizonte A e B (429)			Horizonte A (191)			Horizonte B (238)		
	UV 10	UV 1.500	AD	UV 10	UV 1.500	AD	UV 10	UV 1.500	AD
Equações de regressão entre retenção e disponibilidade de água e fração textural									
					Areia				
a [1]	0,53	0,43	0,10	0,51	0,38	0,12	0,55	0,47	0,09
b	-0,32	-0,33	0,00	-0,30	-0,28	-0,02	-0,34	-0,37	0,024
R^2 [2]	0,63**	0,64**	0,00^{ns}	0,67**	0,69**	0,04**	0,63**	0,67**	0,07**
					Silte				
a	0,31	0,22	0,09	0,25	0,16	0,09	0,31	0,21	0,09
b	0,77	0,66	0,11	0,83	0,70	0,12	1,01	1,02	-0,01
R^2	0,33**	0,24**	0,11**	0,55**	0,46**	0,20**	0,35**	0,33**	0,01^{ns}
					Argila				
a	0,23	0,11	0,12	0,23	0,12	0,11	0,22	0,11	0,11
b	0,39	0,41	-0,02	0,36	0,36	0,01	0,41	0,44	-0,03
R^2	0,59**	0,65**	0,04*	0,56**	0,63**	0,01^{ns}	0,60**	0,67**	0,10**
Equação de regressão múltipla entre retenção e disponibilidade de água com todas as frações texturais									
a	0,53	0,22	0,04	0,43	0,38	0,10	0,55	0,47	0,11
Areia	-0,32	-0,12	0,06	-0,23	-0,28	-	-0,34	-0,37	
Silte	-	0,27	0,25	0,27	-	0,19	-	-	0,09
Argila	-	-	-	-	-	-0,04	-	-	-0,05
R^2	0,63**	0,65**	0,29**	0,69**	0,69**	0,29**	0,63**	0,67**	0,15**

[1] a e b = são o intercepto e o coeficiente angular da equação. [2] significativo a 1 %; * = significativo a 5 %; e ns = não-significativo.
Fonte: Costa et al., 2010.

PROCESSOS HIDROLÓGICOS DO SOLO CONTROLADORES DA RETENÇÃO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA

A hidrologia do solo é caracterizada por processos de grande complexidade e importância para a descrição da dinâmica da água nas áreas agrícolas e florestais. A disponibilidade de água no solo e a formação das enxurradas são sensivelmente dependentes da infiltração e redistribuição de água no solo, as quais são influenciadas pelas propriedades físicas do solo e pelas características da paisagem.

A magnitude e a variabilidade espacial e temporal dos fluxos de água na superfície e no interior do solo dependem de um grande número de fatores que são controlados pelas características físicas, químicas e biológicas do solo. O método escolhido para a quantificação dos diferentes fluxos depende sensivelmente da escala de monitoramento. Sendo assim, é necessário avaliar detalhadamente as limitações e as potencialidades de cada método para os objetivos propostos.

A hidrologia do solo é composta de diferentes fluxos de água provenientes da precipitação pluvial. O volume de água que chega ao solo é fracionado em componentes que são dependentes entre si e definirão o armazenamento de água no solo, a drenagem e recarga do lençol freático e a formação do escoamento superficial. O movimento da água no solo é condicionado à existência de diferenças no estado energético da água presente em posições diferentes no solo, definido por forças de natureza distintas, governadas pelas características do meio poroso e pela interação com a atmosfera e plantas. O balanço hídrico é uma representação das entradas e saídas de água em determinada porção do solo, que pode ser em nível de bacia hidrográfica ou em determinada área acupada com uma cultura agrícola. Quanto maior a escala do balanço hídrico, maior será a variabilidade dos fatores controladores dos processos hidrológicos do solo e maior a complexidade do sistema, o que muitas vezes leva à utilização de modelos simplificados para estimar os seus componentes.

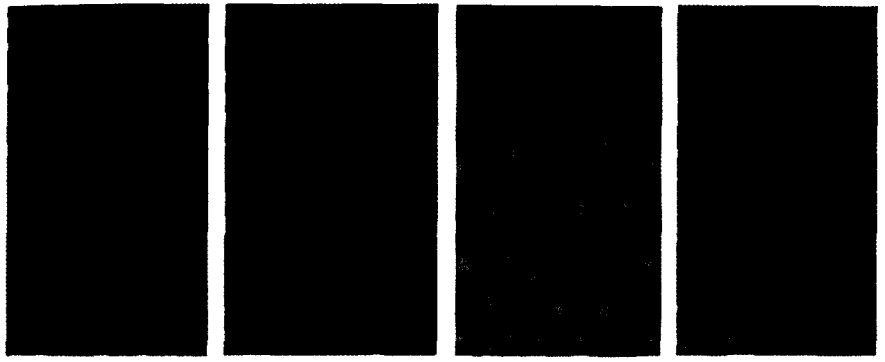
Neste item, são descritos alguns dos principais processos hidrológicos do solo, componentes do balanço hídrico, salientando os fatores naturais e os ligados ao uso e manejo do solo que governam a magnitude e a variabilidade de cada processo, bem como algumas técnicas de medição e suas potencialidades e limitações.

Infiltração de Água no Solo

O solo é o reservatório natural da água para as plantas nos ecossistemas, e a entrada de água no solo ocorre através do processo de infiltração. A taxa de entrada da água no solo é variável com o tempo, sendo alta no início e progressivamente diminui até atingir valores constantes. As forças responsáveis por esse fluxo variável são, basicamente, a gravitacional e a matricial, sendo essa última originada nos meniscos côncavos resultantes da interação entre as fases sólida, líquida e gasosa (forças de adsorção, coesão e tensão superficial). Quando há pouca água no solo, as forças matriciais dominam o processo, razão por que as taxas de infiltração são altas. Com o passar do tempo, essas forças diminuem e a força gravitacional passa a ser a principal responsável pelo movimento da água.

O processo de infiltração é dependente das condições superficiais e estruturais do solo, principalmente da quantidade, tamanho e continuidade do sistema poroso (Logsdon et al., 1990). Qualquer fator externo ou interno que altera a configuração do sistema poroso (compactação, revolvimento, atividade biológica, dispersão de argila, expansão e contração do solo) altera a taxa de infiltração. A condutividade hidráulica do solo saturado está diretamente correlacionada com a quantidade de macroporos e com a porosidade total do solo, e inversamente correlacionada com a densidade do solo (Silva et al., 2005). Por isso, a medida da infiltração em condições de campo fornece melhores informações sobre a funcionalidade do sistema poroso de todo o perfil, sendo um bom indicador de degradação da estrutura do solo e de susceptibilidade deste ao processo erosivo (Reichert et al., 1992; Barcelos et al., 1999; Alves et al., 2007).

O tipo de estrutura dos diferentes horizontes altera a taxa de infiltração de água no solo (Figura 9). Horizontes com estrutura granular e em blocos subangulares normalmente são mais permeáveis, facilitando a infiltração, enquanto horizontes com estrutura prismática ou piramidal e laminar revelam tortuosidade do sistema poroso e arranjo mais compacto das unidades estruturais, diminuindo a condutividade e a infiltração da água no solo. Os horizontes subsuperficiais normalmente apresentam menor porosidade e, consequentemente, menor condutividade hidráulica saturada (Souza et al., 2006). Portanto, em solos com gradiente textural, a infiltração (Bertolani & Vieira, 2001) é, muitas vezes, limitada pela permeabilidade dos horizontes subsuperficiais. Essas são características naturais determinadas pedogeneticamente e de difícil alteração pelo manejo, principalmente nos horizontes mais profundos.



a) Granular b) B. subangulares c) Prismática d) Laminar

Figura 9. Efeito do tipo de estrutura do solo na redistribuição da água no solo.

