



HAL
open science

Relação da água com a fertilidade do solo

Amanda Posselt Martins, Murilo Veloso, Luiz Gustavo de O. Denardin

► **To cite this version:**

Amanda Posselt Martins, Murilo Veloso, Luiz Gustavo de O. Denardin. Relação da água com a fertilidade do solo. UFLA. Manejo e conservação da água e do solo, UFLA, pp.24-39, 2020, 978-65-86561-08-1. hal-04260924

HAL Id: hal-04260924

<https://normandie-univ.hal.science/hal-04260924>

Submitted on 18 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RELAÇÃO DA ÁGUA COM A FERTILIDADE DO SOLO

Amanda Posselt Martins¹, Luiz Gustavo de Oliveira Denardin²,
Murilo Veloso Gomes³

¹Professora do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre - RS. E-mail: amanda.posselt@ufrgs.br.

²Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, Porto Alegre – RS. E-mail: luizgdenardin@gmail.com.

³Pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, Porto Alegre – RS. E-mail: murilo.veloso@ufrgs.br.

INTRODUÇÃO

O conceito mais atual de fertilidade do solo ressalta a capacidade do solo em suprir (ter e fornecer) nutrientes às plantas, deixando-as livre de elementos potencialmente tóxicos e suportando altas produtividades das culturas. Durante muito tempo, o conceito esteve estritamente relacionado a fatores de natureza química, embasado em um conceito químico e mineralista de fertilidade do solo. No entanto, a produtividade das culturas é dependente de inúmeras variáveis, estando elas relacionadas com fatores climáticos e inerentes à própria planta, além de diversos atributos, propriedades e características do próprio solo. Assim, avaliando-se sob uma visão integral e dinâmica dos fatores relacionados à fertilidade do solo, um solo fértil deve conter nutrientes em quantidades suficientes e balanceadas em formas assimiláveis, estar livre de elementos tóxicos, além de também possuir boas características físicas e microbiológicas (MEURER et al., 2007).

O crescimento vegetal resulta da ação interativa de muitos fatores. Dos relacionados ao solo, as características físicas, químicas e biológicas condicionam aptidão do solo para obtenção de altos rendimentos. Cada um desses fatores, além de afetarem diretamente o crescimento das plantas, estão relacionados entre si (Figura 1). Exemplificando, a água e o ar ocupam o espaço poroso do solo, e os fatores que afetam as relações de água necessariamente influenciam o ar do solo. Por sua vez, mudanças no teor de umidade afetam não só o conteúdo de ar, mas

também atributos químicos e microbiológicos do solo, diretamente relacionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

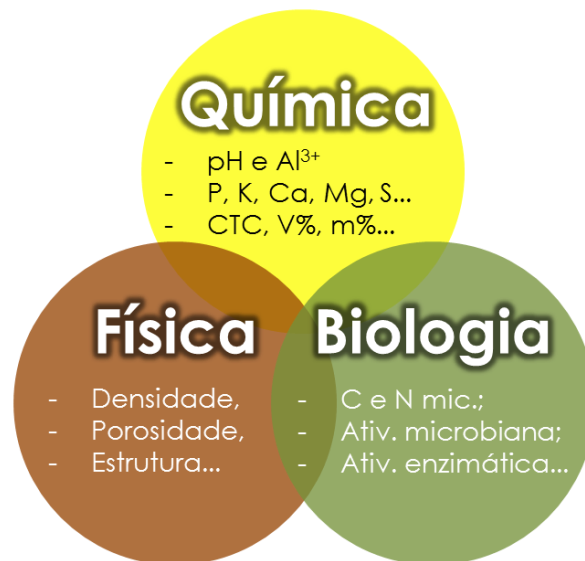


Figura 1. Fertilidade do solo com base no conceito atual, sendo resultado da interação de fatores e características químicas, físicas e biológicas do solo.

