ANÁLISE RADICULAR E SUAS APLICAÇÕES AGRONÔMICAS EM PLANTAS CULTIVADAS: UMA BREVE REVISÃO

Autores: Vanessa Moura Cardoso[1]. Bianca Callegari Freitas[1]. Daniel Ferreira Leal[1]. Aline Vieira da Silva[1].

[1]Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alto Universitário s/n, 29500-000 - Alegre-ES, Brasil, vanessa.m.cardoso@edu.ufes.br, alinevdasilva1998@gmail.com, bianca.callegarifreitas@outlook.com, danielleal942@gmail.com.

Resumo
O sistema radicular influencia diretamente o desenvolvimento das plantas, a absorção de água e nutrientes e a adaptação às condições do ambiente. Este trabalho teve como objetivo revisar os principais métodos de análise radicular, os fatores relacionados ao desenvolvimento das raízes e suas aplicações agronômicas, a partir de artigos científicos, livros e documentos técnicos. Os estudos indicam que atributos como profundidade, comprimento, densidade e arquitetura radicular estão relacionados à capacidade de exploração do solo e à aquisição de recursos pelas plantas. Métodos destrutivos permitem avaliar a biomassa e a distribuição das raízes, enquanto técnicas não destrutivas e ferramentas de análise de imagens possibilitam acompanhar o crescimento radicular com maior detalhamento. A avaliação desses atributos pode auxiliar no manejo da água e da fertilidade do solo, na identificação de limitações ao desenvolvimento das plantas e na seleção de características radiculares de interesse agronômico.
Palavras-chave: Sistema radicular. Arquitetura radicular. Fenotipagem. Manejo agrícola.

Área do Conhecimento: Ciências agrárias, agronomia.

Introdução

O sistema radicular constitui um dos principais componentes do desenvolvimento das plantas, desempenhando funções essenciais na absorção de água e nutrientes, sustentação mecânica, armazenamento de reservas e interação com os organismos presentes no solo. Embora se desenvolva abaixo da superfície, seu crescimento influencia diretamente o estabelecimento das culturas, a eficiência no uso dos recursos naturais e a produtividade agrícola (Taiz *et al*., 2017). Além disso, as raízes atuam como a principal interface entre a planta e o ambiente edáfico, respondendo continuamente às variações físicas, químicas e biológicas do solo.

O desenvolvimento radicular é condicionado por diversos fatores ambientais, como disponibilidade hídrica, fertilidade, pH, temperatura, compactação e atividade biológica do solo. Alterações nessas condições podem modificar a arquitetura das raízes, reduzindo sua capacidade de exploração do perfil do solo e comprometendo a absorção de água e nutrientes (Marschner, 2012). Além disso, a associação com fungos micorrízicos e rizobactérias promotoras de crescimento contribui significativamente para o aumento da eficiência nutricional e da tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos (Smith; Read, 2008).

Nos últimos anos, os avanços na fenotipagem radicular permitiram uma evolução significativa na avaliação do sistema radicular. Métodos tradicionais, como escavações de perfis e coletas de monólitos de solo, passaram a ser complementados por tecnologias, incluindo minirrizotrons, tomografia computadorizada, ressonância magnética e softwares especializados para análise digital de imagens. Essas ferramentas possibilitam a quantificação de atributos morfológicos, como comprimento, volume, diâmetro, área superficial e padrão de ramificação das raízes, permitindo uma caracterização mais detalhada do crescimento radicular e de sua resposta às condições de cultivo (Lynch, 2019).

Além de sua relevância científica, a análise do sistema radicular possui ampla aplicação na agricultura moderna, subsidiando decisões relacionadas ao manejo da irrigação, da fertilidade e da qualidade do solo. A compreensão das características radiculares permite otimizar o uso de água e nutrientes, favorecendo maior eficiência produtiva e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Bengough *et al*., 2011).

Dessa forma, esta revisão bibliográfica teve como objetivo reunir e discutir os principais métodos de análise do sistema radicular em plantas cultivadas, abordando suas características, vantagens, limitações e aplicações agronômicas, bem como a importância da interpretação dos atributos radiculares para o manejo sustentável e a avaliação da qualidade do solo.