A rede de poros do solo representa o caminho para o movimento da água no solo. Os macroporos de origem estrutural ou oriundos da atividade biológica são os principais responsáveis pela infiltração da água (Lamandé et al., 2003; Abreu et al., 2004; Cullum, 2009). Nas áreas mantidas sob plantio direto por longo prazo, a densidade do solo pode ser considerada restritiva ao crescimento e desenvolvimento de plantas (Collares et al., 2006) e ao fluxo da água no solo (Reichert et al., 2009b). No entanto, os processos dinâmicos desses solos são mantidos em níveis satisfatórios (Cavalieri et al., 2009), graças à presença de bioporos produzidos por organismos da macrofauna do solo (insetos, minhocas) ou pela decomposição do sistema radicular das plantas (Abreu et al., 2004; Fiorin, 2008). Poros criados artificialmente (Allaire et al., 2002) mostram a importância de bioporos para a infiltração da água no solo (Figuras 10 e 11). Contudo, a caracterização e, principalmente, a quantificação de bioporos têm sido um grande desafio para a pesquisa. O desenvolvimento e o aperfeiçoamento de outros métodos são necessários para melhor avaliar esses fatores em condições de campo (Jegou et al., 2002), o que permitirá uma melhor compreensão da entrada e do movimento da água no solo.

Em áreas mantidas sob plantio direto e em pastagens, a compactação do solo é um dos principais fatores responsáveis pela degradação da estrutura, devido ao aumento na densidade do solo e à redução na quantidade e continuidade dos poros (Reichert et al., 2009b; Collares et al., 2010). A densidade e a porosidade são propriedades físicas altamente correlacionadas com a infiltração de água (Sales et al., 1999) e, por isso, podem ser utilizadas para estimar a infiltração por meio de pedofunções (Fiorin, 2008). No entanto, o efeito do manejo do solo sobre a porosidade, muitas vezes, não fica evidente em avaliações feitas em amostras de solo coletadas em anéis, pois, nesse caso, perde-se o efeito da

continuidade dos poros que ocorrem ao longo do perfil do solo. As camadas compactadas podem estar localizadas em diferentes porções do perfil do solo, conforme as particularidades de cada uso, manejo e nível de tráfego e, ou, pisoteio a que o solo é submetido (Figura 12). Em áreas manejadas sob plantio direto, a camada compactada fica localizada próximo aos 0,10 m de profundidade; em áreas sob preparo convencional essa camada fica próxima aos 0,20 m, e nas áreas que são utilizadas com pastagem a compactação ocorre na superfície do solo (Genro Jr. et al., 2009; Veiga et al., 2007; Reichert et al., 2009b). As alterações causadas na quantidade e continuidade dos poros alteram o fluxo de água no solo, com redução na taxa de infiltração de água (Silva et al., 2009), podendo favorecer o escoamento superficial, mesmo que o solo apresente boa cobertura por resíduos vegetais (Schäfer et al., 2001).

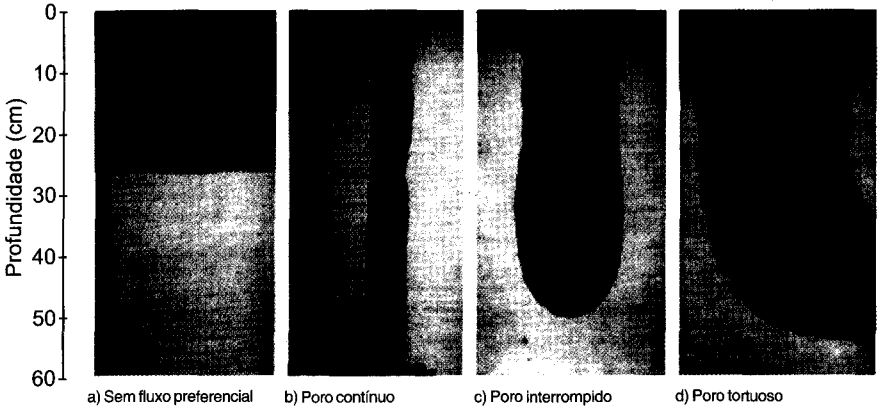


Figura 10. Efeito de fluxo preferencial na entrada de água no solo.

Fonte: Adaptado de Allaire et al., 2002.

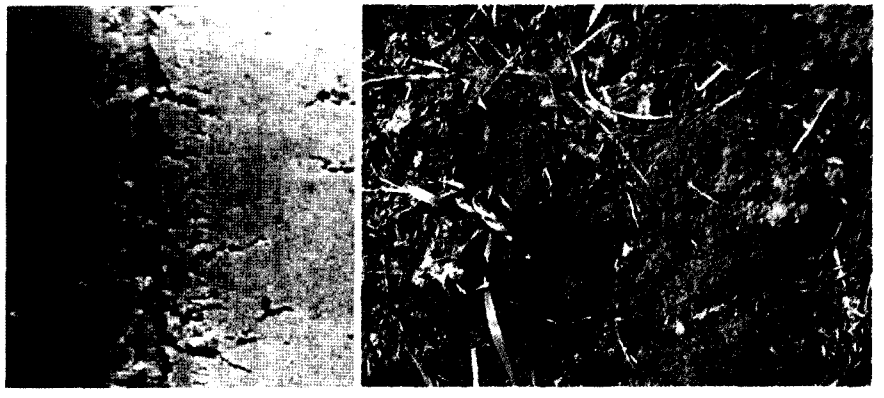


Figura 11. Bioporos de origem radicular (a) (Williams & Weil, 2004) e por atividade de insetos (b) em áreas mantidas sob plantio direto.

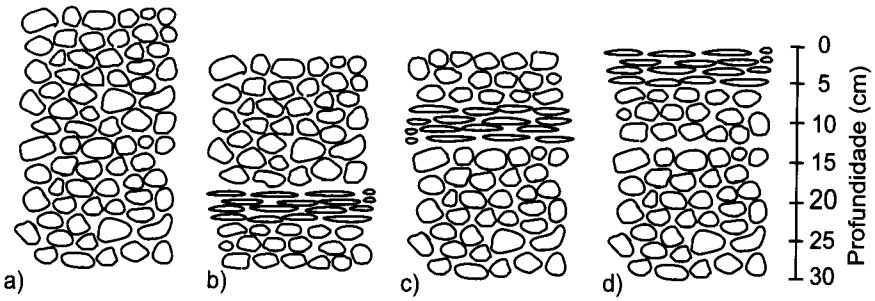


Figura 12. Localização da camada compactada no perfil do solo: a) solo bem estruturado; b) solo com compactação a 0,25 m ("pé-de-arado"); c) solo compactado a 0,10 m e d) solo com compactação superficial.

Em períodos chuvosos e condições de boa infiltração, o solo é saturado até profundidades abaixo de onde se localizam as raízes das plantas. Depois de cessada a chuva, o excesso de água drena livremente recarregando o lençol freático, o que representa importante função ambiental do solo nos sistemas de produção agrícola. Contudo, a degradação da estrutura do solo pela atividade agrícola altera o movimento da água no solo e, consequentemente, a recarga das nascentes e o equilíbrio do ciclo hidrológico (Meneses et al., 2009). A redução na taxa de infiltração de água no solo pode ser visualmente percebida em condições de campo, por meio do empoçamento de água na superfície do solo, principalmente nas linhas de tráfego das máquinas agrícolas e nas áreas sob pisoteio animal (Figura 13).