Para que uma planta inicie um adequado desenvolvimento e conseqüentemente possa produzir, ela necessita de requisitos indispensáveis, como uma base (solo) adequada para fixação das raízes, temperatura, luz solar, ar, água e quantidade adequada de nutrientes. Destes, a água é um dos fatores de fundamental importância na produção vegetal, sendo tanto seu excesso quanto sua falta decisivos no seu crescimento e desenvolvimento (REICHARDT, 1978). O desenvolvimento de uma planta só inicia a partir da germinação da semente se houver um nível adequado de água, que permita o desenvolvimento do embrião. Ainda, posterior a isso, a plântula formada possui uma estrutura frágil, que necessita de uma alta disponibilidade de água para sobreviver (FLOSS, 2011).

As culturas utilizam expressivos volumes de água durante todo o ciclo vegetativo e reprodutivo, necessários para o funcionamento de todos os processos, como a turbidez dos tecidos, o transporte de nutrientes e fotossintatos ou fotoassimilados, substrato metabólico na fotossíntese, entre outros (FLOSS, 2011). De todas as substâncias absorvidas pelas plantas, a água é a requerida em maior quantidade. Ela é o principal constituinte dos tecidos vegetais, algumas vezes correspondendo a 95% do peso total de massa verde (SUTCLIFE, 1980). Embora

cerca de 98% da água que é absorvida retorne para o ambiente via transpiração, esse fluxo de água é extremamente necessário para o crescimento vegetal e portanto sua taxa deve ser mantida dentro dos limites ótimos para cada cultura (REICHARDT, 1976).

Relacionando a fertilidade do solo com o conteúdo de água, infere-se que cabe a um solo fértil possuir uma estrutura adequada capaz de armazenar água em quantidades adequadas, por um maior período de tempo, além de viabilizar o desenvolvimento radicular das plantas a fim de que possam explorar ao máximo o perfil do solo, garantindo taxas constantes de absorção hídrica (MEURER et al., 2007). No solo, a água está sempre presente no espaço poroso em proporção complementar do ar. A quantidade de água armazenada no solo irá depender da porosidade (estrutura e textura), do teor de matéria orgânica e da natureza das argilas, e por isso devem ser preconizados manejos do solo que favoreçam incrementos e melhorias dessas estruturas.

Além da influência direta da água no funcionamento dos processos biológicos das plantas, a água também atua como um fator chave na nutrição de plantas. A nutrição das plantas é altamente dependente da disponibilidade de água no solo, influenciando na decomposição da matéria orgânica (reciclagem de nutrientes), crescimento radicular (alongação das células), transporte, redistribuição e assimilação de nutrientes pelas culturas, caracterizando-se por ser um dos fatores que mais influenciam na absorção de nutrientes (FLOSS, 2011). Todos os elementos essenciais (nutrientes) às plantas são majoritariamente absorvidos através de um meio aquoso, por meio da solução do solo. O suprimento (transporte) desses nutrientes até a superfície das raízes é decorrente da ação conjunta de três mecanismos, sendo eles a interceptação radicular, o fluxo de massa e a difusão (BARBER, 1995). Por essa razão, as deficiências hídricas podem determinar também deficiências minerais nas culturas e a redução da eficiência de uso dos fertilizantes.

Nesse sentido, será abordado no presente capítulo a relação da água com com o adequado crescimento e desenvolvimento de plantas – que, em outras palavras, se traduz em um solo fértil (ou na fertilidade de um solo), que supra ar, água e nutrientes em quantidades e proporções adequadas. Para tanto, será primeiramente tratado do papel da “fertilidade física”, que condiciona a

disponibilidade de água no solo e, posteriormente, a sua relação com o suprimento de nutrientes às plantas.

DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO: RELAÇÃO COM FATORES FÍSICOS E RESPOSTA DE PLANTAS

A fertilidade física do solo é um dos componentes que abrangem a qualidade do solo, e está relacionado à fertilidade química do solo, que é o objeto de estudo deste capítulo (Fig. 1). A água, o oxigênio, a temperatura e a resistência mecânica afetam a emergência da semente ou crescimento radicular que, por conseguinte, afetam o crescimento da planta (LETEY, 1985). O conteúdo de água no solo pode também influenciar a troca de gases, bem como a temperatura do solo e a resistência mecânica. Das quatro condições físicas diretamente relacionadas ao crescimento das plantas, a água é o fator controlador dominante, afetando os outros três fatores. Dessa forma, a fertilidade física do solo tem um papel muito importante sobre a fertilidade química do solo, visto que a disponibilidade de água no solo é fundamental para as plantas e os microrganismos, para a regulação de trocas gasosas e para o suprimento de nutrientes.

