

Limitações físicas do solo ao crescimento radicular de soja

Soil Physical limitations to soybean root elongation

RESUMO

Andressa Griebler Gusmão
andressagusmao@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Francisco Beltrão,
Paraná, Brasil

Moacir Tuzzin de Moraes
mtmoraes@professores.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Francisco Beltrão,
Paraná, Brasil

As limitações físicas dos solos impactam diretamente no crescimento radicular das culturas. O objetivo deste estudo foi realizar uma revisão sistemática, compilando e analisando os impactos das limitações físicas do solo (estresse hídrico, térmico e impedimento mecânico) na taxa de alongamento radicular da soja. Esta revisão seguiu os procedimentos do método PRISMA para seleção de artigos nas bases ScienceDirect, Web of Science e Google Scholar. Como critérios foram utilizados os termos “root elongation”, “soybean”, “Glycine max”, “matric potential”, “soil penetration resistance” e “soil temperature”. Estes procedimentos, resultaram em 8 artigos, os quais foram publicados entre 1983 e 2019. Os resultados indicam que a taxa de alongamento de soja é incrementada de forma quadrática devido ao aumento da temperatura do solo. A resistência do solo reduz exponencialmente o crescimento radicular, e 4 MPa foi suficiente para reduzir à 7% dos valores da condição sem impedimento. A taxa de alongamento radicular foi reduzida exponencialmente devido a redução do conteúdo de água do solo. Apesar do impedimento mecânico, da temperatura e o potencial hídrico serem fatores relevantes, existem poucos trabalhos com medições das respostas do alongamento radicular de soja às condições físicas dos solos.

PALAVRAS-CHAVE: Alongamento radicular. Resistência à penetração. Estresse hídrico.

ABSTRACT

Soil physical limitations affect directly the crop root elongation. The aim of this study was to carry out a systematic review, compiling and analyzing the impacts of the physical limitations of the soil (water stress, heat stress and soil strength) on the root elongation rate of soybean. Review procedures using the PRISMA Recommendation protocol was used to select scientific papers published in the ScienceDirect, Web of Science and Google Scholar databases. The terms "root elongation", "soybean", "Glycine max", "matric potential", "soil penetration resistance" and "soil temperature" were used as selection criteria. These procedures resulted in 8 papers, which were published between 1983 and 2019. The results indicate that the root elongation was increased due to the increase in soil temperature. Soil penetration resistance reduce exponentially the root elongation, and 4 MPa was sufficient to slow root elongation to approximately 7% of its unimpeded rate. The root elongation decreases exponentially due to the reduction of the water potential. Despite the soil strength, temperature and water potential are relevant factors that affect directly the soybean root elongation, but very few studies have published comparisons of the root responses to soil physical condition for soybean.

KEYWORDS: Soybean root growth. Soil penetration resistance. Water stress.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O Brasil, atualmente, é o maior produtor e exportador de soja no mundo, os cultivos dessa monocultura se estendem em torno de 35,8 milhões de hectares no território brasileiro (CONAB, 2020). A compactação da soja tem sido relatada como um frequente problema em áreas cultivadas em sistema plantio direto (MORAES et al., 2016). A profundidade das camadas compactadas do solo, influencia a resposta das plantas, e em áreas de sistema plantio direto, normalmente, estão localizadas entre 7 e 20 cm de profundidade (FRANCHINI et al., 2012). A principal causa da formação de camadas compactadas têm sido a ausência de sistemas de rotação de culturas (HAMZA; ANDERSON, 2005), uso de plantas com sistema radicular pouco abundante (GAO et al., 2016), qualidade e quantidade de resíduos culturais (BORDONAL et al., 2018), uso inadequado da escarificação mecânica do solo (NUNES et al., 2015) e ausência de práticas complementares de conservação do solo.

O crescimento da raiz de soja pode ser limitado por vários fatores, tais como, físicos, químicos e biológicos. Dentre as principais limitações do solo, do ponto de vista biológico, são os patógenos das plantas, já no ponto de vista da química do solo se destacam a deficiência ou toxicidade de elementos minerais (FOY, 1992). Entretanto, do ponto de vista da física do solo, os fatores que limitam diretamente o crescimento radicular são a temperatura (LICHT; AL-KAISI, 2005), a aeração (VALENTINE et al., 2012) a disponibilidade de água (BENGOUGH et al., 2011) e a resistência do solo (MORAES et al., 2018). Neste sentido, as limitações físicas ao crescimento das raízes são definidas como sendo o estresse térmico (falta ou excesso de calor no solo) (EYSHI REZAEI et al., 2015; STONE; TAYLOR, 1983), estresse hídrico (a quantidade mínima de água para crescimento da raiz) (BENGOUGH et al., 2011), a hipóxia ou anóxia (pouca ou nenhuma parcela de oxigênio) (TURNER et al., 1983) e a impedância mecânica (solo em que é muito difícil as raízes penetrarem rapidamente) (MORAES et al., 2020) são muitas vezes os responsáveis pelo crescimento radicular mal desenvolvido da soja.