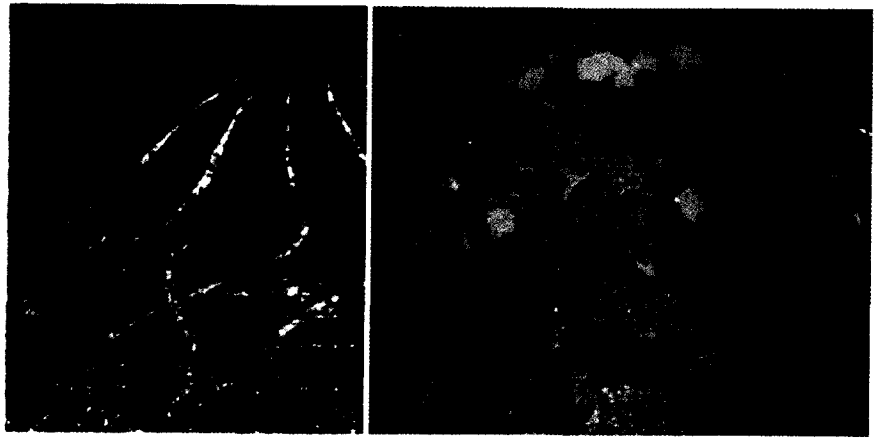


Figura 13. Empoçamento superficial da água após a chuva em áreas compactadas por tráfego de máquinas (a) e por pisoteio animal (b).

Em sistema de plantio direto, a ciclagem de raízes é responsável por criar uma rede de poros contínuos (Williams & Weil, 2004), que favorecem a aeração e a entrada de água. Contudo, o revolvimento intenso do solo (Meek et al., 1992) e o tráfego frequente em condições de alta umidade (Blackwell et al., 1990; Jegou et al., 2002) reduzem a quantidade e a continuidade dos poros e, consequentemente, a infiltração de água no solo. A compactação do solo em plantio direto (Silva et al., 2009) e o pastejo intensivo em áreas sob integração lavoura pecuária (Lanzanova et al., 2007) reduzem a taxa de infiltração. Outro fator que altera a taxa de infiltração é o gradiente textural que é encontrado nos Argissolos (Sales et al., 1999) e a presença de frações grosseiras e as características do saprolito em solos rasos (Stürmer et al., 2009).

A escarificação do solo, entretanto, tem sido apontada como uma prática que favorece a infiltração da água, por romper camadas compactadas e aumentar a rugosidade superficial sem reduzir significativamente a cobertura do solo (Camara & Klein, 2005; Vieira & Klein, 2007), mas pode reduzir a resistência do solo ao processo erosivo (Volk & Cogo, 2008). O preparo convencional, apesar de aumentar a taxa de infiltração, fragiliza o solo e favorece o processo erosivo (Alves & Cabeda, 1999). A "escarificação biológica", com a utilização de plantas de cobertura, parece ser uma técnica promissora para reduzir os efeitos da compactação e aumentar a taxa de infiltração de água no solo em plantio direto (Abreu et al., 2004; Nicoloso et al., 2008) pela criação e manutenção de uma rede de bioporos. A utilização de plantas de cobertura do solo com sistema radicular pivotante em plantio direto também favorece a capacidade de infiltração de água no solo (Debarba & Amado, 1997).

Em florestas nativas, a taxa de infiltração de água no solo normalmente é maior (Stürmer et al., 2009), observa-se que a água das chuvas retida pela copa das árvores (Moura et al., 2009) e a proteção da superfície do solo pela serrapilheira reduzem a energia cinética da chuva e o escoamento superficial (Oliveira Junior & Dias, 2005). Em áreas sob floresta plantada, o revolvimento do solo para o transplante de mudas (Prevedello, 2008) ou a compactação ocasionada pelas máquinas utilizadas no manejo e colheita florestal (Cechin, 2007) podem degradar a estrutura do solo e reduzir a taxa de infiltração da água (Pires et al., 2006), comprometendo o ciclo hidrológico na floresta.

Os valores de taxa de infiltração observados na literatura nacional são bastante variáveis (Quadro 4), e são resultantes das diferenças nas características naturais do solo, pelas alterações ocasionadas pelo manejo do solo e pelo método utilizado para avaliar a infiltração da água no solo.

Quadro 4. Taxa de infiltração de água em diferentes tipos de solo e manejo

Autor	Solo	Textura			Método	Manejo	Taxa de infiltração (mm h^{-1})
		Areia	Silte	Argila			
		g kg^{-1}					
Silva et al. (2009)	Latossolo Vermelho distrófico	217	216	556	Anéis concêntricos	Plantio direto	30
	Latossolo Vermelho distróférrico	99	282	619	Anéis concêntricos	Plantio direto	4
Abreu et al. (2004)	Argissolo Vermelho - Amarelo distrófico arenico	610	300	120	Anéis concêntricos	Plantio direto	8
						Escarificação	8
						Cultivo mínimo	5
						Solo descoberto	5
Lanzanova et al. (2007)	Argissolo Vermelho - Amarelo alumínico típico	281	433	280	Anéis concêntricos	Sem pastejo-soja	114
						Pastejo a cada 28 dias - soja	84
						Pastejo a cada 14 dias - soja	14
Camara & Klein (2005)	Latossolo Vermelho distrófico típico	290	100	610	Anéis concêntricos	Plantio direto	26
						Plantio direto escarificado	100
Vieira & Klein (2007)	Latossolo Vermelho distrófico típico	350	210	450	Anéis concêntricos	Plantio direto	13
						Plantio direto escarificado	27
Stürmer et al. (2009)	Neossolo Regolítico Eutrófico típico	345	423	232	Anéis concêntricos	Mata nativa	577
						Campo nativo	69
						Vegetação secundária	250
Alves & Cabeda (1999)	Argissolo Vermelho - Escuro distrófico	470	220	310	Simulador de chuva	Plantio direto	28
						Preparo convencional	47

Continua...

Quadro 4. Cont.

Autor	Solo	Textura			Método	Manejo	Taxa de infiltração (mm h^{-1})
		Areia	Silte	Argila			
		g kg^{-1}					
Sales et al. (1999)	Argissolo Vermelho - Amarelo	423	155	422	Anéis concêntricos	-	12
	Latossolo Roxo	195	152	653	Anéis concêntricos	-	57
Debarba & Amado (1997)	Argissolo Vermelho - Amarelo distrófico	*	*	*	Simulador de chuva	Solo descoberto	60
						Plantio Direto: aveia + ervilhaca/milho	107
						Plantio Direto: tremoço/milho	84
						Plantio Direto: chicharro/milho	79
						Plantio Direto: milho + mucuna	115
						Plantio Direto: milho +feijão de porco	92
Barcelos et al. (1999)	Latossolo Vermelho escuro	*	*	*	Simulador de chuva	Preparo convencional	71
						Cultivo mínimo	92
						Plantio Direto	86

(*) Dados não informados.

Considerando as mesmas condições de cobertura ou manejo do solo, observa-se que a taxa de infiltração varia, dependendo do método utilizado (Sidiras & Roth, 1984) (Quadros 5 e 6). O método do infiltrômetro com anéis concêntricos superestima a taxa de infiltração. Esse efeito ocorre porque nesse método é necessário manter uma carga hidráulica sobre a superfície do solo e podem ocorrer fissuras no solo no momento da inserção dos anéis, o que representa uma área de fluxo preferencial da água.

Quadro 5.Taxa de infiltração de água em diferentes coberturas de um Latossolo Roxo Distrófico, após duas horas de teste, determinada com infiltrômetro de anéis e simulador de chuva

Cultura de inverno	Cobertura do solo	Taxa de infiltração		Relação anel/simulador
		Infiltrômetro de anel	Simulador de chuvas	
	(%)		(mm h^{-1})	
Aveia preta	90	445	57,5	7,7
Nabo forrageiro	47	412	50,9	8,1
Trigo	36	395	47,6	8,3
Tremoço	22	354	42,3	8,4
Pousio	6	362	28,3	12,8

Fonte: Sidiras & Roth, 1987.