O conteúdo de água no solo está constantemente mudando por causa da evapotranspiração, precipitação, irrigação, percolação e os movimentos ascensionais da água. A água não é extraída uniformemente através da zona das raízes. Então, diferenças no potencial de água no solo ocorrem em posições diferentes na zona da raiz. Nenhum valor único de potencial de água pode descrever a condição na qual a planta é exposta.

A importância do parâmetro que liga a água do solo com o crescimento da planta, entretanto, não é o conteúdo de água no solo, mas o potencial de água no solo (LETEY, 1985). O potencial de água no solo refere-se à energia necessária para a água ser movida de um lugar com maior energia potencial para um de menor, podendo se determinar o potencial de movimento da água no solo. Tipos diferentes de solo contêm diferentes conteúdos de água em um dado potencial. Há uma relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial para um dado solo, sendo possível mensurar o conteúdo de água e inferir o valor do potencial de água no solo se a relação entre os dois é conhecida. Modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes (discutido com

maior profundidade no capítulo 2) pode prejudicar a capacidade do solo em promover condições físicas adequadas ao crescimento do sistema radicular e desenvolvimento das plantas (TORMENA et al., 1998). Exemplos de deterioração da qualidade física do solo afetando o aproveitamento da água pelas culturas podem ser a má infiltração de água, escoamento superficial da água, endurecimento do solo, aeração deficiente, pouca capacidade de enraizamento e baixa trabalhabilidade do solo. Geralmente, um solo exibe vários ou todos esses problemas físicos simultaneamente, sendo que todos esses sintomas têm uma causa comum: a deterioração da estrutura do solo. Por outro lado, a melhoria da qualidade física do solo ocorre quando o solo exibe o oposto ou a ausência dessas condições.

Na ausência de limitações térmicas (como é o caso dos solos brasileiros), há um impacto direto da estrutura do solo na relação entre o conteúdo de água e o crescimento de plantas. A faixa de conteúdo de água no solo que não restringem o crescimento das plantas pode ser integrada num único parâmetro, conhecida como intervalo hídrico ótimo (IHO), que reflete os efeitos de diferentes propriedades físicas em processos biológicos como, por exemplo, o crescimento das plantas.

O IHO define uma região delimitada por limites superior e inferior de conteúdos de água, na qual são mínimas as limitações para o crescimento das plantas, associadas com o potencial matricial ou disponibilidade de água, aeração e a resistência do solo à penetração das raízes (Figura 2). O limite superior é usualmente associado ao conteúdo de água na capacidade de campo e, o limite inferior é associado ao conteúdo de água no ponto de murcha ou o menor potencial de água que não reduzirá o crescimento da planta. Entretanto, o IHO pode ser afetado pela aeração e/ou resistência mecânica, particularmente em solos pobremente estruturados com alta massa específica do solo (TORMENA et al., 1998).

Considerando que diferentes solos retêm diferentes conteúdos de água, em dado potencial, é necessário utilizar o conceito do potencial com que a água está retida no solo para definir os limites de disponibilidade de água para as culturas (SILVA et al., 2010). Teoricamente, logo após uma chuva ou uma irrigação, estando o solo completamente saturado, parte da água estaria livre no solo, ou seja, o potencial seria igual a zero. Nesta condição, a água no solo está sujeita à ação do campo gravitacional. No momento em que o fluxo de drenagem tornar-se

desprezível, o solo atinge o limite superior de disponibilidade de água às plantas, o qual tem sido estabelecido como capacidade de campo. Para solos tropicais, assume-se usualmente, que nesse ponto a água no solo está retida num potencial de -0,01 MPa (SILVA et al., 2010).