Metodologia

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica, desenvolvida com o objetivo de reunir e analisar informações científicas acerca dos principais métodos utilizados na análise do sistema radicular de plantas cultivadas, bem como sua interpretação e aplicações agronômicas. A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scientific Electronic Library Online (SciELO) e Google Acadêmico, além da consulta a livros didáticos, capítulos de livros e documentos técnicos nacionais e internacionais relacionados à área das Ciências Agrárias.

Foram considerados artigos científicos, livros, capítulos de livros e documentos técnicos publicados entre 2000 e 2022, nos idiomas português e inglês, priorizando materiais relevantes para a compreensão das características do sistema radicular, dos fatores que influenciam seu desenvolvimento e dos diferentes métodos utilizados para sua avaliação.

As buscas foram realizadas utilizando, de forma isolada e combinada, as seguintes palavras-chave: "sistema radicular", "análise de raízes", "arquitetura radicular", "crescimento radicular", "fenotipagem de raízes", "métodos de análise radicular", "root system", "root analysis", "root architecture", "root growth" e "root phenotyping".

Foram incluídas publicações que abordassem características e atributos do sistema radicular, fatores físicos, químicos e biológicos relacionados ao desenvolvimento das raízes, métodos destrutivos e não destrutivos de avaliação, técnicas de fenotipagem, análise digital de imagens e aplicações agronômicas dos indicadores radiculares. Foram excluídos trabalhos duplicados, estudos sem relação direta com o tema, publicações sem acesso ao texto completo e documentos que não apresentavam informações suficientes para atender aos objetivos desta revisão.

A análise dos estudos selecionados foi realizada de forma qualitativa e descritiva, considerando os principais resultados e informações apresentados na literatura, com ênfase nos métodos de avaliação do sistema radicular, suas vantagens e limitações, na interpretação dos atributos radiculares e em suas aplicações no manejo agrícola e na avaliação da qualidade do solo.

Resultados e Discussão

O sistema radicular está diretamente relacionado ao desempenho agronômico das culturas, pois participa da absorção de água e nutrientes, da sustentação mecânica, do armazenamento de reservas e das interações entre a planta e o ambiente edáfico (Taiz *et al*., 2017). A análise das raízes também pode auxiliar na identificação de limitações físicas e químicas do solo que afetam o desenvolvimento vegetal (Bengough *et al*., 2011; Marschner, 2012).

Os principais atributos analisados incluem arquitetura, profundidade, comprimento, densidade, volume e distribuição das raízes, os quais estão relacionados à capacidade de exploração do solo. Sistemas radiculares com maior exploração do perfil podem favorecer a aquisição de água e nutrientes, especialmente em condições nas quais esses recursos são limitantes (Gregory, 2006; Lynch, 2019). Além disso, diferenças na arquitetura radicular entre espécies e cultivares contribuem para respostas distintas às condições do ambiente de cultivo.

O desenvolvimento radicular é influenciado por fatores físicos, químicos e biológicos do solo. A compactação pode restringir a elongação e a penetração das raízes, enquanto disponibilidade hídrica, aeração, temperatura, fertilidade e pH interferem no seu crescimento e funcionamento (Bengough *et al*., 2011; Marschner, 2012). Além disso, associações com fungos micorrízicos podem ampliar a exploração do solo pelas plantas e favorecer a aquisição de nutrientes (Smith; Read, 2008). Essas relações mostram que o desenvolvimento das raízes resulta da interação entre as características da planta e as condições do ambiente edáfico.

A avaliação das raízes pode ser realizada por métodos destrutivos e não destrutivos. Técnicas como escavação de perfil, coleta de monólitos de solo e amostragem com trado fornecem informações sobre a biomassa e a distribuição radicular, porém dificultam avaliações sucessivas da mesma planta ou área

(Gregory, 2006). Em contrapartida, técnicas de fenotipagem baseadas em imagens, incluindo tomografia computadorizada e outros métodos não invasivos, ampliaram a possibilidade de observar e quantificar o desenvolvimento das raízes. O avanço das ferramentas digitais também têm permitido avaliar características como comprimento, diâmetro e arquitetura radicular com maior rapidez e detalhamento (Atkinson *et al*., 2019). Os autores destacam ainda o avanço de métodos automatizados de análise de imagens aplicados à fenotipagem radicular.