Quadro 6.Taxa de infiltração de água em diferentes manejos de um Latossolo Roxo Distrófico, após duas horas de teste, determinada com infiltrômetro de anéis e simulador de chuva

Sistema de manejo	Taxa de infiltração		Relação anel/simulador
	Infiltrômetro de anel	Simulador de chuvas	
		(mm h^{-1})	
Convencional	244	45	5,4
Escarificação	191	50	3,8
Plantio direto	129	58	2,2

Fonte: Sidiras & Roth, 1987.

A estrutura interna da matriz do solo é a principal responsável pela variação na infiltração medida com anéis. Por outro lado, com a utilização do simulador

de chuvas, tem-se uma avaliação da estrutura interna do solo e das características da superfície do solo, como grau de cobertura, rugosidade, encrostamento, o que representa uma avaliação mais próxima do real (Pott & De Maria, 2003). A presença de crostas superficiais aumenta a diferença entre a taxa de infiltração medida com anéis concêntricos e com simulador de chuvas (Levien et al., 2000). Dessa forma, o método a ser utilizado depende dos fatores que são considerados no estudo.

Drenagem Profunda

O processo da redistribuição ou drenagem interna tem início quando cessa a infiltração da água de chuva ou irrigação. No início desse processo, a força gravitacional é a principal responsável pelo movimento da água, e o conteúdo de água nas proximidades da superfície do solo reduz rapidamente em condições adequadas para a drenagem. Nessas condições, o fluxo ocorre nos poros maiores do solo. À medida que a umidade do solo vai decrescendo e o ar passa a entrar no solo, as forças matriciais passam a assumir maior importância na retenção de água e o fluxo da água passa a ser mais lento, ficando restrito aos filmes de água que recobrem as partículas do solo e no interior dos microporos (Hillel, 1998). Quando o excesso de água drena e o fluxo passa a ser lento, o solo atinge a capacidade de campo, que é considerada o limite superior de água disponível para as plantas.

A velocidade desse processo e a estabilização dependem da textura e da estrutura do solo. A presença de camadas ou horizontes impeditivos ao fluxo pode retardar o processo de drenagem e manter o solo com maior conteúdo de água. Gradiente textural ou camadas compactadas são fatores que interferem nesse processo.

Em áreas que apresentam solos com gradiente textural no perfil e relevo ondulado, principalmente Argissolos e Planossolos, é comum a formação de canais internos no solo que, com o tempo, podem resultar em solapamentos e formação de voçorocas (Figura 14). Esse processo ocorre naturalmente em razão do efeito restritivo oferecido pelo horizonte subsuperficial ao processo de drenagem do excesso de água no solo.

A variabilidade espacial das características e propriedades do solo são as principais responsáveis pela dificuldade na avaliação desses processos dinâmicos em condições de campo, o que é evidenciado pela carência de literatura sobre o assunto.

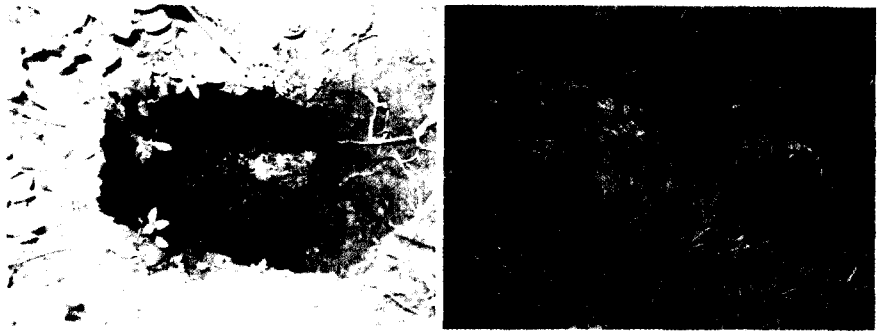


Figura 14. Formação de canais subterrâneos e solapamento em Argissolo da região da depressão central do Rio Grande do Sul.

Ascensão Capilar da Água no Solo

A ascensão da água no solo pode ser atribuída ao fenômeno da capilaridade que envolve as forças de adesão entre as moléculas de água e a superfície interna das paredes dos poros, e a força de coesão entre as próprias moléculas de água. A altura de ascensão é limitada pelo peso da coluna de água e pelo diâmetro dos poros.

A estrutura do solo tem grande influência sobre a ascensão e movimento da água no solo. Poros com menor diâmetro apresentam maior ascensão de água, podendo a altura de ascensão ser limitada pela irregularidade do poro, como, por exemplo, uma mudança no seu formato e diâmetro. Além do fenômeno da capilaridade, a ascensão da água no solo pode ocorrer pela diferença do estado energético da água em diferentes posições do perfil do solo. Assim, a absorção da água na região da rizosfera diminui o potencial matricial nesses pontos, de forma a estabelecer um fluxo de água de camadas mais profundas em direção às raízes.

A ascensão capilar da água no solo é alterada pelo conteúdo de água do meio e pela distribuição, tamanho e continuidade do sistema poroso e contribuí para repor a água na zona radicular, principalmente nos períodos mais secos (Cruz et al., 2005), sendo um dos componentes do balanço hídrico, mas sua medida em condições de campo só é possível pelo monitoramento do potencial da água em diferentes posições do perfil do solo (Cintra et al., 2000). As densidades de fluxo e a ascensão capilar por camada podem ser estimadas pela equação de Darcy-Buckingham (Cruz et al., 2005). Em solos que apresentam gradiente textural, dificilmente a água armazenada nos horizontes mais argilosos migra para os horizontes superficiais mais arenosos, razão por que, não pode ser computada dentro do balanço hídrico. Outro fator que

pode apresentar grande influência na redistribuição e na ascensão capilar da água é a presença de horizonte E no perfil do solo. No entanto, o efeito dessas características morfológicas sobre a ascensão e movimento da água no solo ainda é pouco estudado, principalmente pela pesquisa brasileira, o que representa uma lacuna a ser preenchida, para melhorar as estimativas do balanço e retenção de água no solo.

Escoamento Superficial

Quando as condições superficiais e estruturais do solo são desfavoráveis à infiltração, a água escoará na superfície, podendo ocasionar a erosão hídrica e carrear partículas de solo contendo nutrientes e pesticidas até os rios (Minella et al., 2007). Os tempos de empoçamento e de início de escoamento diminuem com o aumento da intensidade da chuva, o que favorece a perda de água no sistema e o aumento do risco de enxurradas. No plantio direto, a manutenção da cobertura do solo e a presença de poros contínuos facilitam a infiltração da água (Alves & Cabeda, 1999). Mesmo assim, parte da água de chuvas de grande intensidade pode escoar pela superfície, o que exige a utilização de práticas conservacionistas complementares, como o terraceamento (Barcelos et al., 1999).

Em solo revolvido e exposto, o impacto da chuva promove o selamento superficial, que se constitui numa fina camada de solo de baixa porosidade que limita a infiltração da água (Reichert et al., 1992; Chaves et al., 1993). Quando a intensidade da precipitação pluvial é maior que a taxa de infiltração de água no solo, ocorre, inicialmente, o acúmulo de água na superfície do solo e, posteriormente, o escoamento podendo provocar a formação de sulcos (Coelho et al., 2000).

Em áreas sob plantio direto, práticas conservacionistas complementares, como o terraceamento, cultivo em nível e, mais recentemente, "mulching vertical" (Garcia & Righes, 2008; Denardin et al., 2008), têm sido apontadas como alternativas eficientes para reduzir o escoamento superficial e evitar o processo erosivo, pois somente os resíduos de plantas que cobrem a superfície do solo não são suficientes para conter o escoamento superficial (Morais & Cogo, 2001).

Nos sistemas florestais, a implantação da floresta em linhas transversais ao sentido da declividade reduz a taxa de escoamento superficial e aumenta a infiltração da água, o que aproxima o sistema das condições naturais, com maior sustentabilidade (Pires et al., 2006). Além disso, a utilização de práticas conservacionistas no manejo florestal é fundamental para manter a

produtividade e qualidade dos produtos sem que haja degradação do solo e do ambiente (Ranzini & Lima, 2002).