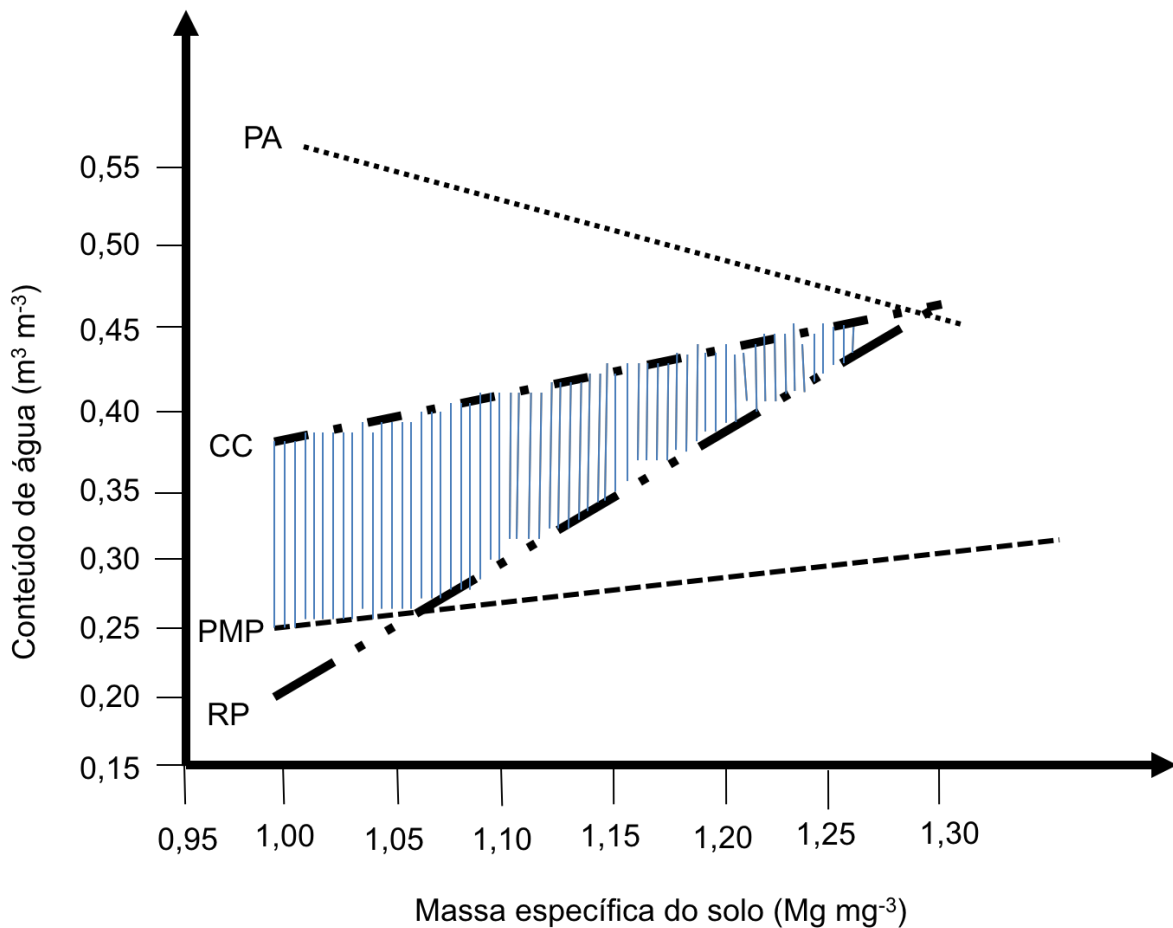


Figura 2. Variação do conteúdo de água com a massa específica do solo nos níveis críticos da capacidade de campo, ponto de murcha (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo do Solo (IHO). Fonte: Tormena et al. (1998).

Partindo da condição de capacidade de campo, o conteúdo de água no solo decresce gradualmente, em virtude da evapotranspiração pela superfície e da absorção pelas raízes das plantas. Com o decréscimo do conteúdo de água, verifica-se uma redução gradual do potencial, até que a energia com que a água é retida pelo solo supera a capacidade das plantas em absorver esta água, e a planta

murcha permanentemente. Nessa condição, define-se o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (PMP), o qual possui boa correlação com o potencial da água no solo de -1,5 MPa (SILVA et al., 2010).