Os parâmetros obtidos nas análises de raízes também fornecem informações sobre a resposta das plantas às condições do solo. Alterações na profundidade, na densidade ou na distribuição das raízes podem estar associadas a limitações físicas, hídricas ou nutricionais que restringem o crescimento radicular (Bengough *et al*., 2011; Marschner, 2012). Dessa forma, a avaliação do sistema radicular pode auxiliar na identificação de condições desfavoráveis ao desenvolvimento das culturas e complementar as informações obtidas por outras análises do solo.

Do ponto de vista agronômico, as análises de raízes fornecem informações úteis para o manejo da fertilidade, da irrigação e do solo. O conhecimento da profundidade e da distribuição das raízes auxilia na compreensão da região do perfil efetivamente explorada pela cultura e pode orientar práticas relacionadas ao fornecimento de água e nutrientes. Além disso, características do sistema radicular permitem avaliar respostas das plantas a limitações físicas e químicas, contribuindo para a interpretação das condições de crescimento e para a tomada de decisões no manejo agrícola (Bengough *et al*., 2011; Lynch, 2019).

A avaliação radicular também apresenta aplicação no melhoramento de plantas. Em trigo, características relacionadas à maior exploração das camadas profundas do solo têm sido estudadas como estratégia para ampliar o aproveitamento da água armazenada no perfil em ambientes com restrição hídrica (Wasson *et al*., 2012). Em milho, York e Lynch (2015) observaram associações entre características da arquitetura das raízes nodais, o crescimento das plantas e a aquisição de nitrogênio, indicando que a fenotipagem radicular pode auxiliar na identificação de características de interesse para maior eficiência na aquisição de recursos.

De forma geral, os avanços tecnológicos na avaliação do sistema radicular têm ampliado a capacidade de compreender as relações entre as raízes e o ambiente de cultivo. A integração entre métodos tradicionais, técnicas de imagem e ferramentas computacionais permite avaliações mais detalhadas e pode contribuir para a seleção de plantas com características radiculares favoráveis à aquisição de água e nutrientes (Atkinson *et al*., 2019; Lynch, 2019).

Conclusão

A análise do sistema radicular constitui uma ferramenta fundamental para compreender as interações entre planta e solo, e auxiliar em práticas de manejo que promovam maior eficiência produtiva. As evidências da literatura indicam que atributos como arquitetura, profundidade, densidade e distribuição das raízes influenciam diretamente a absorção de água e nutrientes, a adaptação das plantas a estresses ambientais e a qualidade do solo. Embora os métodos destrutivos permaneçam relevantes pela elevada precisão, técnicas não destrutivas e ferramentas de análise digital têm ampliado a capacidade de monitoramento e caracterização do crescimento radicular. Dessa forma, a avaliação do sistema radicular fornece informações estratégicas para o manejo da fertilidade, da irrigação e da conservação do solo, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais eficientes, resilientes e sustentáveis.

Referências

ATKINSON, J. A.; POUND, M. P.; BENNETT, M. J.; WELLS, D. M. Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 55, p. 1-8, 2019. DOI: 10.1016/j.copbio.2018.06.002.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011. DOI: 10.1093/jxb/erq350.

GREGORY, P. J. **Plant Roots: Growth, Activity and Interaction with Soils**. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.

LYNCH, J. P. Root phenotypes for improved nutrient capture: an underexploited opportunity for global agriculture. **New Phytologist**, v. 223, n. 2, p. 548-564, 2019. DOI: 10.1111/nph.15738.

MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal Symbiosis**. 3. ed. London: Academic Press, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

WASSON, A. P.; RICHARDS, R. A.; CHATRATH, R.; MISRA, S. C.; SAI PRASAD, S. V.; REBETZKE, G. J.; KIRKEGAARD, J. A.; CHRISTOPHER, J.; WATT, M. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 9, p. 3485-3498, 2012. DOI: 10.1093/jxb/ers111.

YORK, L. M.; LYNCH, J. P. Intensive field phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root crowns identifies phenes and phene integration associated with plant growth and nitrogen acquisition. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 18, p. 5493-5505, 2015. DOI: 10.1093/jxb/erv241.

Agradecimentos

À Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Expressamos também nossa gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGAG/UFES), pelo apoio institucional e suporte ao desenvolvimento deste trabalho, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo à pesquisa e ao fortalecimento da produção científica.