Evaporação da Água no Solo

A evaporação é um processo puramente físico em que ocorre a passagem da água do estado líquido para o gasoso e a sua transferência para a atmosfera. A taxa de evaporação da água no solo é dependente das condições meteorológicas e das condições físicas do solo. As condições meteorológicas estão relacionadas com a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. O processo exige energia, sendo a radiação solar a principal fonte de energia para a evaporação da água do solo. O vento contribui para a mistura turbulenta do ar que se encontra sobre a superfície do solo, prevenindo a saturação do ar e ajudando a manter o gradiente de vapor entre a superfície do solo e a atmosfera. Os fatores do solo que interferem no processo de evaporação são o conteúdo de água, a textura, a estrutura e a cobertura do solo. Os filmes de água que se formam sobre as partículas do solo e no interior dos poros podem ser aquecidos até ocorrer o desprendimento das moléculas de água que irão fazer parte do vapor no interior da rede de poros.

A perda de água do solo por esse processo constitui importante propriedade no ciclo hidrológico. O conhecimento dos fatores que determinam a evaporação da água dos solos permite a adoção de técnicas que objetivam controlá-la, possibilitando a conservação da água armazenada para as plantas. Em condições de solo com alta umidade, o processo de evaporação é governado pelas condições meteorológicas, mas, à medida que o solo vai secando, os atributos físicos do solo passam a assumir maior importância e governam o processo (Hillel, 1998). A continuidade do processo depende da condutividade não saturada do solo, pois a água perdida nos primeiros milímetros da superfície deve ser reposta pelo movimento ascendente de água no perfil, que ocorre em condições não saturadas (Sillon et al., 2003).

O manejo do solo altera o processo de evaporação decorrente de modificações proporcionadas na superfície do solo (cobertura, rugosidade) e nas propriedades hidráulicas nas camadas superficiais (porosidade e condutividade hidráulica). A presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo reduz o aquecimento do solo (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990; Bortoluzzi & Eltz, 2000; Silva et al., 2004; Martorano et al., 2009) e a taxa de evaporação da água do solo é reduzida com o incremento na cobertura do solo (Stone & Moreira, 2000; Freitas et al., 2004, 2006).

A compactação do solo pode favorecer a evaporação por aumentar a condutividade hidráulica não saturada do solo nas suas camadas superficiais (Sillon et al., 2003). Por outro lado, com o revolvimento da camada superficial do solo, o aquecimento do solo é maior e, inicialmente o processo de evaporação é acentuado nessa camada, mas pode atingir taxas baixas com o passar do tempo em decorrência da ruptura na continuidade de poros que reduz a condutividade hidráulica não saturada. A produção e a manutenção dos resíduos na superfície do solo constituem práticas fundamentais para preservar a água no solo, reduzindo o tempo para a ocorrência de deficiência hídrica em plantio direto (Martorano et al., 2009). Andrade (2008) verificou uma redução de 42 % na perda de água por evaporação em solo arenoso com 6 Mg ha^{-1} de palha na superfície.

Extração Radicular da Água do Solo

O transporte de água no solo através dos tecidos vegetais é um processo passivo que responde a um gradiente de potencial hídrico criado entre o sistema solo-planta e atmosfera. A planta absorve a água do solo pela diferença de potencial criada entre a água das células e tecidos vasculares da planta e a água da região da rizosfera. O potencial criado no interior da planta depende principalmente da demanda atmosférica e, a taxa de transpiração é crescente quando existe boa disponibilidade de água no solo e as condições meteorológicas são de baixa umidade relativa do ar e presença de vento, caso contrário, a planta utiliza mecanismos para controlar as perdas de água e evitar a sua desidratação (Taiz & Zieger, 2004).

À medida que a planta extrai a água da região da rizosfera, cria-se um gradiente de potencial entre essa região do solo e as regiões mais distantes, fazendo com que a água migre em direção à rizosfera. A velocidade do fluxo de água nessa região depende das características hidráulicas do meio, principalmente do tamanho, quantidade e continuidade do sistema poroso. Quanto menor a quantidade de poros e maior a tortuosidade, a tendência é o fluxo ser mais lento, e menor é a capacidade de o solo repor a água próxima a rizosfera e, dessa forma, a planta promove o fechamento parcial dos estômatos e aumenta a resistência estomática (Paiva et al., 2005), de forma a regular a taxa de transpiração, de acordo com a capacidade de o solo manter o fluxo de água em direção das raízes. Outro fator que altera a velocidade de fluxo de água em direção das raízes é o próprio conteúdo de água no solo (Metselaar & Jong van Lier, 2007); à medida que o solo vai secando, há tendência de o fluxo ser mais lento, mesmo que o gradiente de potencial seja maior e as condições hidráulicas do meio adequadas, pois o fluxo de água passa a

ocorrer por meio dos filmes de água que se formam ao redor das partículas do solo, o que aumenta a tortuosidade ao fluxo (Hillel, 1998).

A utilização de modelos matemáticos para estimar a extração de água pelas plantas em solos com características hidráulicas contrastantes vem sendo estudada experimentalmente (Draye et al., 2010), mas ainda faltam melhores propriedades de ajuste para representar a resistência interna dos vegetais quanto ao processo de absorção (Rocha et al., 2010), o que é uma tarefa difícil quando se trata de organismos vivos. Esses estudos indicam que a extração da água ocorre nas partes mais úmidas do solo (Jong van Lier et al., 2008), onde a resistência ao fluxo da água é menor, graças à menor energia de retenção da água e à menor tortuosidade. Considerando a capacidade de compensação pela planta, torna-se difícil estabelecer um limite inferior de disponibilidade de água para as plantas em condições de campo (Jong van Lier, 2000), visto que a distribuição do sistema radicular, o conteúdo de água no solo, assim como as condições estruturais, são heterogêneas no perfil do solo, podendo, algumas camadas indicar baixa capacidade de disponibilidade e suprimento de água, enquanto outras camadas estão compensando essa deficiência e mantendo a atividade metabólica da planta.

A extração de água pelas plantas além de ser dependente das condições hidráulicas do meio (Jong van Lier, 1997), também depende da densidade radicular (Jong van Lier et al., 2006), sendo ambas as condições alteradas pela estrutura do solo. Assim, para melhorar a eficiência na extração de água pelas plantas, é necessário ter condições estruturais do solo que favoreçam a entrada e o armazenamento de água e que garantam um bom crescimento do sistema radicular, de forma a explorar um maior volume de solo. Dessa forma, os indicadores físicos normalmente utilizados para avaliar a qualidade física do solo (densidade, porosidade, IHO) para o crescimento e desenvolvimento das plantas poderiam incorporar valores de condutividade hidráulica não saturada, como forma de avaliar a capacidade do solo em suprir a água na rizosfera, o que está relacionado com a taxa de transpiração e, consequentemente, com a produtividade das plantas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilidade de água no solo definida apenas pelo intervalo de água no solo entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente informa mais precisamente a quantidade de água que potencialmente pode ser utilizada pelas plantas. Quando considerada a profundidade do perfil explorado

pelo sistema radicular das plantas, define-se a lâmina de água potencialmente disponível. Contudo, essa definição ainda deve considerar que a absorção de água pela planta é dificultada à medida que a água no solo diminui da capacidade de campo para o ponto de murcha permanente. Além de considerar e procurar compreender melhor esses aspectos, o conhecimento de quanto da água potencialmente disponível no perfil de solo não está sendo acessada pela planta por limitações físicas ao crescimento radicular é uma oportunidade de estudo em áreas com problemas de compactação do solo.