Em solos com estrutura preservada, geralmente em condições naturais ou bem manejados, a disponibilidade de água é igual à água disponível, ou seja, a diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Entretanto, o IHO diminui quando o limite de porosidade de aeração (10%) é atingido em umidade menor que a de capacidade de campo e/ou o potencial de resistência à penetração é maior que o PMP. Esse efeito ocorre devido à destruição de macroporos, oxidação da matéria orgânica e pela compactação, o que pode ser observado pelo aumento da massa específica do solo. Assim, o aumento na massa específica do solo pela compactação provoca modificações nas propriedades físicas, principalmente na porosidade de aeração e resistência à penetração diminuindo o IHO, podendo atingir o valor crítico, que indica um limitado crescimento das culturas acima desse valor.

Entretanto, ao limitar a porosidade de aeração a 10%, descarta-se as diferenças nos fluxos de ar que existe entre solos diferentes ou até mesmo em um solo sob manejos diferentes. A distribuição e conformação dos poros influencia diretamente no fluxo de gases e água no solo, por exemplo: um solo em Sistema Plantio Direto pode facilitar a difusão/distribuição de ar e água no solo devido a continuidade de poros/bioporos, inexistentes em sistema convencional. Estudos de características dinâmicas do solo, descrevendo parâmetros de transporte de água e oxigênio, que possam ser integrados na quantificação do IHO são necessários. A resistência a penetração também é supervalorizada como propriedade limitante ao desenvolvimento das plantas. No IHO, o limite para a RP é a umidade na qual essa atinge 2,0 MPa. Entretanto em muitos casos de solos compactados mas com abundância de bioporos contínuos, este valor não é limitante ao crescimento de raízes, pois funcionam como rotas alternativas à área compactada (SILVA et al., 2010; VAN LIER & GUBIANI, 2015).

Os impactos da atividade humana (compactação do solo, preparo do solo) não apenas modificam a morfologia dos poros dos solos agrícolas, mas também alteram sua anisotropia, o que pode ter impactos nos principais processos e serviços ecossistêmicos vitais, como transporte e armazenamento de água, troca gasosa e aeração do solo. Isso, por sua vez, afeta a relação da fertilidade física com o

transporte de nutrientes para as raízes, afetando a produtividade das culturas como um todo. Os gradientes de potenciais no sistema solo-planta-atmosfera dão origem a um fluxo de água nessa mesma direção. A intensidade desse fluxo é determinada pelos próprios potenciais, bem como pelas resistências encontradas no caminho do escoamento. A condutividade hidráulica diminui enquanto o solo seca. Conseqüentemente, a resistência ao fluxo de água aumenta, e para a manutenção do fluxo de água o potencial da raiz diminuirá, gerando uma diferença de potencial maior entre solo e raiz (VAN LIER, 2010). No entanto, existe um limite de potencial de água na raiz. Próximo à esse limite, mecanismos fisiológicos causam o fechamento de estômatos nas folhas, órgão onde ocorrem as trocas gasosas com a atmosfera. Dessa forma, aumenta a resistência total do caminho solo-planta-atmosfera e diminui o fluxo de água (transpiração). Ao mesmo tempo em que diminui a transpiração por causa do fechamento dos estômatos, a entrada de CO₂ fica prejudicada, afetando negativamente a taxa fotossintética da planta (VAN LIER, 2010).

IMPORTÂNCIA DA ÁGUA PARA O SUPRIMENTO DE NUTRIENTES ÀS PLANTAS

A fertilidade química do solo é aquela “mais conhecida”, advinda do conceito químico e mineralista, que diz que um solo fértil é aquele capaz de suprir às plantas os nutrientes, em quantidades e proporções adequadas, e na ausência de elementos tóxicos. No entanto, conforme explanado anteriormente, diversos outros fatores interferem no crescimento e desenvolvimento das plantas e devem ser levados em conta para definir a fertilidade de um solo – muitos (a maioria) deles, ligados à dinâmica da água no solo.

Para as plantas apresentarem adequado crescimento e desenvolvimento, elas devem ser supridas de 14 elementos essenciais (nutrientes), através majoritariamente do solo, via suprimento e absorção radicular. Para os processos de suprimento e absorção ocorrerem, se faz necessário que tais nutrientes estejam dissolvidos na solução do solo. De forma sintetizada e simples, pode-se resumir o conceito de solução do solo como a fase líquida aquosa do solo ou, ainda, em outras palavras, como a água do solo com solutos dissolvidos. Na solução do solo, grande

parte dos solutos são íons que ocorrem tanto na forma livre e hidratada como na forma complexada com ligantes orgânicos e inorgânicos. Desta maneira, fica visível a importância da água no processo de suprimento e absorção de nutrientes, pois se não há disponibilidade de água, não há suprimento e/ou absorção de nutrientes.

Assim, sabe-se que a baixa disponibilidade hídrica no solo pode se tornar um fator limitante para o suprimento de nutrientes até a superfície das raízes. No entanto, alguns trabalhos demonstram que em condições de déficit hídrico, menos de 5% da massa total de raízes é capaz de absorver, no subsolo, mais de 60% do total de nutrientes absorvidos pelas plantas (FOX & LIPPS, 1961). É sabido que quanto menor a disponibilidade de água no solo, mais a planta irá investir no desenvolvimento radicular em subsuperfície, conforme exemplificado na Figura 3. Isso ocorre porque, em subsuperfície, as perdas por evaporação são menores, mantendo maiores teores de água durante mais tempo nessas camadas do solo. Assim, as raízes respondem, quando da ocorrência do déficit hídrico, a uma maior produção, na busca tanto por água como por nutrientes.

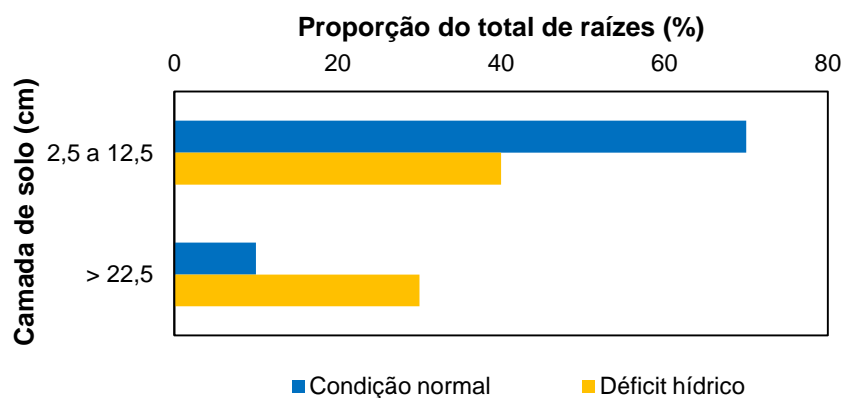


Figura 3. Distribuição em camadas do solo da proporção do total de raízes produzidas por plantas de cevada em condição normal de precipitação e na ocorrência de déficit hídrico. Fonte: desenhado pelos autores a partir de Scott-Russell (1977).

Dessa forma, fica claro como a água tem um papel primordial no aproveitamento dos nutrientes, pois irá delimitar a abrangência do principal órgão de absorção de nutrientes minerais das plantas, que são as raízes. Para os nutrientes serem supridos até a superfície das raízes, existem basicamente três diferentes

formas ou mecanismos de suprimento, já citadas acima (interceptação radicular, o fluxo de massa e a difusão). Todos esses mecanismos de suprimento são maximizados quando do maior crescimento de raízes das plantas que, conforme explanado anteriormente, responde diretamente em função da disponibilidade de água no solo. Assim, podemos afirmar também que a água do solo influencia diretamente no maior ou menor suprimento de nutrientes.