Em relação à determinação da disponibilidade de água para fins de zoneamento agrícola, a classificação utilizada pelo MAPA considera, principalmente, a retenção de água associada basicamente à variação no teor de argila do solo. Conforme observado nos estudos disponíveis na literatura, bem como nos resultados recentemente obtidos e apresentados neste tópico, para melhorar a estimativa do teor de água disponível no solo, é necessário considerar também as variações nos teores de silte e de areia.

A ampla variação da disponibilidade de água em uma mesma classe textural indica a dificuldade de estimar a água disponível com base apenas na classificação textural e demonstra a necessidade de ampliar a base de dados existente. A estimativa do teor de água disponível pode ser obtida pelo uso de pedofunções que utilizam a textura do solo, mas a inclusão de mais outro atributo, geralmente, melhora esta estimativa e pode ser uma alternativa adequada para classificar os solos em relação à disponibilidade de água. Para isso, são necessários mais estudos em todos os Estados, de forma conjunta, o que permitirá reduzir os erros das estimativas e gerar informações que contemplem as diversidades existentes no País como, por exemplo, a mineralogia e o teor e a qualidade da matéria orgânica. Outra sugestão é a necessidade de avaliar mais detalhadamente as frações da areia, já que a retenção de água pode ser muito diferente em solos com areia fina e muito fina, daqueles com predomínio das frações areia grossa e muito grossa.

Quanto à partição dos fluxos de água no solo, fatores relacionados com a gênese e com o manejo do solo determinam as entradas, o armazenamento e as perdas da água. Dentre as lacunas que merecem ser investigadas pela pesquisa, destacam-se o efeito da bioporosidade sobre a infiltração, o fluxo saturado e não saturado no solo e o escoamento superficial em plantio direto. Essas avaliações devem ser realizadas preferencialmente em campo, para gerar informações mais próximas das condições reais, o que permitirá a melhor compreensão do sistema.

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.

AINA, P.O. & PERIASWAMY, S.P. Estimating available water-holding capacity of Western Nigerian soils from soil texture and bulk density using core and sieved samples. Soil Sci., 140:55-58, 1985.

ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A.M.G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; AMBENJE, P.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J. & GRIFFITHS, G. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. J. Geophys. Res., 111:1 22, 2006.

ALLAIRE, S.E.; GUPTA, S.C.; NIEBER, J. & MONCRIEF, J.F. Role of macropore continuity and tortuosity on solute transport in soils: Effects of initial and boundary conditions. J. Contam. Hydrol., 58:299-321, 2002.

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S. & SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. R. Bras. Ci. Solo, 31:617-625, 2007.

ALVES, M.C. & CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando-se chuva simulada com duas intensidades. R. Bras. Ci. Solo, 23:753-761, 1999.

ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, L.C.F.; GONÇALVES, M.C. & CARVALHO, D.F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 7:191-196, 2003.

ANDRADE, J.G. Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2008. 93p. (Tese de Mestrado).

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BARROS, A.H.C.; SILVA, C.O. & FREIRE FILHO, F.R. Zoneamento de risco climático para a cultura do feijão caupi no Estado do Ceará. R. Ci. Agron., 38:109-117, 2007.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SENTELHAS, P.C.; LIMA, M.G.; AGUIAR, M.J.N. & LEITE, D.A.S.R. Zoneamento agroclimático para as culturas de milho e de soja no Estado do Piauí. R. Bras. Agrometeorol., 9:544-550, 2001.

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. R. Bras. Ci. Solo, 28:337-345, 2004.

ARCOVA, F.C.S.; CICCO, V. & ROCHA, P.A.B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha - São Paulo. R. Árvore, 27:257-262, 2003.

ARRUDA, F.B.; JÚLIO Jr., J. & OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo. R. Bras. Ci. Solo, 11:11-15, 1987.

ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M.R.; MAHBOUBI, A.A.; NOSRATI, A. & DEXTER, A.R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. Plant Soil, 335:229-244, 2010.

ASSAD, E.D. Zoneamento agrícola e os riscos climáticos. Agroanalysis, 24:17-18, 2004.

BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A. & DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 23:35-43, 1999.

BELL, M.A. & van KEULEN, H. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 59:865-871, 1995.

BERLATO, M.A. & FONTANA, D.C. Previsão climática e sua aplicação na agricultura. In: CARLESSO, R. et al., eds. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria, 2001. p.99-111.

BERTOL, I.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. R. Bras. Ci. Solo, 21:409-418, 1997.

BERTOLANI, F.C. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho- Amarelo, sob diferentes usos. R. Bras. Ci. Solo, 25:987-995, 2001.

BESCANSA, P.; IMAZ, M.J.; VIRTO, I.; ENRIQUE, A. & HOOGMOED, W.B. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. Soil Tillage Res., 87:19-27, 2006.

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, 2006.

BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Resistência à penetração em Latossolos: Valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. Ci. Rural, 34:1793-1800, 2004.

BLACKWELL, P.S.; GREEN, T.W. & MASON, W.K. Responses of biopore channels from roots to compression by vertical stresses. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:1088-1091, 1990.

BORGESEN, C.D. & SCHAAP, M.G. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. Geoderma, 127:154-167, 2005.

BORTOLUZZI, E.C. & ELTZ, F.L.F. Efeito do manejo mecânico da palhada de aveia preta sobre a cobertura, temperatura, teor de água no solo e emergência da soja em sistema plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 24:449-457, 2000.

BORU, G.; VANTOAI, T.; ALVES, J.; HUA, D. & KNEE, M. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. Ann. Bot., 91:447-453, 2003.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. Adv. Soil Sci., 9:177-213, 1989.

BRAGAGNOLO, N. & MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. R. Bras. Ci. Solo, 14:369-374, 1990.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. R. Bras. Ci. Solo, 30:605-614, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 2/2008. Adota no zoneamento agrícola de risco climático do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, as especificações para solo que descreve. Brasília: - M.A.A, 2008. Publicado no Diário Oficial da União de 10/10/2008, Seção 1. p.71.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 12/ 2005. Adota no zoneamento de riscos climáticos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento a seguinte especificação para solos. Brasília: - M.A.A, 2005. Publicado no Diário Oficial da União de 16/06/2005, Seção 1. p.12.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Zoneamento agrícola: Redução dos riscos climáticos na agricultura para as culturas de arroz de sequeiro, feijão de sequeiro, milho e soja no Distrito Federal. Safra 1997. Brasilia, 1997. p.1-30.

BROOKS, R.H. & COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. Fort Collins, Colorado State University, 1964. 27p. (Hydrological Paper, 3)

BRUNINI, O.; ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H.S.; ASSAD, E.D.; SAWAZAKI, E.; DUARTE, P.D. & PATERNIANI, M.E. Riscos climáticos para a cultura do milho no Estado de São Paulo. R. Bras. Agrometeorol., 9:519-526, 2001.

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, 2005.

CAMPBELL, G.S. A simple method for determine unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci., 117:311-314, 1974.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. Ci. Rural, 25:183-188, 1995.

CAVALIERI, K.M.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A. & HÄKANSSON, I.H. Long term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. Soil Tillage Res., 103:158-164, 2009.

CECHIN, N.F. Compactação de dois Argissolos na colheita florestal de *Pinus taeda* L. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2007. 136p. (Tese de Doutorado)

CHAVES, H.M.L.; ORLOWSKI, E. & ROLOFF, G. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. R. Bras. Ci. Solo, 17:141-147, 1993.

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L. & SAAD, A.M. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 4:23-28, 2000.

COELHO, R.D.; MIRANDA, J.H. & DUARTE, S.N. Infiltração da água no solo: Parte II acúmulo de água sobre a superfície do terreno. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 4:142-145, 2000.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura - pecuária de leiteno noroeste do Rio Grande do Sul. Ci. Rural, 41:246-250, 2011.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade de feijoeiro da cultura do feijoeiro num argissolo. Pesq. Agropec. Bras., 41:1663-1674, 2006.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A.; COSTA, A.; LUCIANO, L.V. & PÉRTILE, P. Pedofunções hídricas para solos de Santa Catarina. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO SUL DO BRASIL, 1., Florianópolis, 2010. Anais...Florianópolis, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2010.

COSTA, E.A.; GOEDERT, W.J. & SOUSA, D.M.G. Qualidade do solo submetido a sistema de cultivo com preparo convencional e plantio direto. Pesq. Agropec. Bras., 41:1185-1191, 2006.

CRUZ, A.C.R.; LIBARDI, P.L.; CARVALHO, L.A.C. & ROCHA, G.C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. R. Bras. Ci. Solo, 29:1-10, 2005.

CULLUM, R.F. Macropore flow estimations under no-till and till systems. Catena, 78:87-91, 2009.

CUNHA, G.R.; BARNI, N.A.; HAAS, J.C.; MALUF, J.R.T.; ATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M. & PIRES, J.L.F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. R. Bras. Agrometeorol., 9:446-459, 2001a.

CUNHA, G.R. & ASSAD, E.D. Uma visão geral do número especial da RBA sobre o zoneamento agrícola no Brasil. R. Bras. Agrometeorol., 9:377-385, 2001.

CUNHA, G.R.; HAAS, J.C.; MALUF, J.R.T.; CARAMORI, P.H.; ASSAD, E.D.; BRAGA, H.J.; ZULLO JR. J.; LAZZAROTTO, C.; GONÇALVES, S.; WREGE, M.; BRUNETTA, D.; DOTTO, S.R.; PINTO, H.S.; BRUNINI, O.; THOMÉ, V.M.R.; ZAMPIERI, S.L.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M. & PANDOLFO, C. Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil. R. Bras. Agrometeorol., 9:400-414, 2001b.

DALMAGO, G.A. Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 245p. (Tese de Doutorado)

DEBARBA, L. & AMADO, T.J.C. Desenvolvimento de sistemas de produção de milho no sul do Brasil com características de sustentabilidade. R. Bras. Ci. Solo, 21:473-480, 1997.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A. & MANHAGO, D.D. Vertical mulching como prática conservacionista para manejo de enxurrada em sistema plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 32:2847-2852, 2008.

DENG, X.P.; SHAN, L.; ZHANG, H. & TURNER, N.C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. Agric. Water Manag., 80:23-40, 2006.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, ASA/CCSA/SSSA, 1994. p.3-21. (SSSA Special Publication, 35)

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.

DREW, M.C. Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: A review. Plant Soil, 75:179-199, 1983.

DREWRY, J.J. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: a review. Agric. Ecosyst. Environ., 114:159-169, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, Embrapa-CNPS, 2006. 309p.

ENGEL, F.L.; BERTOL, I.; MAFRA, A.L. & COGO, N.P. Water erosion under simulated rainfall in different soil management systems during soybean growth. Sci. Agríc., 64: 187-193, 2007.

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D. & ALMEIDA, I.R. Caracterização de risco climático nas regiões produtoras de soja no Brasil. R. Bras. Agrometeorol., 9:415-421, 2001.

FIORIN, J.E.; REINERT, D.J. & ALBUQUERQUE, J.A. Armazenamento de água no solo e crescimento e produção do milho. R. Bras. Ci. Solo, 21:249-255, 1997.

FIORIN, T.T. Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2008. 116p. (Tese de Doutorado)

FORSYTHE, W.M. Las propiedades fisicas, los fatores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. Fitotec. Latinoamericana, 4:165-176, 1967.

FREITAS, P.S.L.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C. & COSTA, L.C. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases da evaporação direta da água do solo. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 10:104-111, 2006.

FREITAS, P.S.L.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C. & COSTA, L.C. Efeito da cobertura de resíduo da cultura do milho na evaporação da água do solo. R. Bras. Eng. Agric. Amb. 8:85-91, 2004.

GARCIA, S.M. & RIGHES, A.A. Vertical mulching e manejo da água em semeadura direta. R. Bras. Ci. Solo, 32:833-842, 2008.

GENRO Jr., S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & ALBUQUERQUE, J.A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. Ci. Rural, 39:65-73, 2009.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. & IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 26:885-893, 2002.

GODOY, M.J.S. & LOPES ASSAD, M.L. Aptidão agrícola de terras com estimativa de risco climático para a cultura do milho utilizando geoprocessamento. R. Bras. Ci. Solo, 26:685-694, 2002.

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. (Tese de Mestrado)

GUPTA, S.C. & LARSON, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Res. Res., 15:1633-1635, 1979.

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

HILLEL, D. Environmental soil physics. San Diego, Academic Press, 1998. 771p.

HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. Geoderma, 108:155-180, 2002.

JEGOU, D.; BRUNOTTE, J.; ROGASIK, H.; CAPOWIEZ, Y.; DIESTEL, H.; SCHRADER, S. & CLUZEAU, D. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: Preliminary study. Eur. J. Soil Biol., 38:329-336, 2002.

JONG VAN LIER, Q. & LIBARDI, P.L. Extraction of soil water by plants: Development and validation of a model. R. Bras. Ci. Solo, 212:535-542, 1997.

JONG VAN LIER, Q. Índices da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.95-106.

JONG VAN LIER, Q.; METSELAAR, K. & van DAM, J.C. Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. Vadose Zone J., 5:1264 1277, 2006.

JONG VAN LIER, Q.; METSELAAR, K.; van DAM, J.C.; JONG, R. & DUIJNISVELD, W.H.M. Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. Vadose Zone J., 7:1065-1078, 2008.

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.

KIRKHAM, M.B. Principles of soil and plant water relations. New York, Academic Press, 2005. 500p.

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.

LAMANDÉ, M.; HALLAIRE, V.; CURMI, P.; PERES, G. & CLUZEAU, D. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. Catena, 54:637-649, 2003.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C. & REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 31:1131-1140, 2007.

LEVIEN, R.; JONG VAN LIER, Q. & ALVES, A.G.C. Influence of surface crust on water infiltration rates measured by a rotating-boom rainfall simulator and a double-cylinder device. R. Bras. Ci. Solo, 24:479-486, 2000.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B.; LIBARDI, P.L. & SOUZA FILHO, A.P. Comparative evapotranspiration of eucalyptus, pine and cerrado vegetation measured by the soil water balance method. IPEF,1:5-11, 1990.

LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, L.; WU, J.B. & RANDALL, G.W. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:1096-1101, 1990.

LOPES-ASSAD, M.L.; SANS, L.M.A.; ASSAD, E.D. & ZULLO Jr., J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. R. Bras. Agrometeorol., 9:588-596, 2001.

MARION. E. Parâmetros hídricos para estimativa do rendimento de grãos de soja. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 102p. (Mestrado em Engenharia de Produção)

MARTORANO, L.G.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.; FARIA, R.T.; MIELNICZUK, J. & COMIRAN, F. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 13:397-405, 2009.

MASUTTI, M.M. Caracterização da água disponível a partir de parâmetros físicos-hídricos em solos da zona da mata do estado de Pernambuco. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1997. 69p. (Tese de Mestrado)

MEEK, B.D.; RECHEL, E.R.; CARTER, L.M.; DETAR, W.R. & URIE, A.L. Infiltration rate of a sandy loam soil: Effects of traffic, tillage, and plant roots. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:908-913, 1992.

MENEZES, M.D.; JUNQUEIRA JUNIOR, J.A.; MELLOS, C.R.; SILVA, A.M.; CURI, N. & MARQUES, J.J. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha - Serra da Mantiqueira (MG). Sci. For., 37:175-184, 2009.

METSELAAR, K. & JONG VAN LIER, Q. The shape of the transpiration reduction function under plant water stress. Vadose Zone J., 6:142-139, 2007.