Na interceptação radicular, ao crescer raízes no solo, elas interceptam os íons (nutrientes) na solução. Ou seja, as raízes obtêm os nutrientes fisicamente e contatando-os na solução do solo ou, mais raramente, na superfície da fase sólida. Portanto, é um mecanismo que é função direta da superfície de raiz por superfície de solo e a quantidade máxima absorvida será dada pela quantidade de nutrientes disponíveis nos espaços porosos ocupados pelas raízes (MARSCHNER, 1995). Em média, as raízes ocupam em torno de 1% do volume total de solo. Mas algumas espécies, sobretudo plantas forrageiras e quando adequadamente pastejadas, podem ocupar volumes maiores, de 3 a 5% na camada superficial do solo. E, conforme demonstrado na Figura 3, o crescimento absoluto e o local de crescimento das raízes também será afetado pela disponibilidade hídrica, afetando assim o suprimento de nutrientes por interceptação radicular no perfil do solo. Da mesma forma, conforme demonstrado por Augé (2004), a associação com micorrizas é afetada e pode afetar a disponibilidade de água no solo, aumentando o contato raiz-solo e conseqüentemente a absorção de nutrientes por esse mecanismo.

O fluxo de massa consiste do suprimento do nutriente pelo seu movimento em uma fase aquosa móvel, devido à diferença de potencial exercida pela planta. Assim, o fluxo de massa segue o fluxo transpiratório e alguns trabalhos demonstram que a taxa de fluxo de água exercida pelas plantas pode chegar a até 300 L por kg de matéria seca. Dessa maneira, o fluxo de massa é uma função direta da concentração do nutriente em solução e do volume de água absorvido pela planta (MARSCHNER, 1995). Percebe-se que, nos dois fatores que fazem com que o suprimento de nutrientes às plantas por fluxo de massa seja maior ou menor, a água está envolvida: como solvente para a dissolução dos solutos (nutrientes) e diretamente sendo absorvida pelas plantas. Indiretamente, também temos a água envolvida devido à sua influência na produção de raízes (Figura 3), que poderá determinar maior desenvolvimento vegetal e taxas de transpiração, aumentando o suprimento de nutrientes via fluxo de massa.

Por fim, o suprimento de nutrientes via o processo de difusão se dá através do caminhamento do íon em distâncias muito curtas, em uma fase aquosa estacionária. Ou seja, os nutrientes se movem na solução, de um local de alta concentração para um local de baixa concentração (superfície da raiz). Na difusão, o nutriente se movimenta de uma zona de maior concentração para uma zona de menor concentração. Quem rege os fatores que interferem a difusão de nutrientes é a lei de Fick, cuja fórmula simplificada apresenta que a velocidade de difusão é diretamente dependente do coeficiente de difusão do nutriente (soluto) e do gradiente de concentração (razão da diferença de concentração e da distância do nutriente até a superfície da raiz) (MARSCHNER, 1995). Nesse mecanismo de suprimento, a importância e a contribuição da água é ainda mais relevante, pois o nutriente além de precisar estar dissolvido na solução (água do solo) também precisa se movimentar por ela, responde ao gradiente de concentração. Por essa razão, solos que tendem a reter mais água, formando filmes d'água entre as partículas do solo (como os argilosos, por exemplo), tendem a ter plantas mais bem nutridas em fósforo e potássio, por exemplo, pois são dois nutrientes em que há maior contribuição da difusão para o seu respectivo suprimento às plantas.

Essa inter-relação entre água, distribuição de raízes e suprimento de nutrientes às plantas, principalmente no mecanismo da difusão, pode ser melhor entendida observando a Figura 4. Nota-se que a contribuição de camadas superficiais do solo durante o estágio vegetativo das plantas, onde a taxa de transpiração é muito alta, é muito maior do que no período reprodutivo. No caso do fósforo e no estudo em questão, aproximadamente 80% da camada superficial e 20% de camadas subsuperficiais (Figura 4). Isso porque, pela própria transpiração da planta aliada à evaporação natural do solo, o estágio vegetativo é um período em que a planta determina um *status* de “déficit hídrico” para o seu próprio período reprodutivo posterior. A partir daí, muda-se completamente a contribuição das diferentes camadas de solo para os nutrientes que são absorvidos nesse estágio (reprodutivo), com cerca de 65% oriundo da camada superficial e 35% de camadas subsuperficiais (Figura 4).