MICHELON, C.J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z.B.; KNIES, A.E.; PETRY, M.T. & MARTINS, J.D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. Ci. Rural, 40:848-853, 2010.

MINELLA, J.P.; MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M. & RHEINHEIMER, D.S. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. R. Bras. Ci. Solo, 31:4-12, 2007.

MORAIS, L.F.B. & COGO, N.P. Comprimentos críticos de rampa para diferentes manejos de resíduos culturais em sistema de semeadura direta em um Argissolo Vermelho da depressão central (RS). R. Bras. Ci. Solo, 25:1041-1051, 2001.

MOURA, A.E.S.S.; CORREA, M.M.; SILVA, E.R.; FERREIRA, L.C.; FIGUEIREDO, A.C. & POSSAS, J.M.C. Interceptação das chuvas em um fragmento de floresta da mata atlântica na Bacia do Prata, Recife, PE. R. Árvore, 33:461-469, 2009.

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.

OLIVEIRA JUNIOR, J.C. & DIAS, H.C.T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. R. Árvore, 29:9-15, 2005.

OLIVEIRA, L.B.; RIVEIRO, M.R.; JACOMINE, P.K.T.; RODRIGUES, J.J.V. & MARQUES, F.A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo, 26:315-323, 2002.

PACHEPSKI, Y.A. & RAWLS, W.J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 63:1748-1757, 1999.

PAIVA, A.S.; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J.D. & TURCO, J.E.P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. Eng. Agríc., 25:161-169, 2005.

PERAZZA, J.E.S. Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 118p. (Tese de Mestrado)

PETERSEN, G.W.; CUNNIGHAM, R.L. & MATELSKI, R.P. Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I. Moisture retention as related to texture. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32:271-275, 1968.

PINTO, H.S.; ZULLO JR., J.; ASSAD, E.D.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R. & CORAL, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cafeicultura do estado de São Paulo. R. Bras. Agrometeorol., 9:495-500, 2001.

PIRES, L.S. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais. Pesq. Agropec. Bras., 41:687-695, 2006.

PIRES, L.S.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LEITE, F.P. & BRITO, L.F. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais. Pesq. Agropec. Bras., 41:687-695, 2006.

POTT, C.A. & DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. R. Bras. Ci. Solo, 27:19-27, 2003.

PRENTICE, L.C., SYKES, M.T. & CRAMER, W. A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. Ecol. Model., 65:512-570, 1993.

PREVEDELLO, J. Preparo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. em Argissolo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2008. 86p. (Tese de Mestrado)

PUCKETT, W.E.; DANE, J.H. & HAJEK, B.F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 49:831-836, 1985.

RANZINI, M. & LIMA, W.P. Comportamento hidrológico, balanço de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com *Eucalyptus*, no Vale do Paraíba, SP. Sci. For., 61:144-159, 2002.

RAWLS, W.J.; GISH, T.J. & BRAKENSIEK, D.L. Estimating of soil water retention from soil physical properties - A review. Adv. Soil Sci., 16:213-234, 1991.

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. & SAXTON, K.E. Estimation of soil water properties. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 25:1316-1320, 1982.

REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. & VILLAGRA, M.M. Estimativa de fluxos de água em solos não saturados. Bragantia, 52:83-87, 1993.

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; URACH, F.L. & CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability for Rio Grande do Sul soils. R. Bras. Ci. Solo, 33:1547-1560, 2009a.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HÅKANSSON, 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, 2009b.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 16:289-298, 1992.

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C. & MARTÍN ANDRADA, M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. R. Bras. Ci. Solo, 32:1805-1816, 2008.

RITCHIE, J.T. & JORDAN, W.R. Dryland evaporative flux in a sub-humid climate. IV. Relation to plant water status. Agron. J., 64:173-176, 1972.

ROCHA, M.G.; FARIA, L.M.; CASAROLI, D. & Jong van LIER, Q. Avaliação de modelo de extração da água do solo por sistemas radiculares divididos entre camadas de solo com propriedades hidráulicas distintas. R. Bras. Ci. Solo, 34:1017-1028, 2010.

ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; SATTLER, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I. & VIEIRA, D.A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. Pesq. Agropec. Bras., 43:395-400, 2008.

ROSSETTI, L.A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. R. Bras. Agrometeorol., 9:386-399, 2001.

SALCHOW, E.; LAL, R.; FAUSEY, N. & WARD, A. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in southern Ohio. Geoderma, 73:165-181, 1996.

SALES, L.E.O.; FERREIRA, M.M.; OLIVEIRA, M.S. & CURI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. Pesq. Agropec. Bras., 34:2091-2095, 1999.

SAXTON, K.E. & RAWLS, W.J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Sci. Soc. Am. J., 70:1569-1578, 2006.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J.; ROMBERGER, J.S. & PAPENDICK, R.I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J., 50:1031-1036, 1986.

SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:431-441, 2001.

SIDIRAS, N. & ROTH, C.H. Infiltration measurements with double-ring infiltrometers and a rainfall simulator under different surface conditions on an Oxisol. Soil Tillage Res., 9:161-168, 1987.

SILLON, J.F.; RICHARD, G. & COUSIN, I. Tillage and traffic effects on soil hydraulic properties and evaporation. Geoderma, 116:29-46, 2003.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to the degree of soil compaction of two Brazilian oxisols under no-tillage. R. Bras. Ci. Solo, 33: 1097-1104, 2009.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. R. Bras. Ci. Solo, 30:391-399, 2006.

SILVA, M. A. S. MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. Ci. Rural, 35:544-552, 2005.

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.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:191-199, 2000.

SILVA, M.T.B.; REINERT, D.J. & KLEIN, V.A. Características de galerias de *Diloboderus abderus* e simulação de infiltração de água no solo. R. Unicruz, 3:1-6, 2000.

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, A.S.; BRITO, L.T.; OLIVEIRA, C.A. & MOTA, A.W. Parâmetros de solo em função da umidade na capacidade de campo em áreas irrigáveis do trópico semiárido Brasileiro. Pesq. Agropec. Bras., 25:103-116, 1990.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; COOPER, M. & PEREIRA, G.T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. Pesq. Agropec. Bras., 41:487-492, 2006.

STONE, L.F. & MOREIRA, J.A.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. LIMA, C.A.G. & SILANS, A.P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. Pesq. Agropec. Bras., 35:835-841, 2000.

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

STURMER, S.L.K.; DALMOLIN, R.S.D.; AZEVEDO, F.A. & MENEZES, F.P. Relação da granulometria do solo e morfologia do saprolito com a infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. Ci. Rural, 39:2057-2064, 2009.

TAIZ, L. & ZEIGER, E. Fisiologia do estresse. In: TAIZ, L. & ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 3.ed. Porto Alegre, Artmed, 2004. p.613-687.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 64:327-338, 2000.

TOMASELLA, J. & HODNETT, M. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. Soil Sci., 163:190-202, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 22:573-581, 1998.

van den BERG, M.; KLAMT, E.; van REEUWIJK, L.P. & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. Geoderma, 78:161-180, 1997.

van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from Southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. Soil Tillage Res., 92:104-113, 2007.

VEREECKEN, H.J.; MAES, J.; FEYEN, J. & DARIUS, P. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. Soil Sci., 148:389-403, 1989.

VIEIRA, M.L. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo. 31:1271-1280, 2007.

VOLK, L.B.S. & COGO, N.P. Inter-relação biomassa vegetal subterrânea-estabilidade de agregados-erosão hídrica em solo submetido a diferentes formas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 32:1713-1722, 2008.

WILLIAMS, S.M. & WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1403-1409, 2004.

WÖSTEN J.H.M. & van GENUCHTEN M. Th. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. Soil Sci. Soc. Am. J., 52:1762-1770, 1988.

WÖSTEN J.H.M.; FINKE P.A. & JANSEN M.J.W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. Geoderma, 66:227-237, 1995.