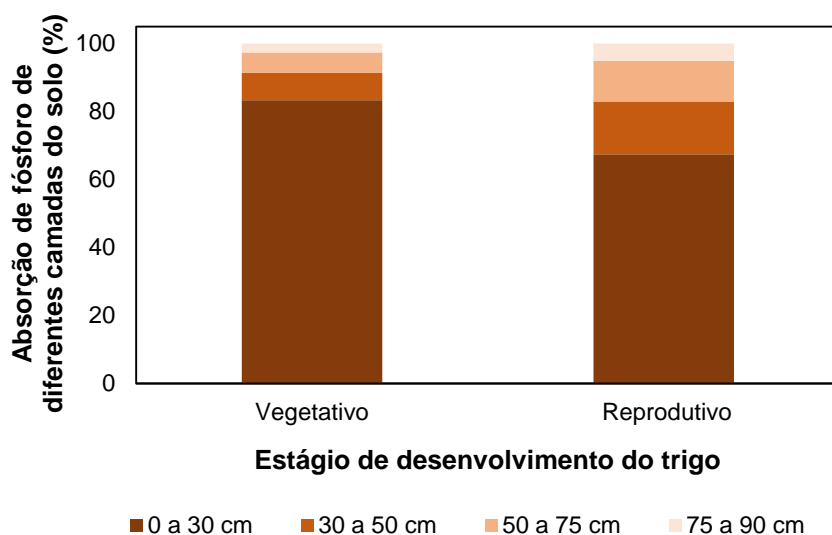


Figura 4. Absorção de fósforo de diferentes camadas do solo durante o desenvolvimento de plantas de trigo. Fonte: desenhado pelos autores a partir de Fleige et al. (1981).

Vale salientar que os teores em subsuperfície são de 2 a 5 vezes menor do que aqueles observados em superfície (FLEIGE et al., 1981) e, ainda assim, tem uma importância muito grande para a nutrição das plantas e o fornecimento dos elementos químicos essenciais para o seu adequado desenvolvimento e finalização de ciclo vital. Em toda essa dinâmica, a água é a atriz principal, e por isso tem grande importância para a compreensão tanto da fertilidade do solo como da nutrição mineral de plantas, no que tange à compreensão da resposta que é observada nas plantas a campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUGÉ, R.M. Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. *Canadian Journal of Soil Science*, 84:373-381, 2004.
- BARBER, S. A. *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1995. 414 p.
- FLEIGE, H.; STREBEL, O.; RENGER, M.; GRIMME, H. Die potentielle P-Anlieferung durch Diffusion als Funktion von Tiefe, Zeit und Durchwurzelung bei einer Parabraunerde au Löss. *Mitt. Dtsch. Bodenkd. Ges.*, 32:305-310, 1981.
- FLOSS, E. L. *Fisiologia das plantas cultivadas*. 4. ed. Passo Fundo: UPF, 2008. 734

p.

FOX, R.L.; LIPPS, R.C. Distribution and activity of roots in relation to soil properties. *Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 7:260-267, 1960.

REICHARDT, K. A água na produção agrícola. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978. 120 p.

REICHARDT, K. Disponibilidade e absorção de nutrientes em relação às condições físicas do sistema solo-planta-atmosfera. In: MALAVOLTA, E., org. *Manual de química agrícola*. São Paulo, Agronômica Ceres, 1976. p.134-135.

SUTCLIFE, J. F. As plantas e a água. São Paulo: EPU/Edusp, 1980. 123 p.

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

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, v.1, p.277-294, 1985.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

SCOTT-RUSSELL, R. *Plant Root Systems: Their Function and Interaction with the Soil*. New York: McGraw-Hill, 1977. 272 p.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; TORMENA, A.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V.A. Indicadores de qualidade física do solo. In: VAN LIER, Q. de J. (Ed.). *Física do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.241-281.

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 LIER, Q. de J. Disponibilidade de água às plantas. In: VAN LIER, Q. de J. (Ed.). *Física do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.283-298.

VAN LIER, Q. de J.; GUBIANI, P.I. Beyond the "Least Limiting Water Range": rethinking soil physics research in Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.925-939, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140596.