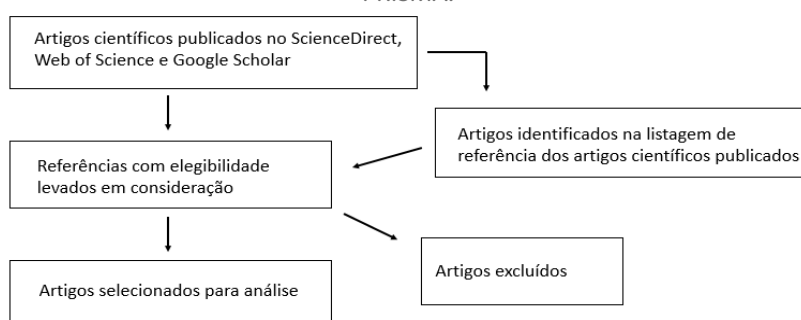
Considerando os impactos das limitações físicas do solo ao alongamento radicular, há necessidade de desenvolver trabalhos sobre as interações climáticas, o genótipo da soja e o seu manejo para observar o sistema de crescimento de suas raízes. No entanto, as limitações físicas são variáveis no tempo e espaço (BENJAMIN; NIELSEN, 2006), e assim, são necessários modelos físicos que possam ser aplicados em simulações de crescimento e desenvolvimento das culturas (SCHNEPF et al., 2020). Portanto, o aprofundamento do entendimento das limitações físicas dos solos (estresse mecânico, hídrico e térmico) deve ser usado para aperfeiçoar modelos de crescimento radicular para simular os ambientes de crescimento para as culturas, tais como a soja.

Considerando a importância e escassez de resultados referentes a trabalhos com estudos relacionados com as interações entre a taxa de alongamento radicular de soja e as limitações físicas do solo, torna-se de fundamental importância um trabalho de revisão sobre esta temática. Portanto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática das informações disponíveis sobre os impactos de limitações físicas na taxa de alongamento radicular de soja.

METODOLOGIA

Os procedimentos de revisão na literatura seguiram as recomendações apresentadas no método PRISMA “Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises” (MOHER et al., 2009), que objetiva reduzir problemas relacionados aos dados obtidos e aumentar a validade científica da revisão sistemática. Para tal, foram realizadas buscas por dados de diversas fontes, selecionado os artigos de texto avaliados por elegibilidade e posteriormente os estudos com síntese quantitativa foram incluídos como mostra a Figura 1 (GALVÃO; PANSANI; HARRAD, 2015).

Figura 1. Esquema de seleção de artigos para revisão sistemática, conforme método PRISMA.



Fonte: Autoria Própria (2020).

A pesquisa e seleção dos estudos incluíram artigos publicados online até agosto de 2020. Artigos científicos publicados em revistas indexadas nas bases de dados do ScienceDirect, Web of Science e Google Scholar foram consideradas para serem incluídas nesta seleção. Na pesquisa por artigos com termos em inglês foram considerados os seguintes: “root elongation”, “soybean”, “Glycine max”, “matric potential”, “soil penetration resistance”, “soil temperature”. Além disso, as listas de referência dos artigos selecionados foram verificadas, e se encontrado artigos não detectados nas buscas e se úteis para esta revisão sistemática, estes foram também incluídos nesta seleção. Portanto, os artigos selecionados e incluídos nesta revisão estão apresentados na Tabela 1.

Como procedimentos padrões para análise de taxa de alongamento radicular da soja, resumidamente define-se os métodos descritos por Valentine et al. (2012): Usualmente níveis de compactação (variação de resistência à penetração) e gradientes de umidade (potencial matricial) são construídos com amostras de solo, plântulas de soja com radícula de aproximadamente 2 cm de comprimento são transplantadas para o solo e cultivadas de 48 horas em ambiente com controle de temperatura e umidade. Após este período de crescimento as plântulas são cuidadosamente separadas do solo para determinação dos comprimentos radiculares das raízes principal e laterais e posteriores cálculos da taxa de alongamento radicular. O sistema radicular de cada plântula é digitalizado por meio de um escâner para quantificação do comprimento total radicular e do número de raízes laterais de primeira e segunda ordem. O comprimento total do sistema radicular é determinado por meio de processamento das imagens dos sistemas radiculares (usualmente no software Winrhizo (SMIT et al., 2000)).

Os estresses hídricos, mecânicos e térmicos dos solos são determinados por meio de quantificação dos valores de potenciais matriciais, resistência mecânica e

temperatura do solo, respectivamente. Os intervalos de resistência do solo à penetração se faz normalmente pela compressão das amostras de solo em diferentes níveis de compactação. Dentre os métodos utilizados para quantificação da resistência mecânica do solo, utiliza-se penetrômetros de bancada (MORAES et al., 2014). A variação de intervalos para quantificar os estresses térmicos, são realizados por meio da alteração do ambiente de crescimento das plântulas em câmaras de crescimento com controle de temperatura e umidade do ar (STONE; TAYLOR, 1983). A variação de potenciais hídricos podem ser realizados por meio da alteração do conteúdo de água do solo (potencial matricial), e ou pelo uso de sais (por exemplo, solução de CaCl_2 e $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) para ajustes de intervalos de potenciais osmóticos em vermiculita para o crescimento das plântulas (YAMAGUCHI et al., 2010).

Tabela 1. Artigos científicos utilizado na revisão literária.

Referências	Resistência à penetração (kPa)	Potencial hídrico (matricial ou osmótico) (kPa)	Temperatura (°C)	Meio de Crescimento
Stone e Taylor (1983)	500	-10	17 a 29	Vermiculita
Manavalan et al. (2010)	1500	-10	27	Solo arenoso
Materchera et al. (1991)	500 e 4000	-10	20	Solo arenoso
Kaspar et al. (1984)	1000	-10	Nd	Vermiculita
Yamaguchi et al. (2010)	Nd	-50 a -1600	29	Vermiculita
Chichanoski et al. (2019)	sem resistência	0;-400;-800;-1200	25	Papel Filtro com solução salina (KCl)
Soares et al. (2015)	sem resistência	0;-300;-600;-900;-1200	25	Papel Filtro com solução salina (Manitol e NaCl)
Viçosi et al. (2017)	sem resistência	0;-600;-1200;-1800;-2400	25	Papel Filtro com solução salina de Manitol ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$)

nd: não determinado. Fonte: Autoria própria (2020).

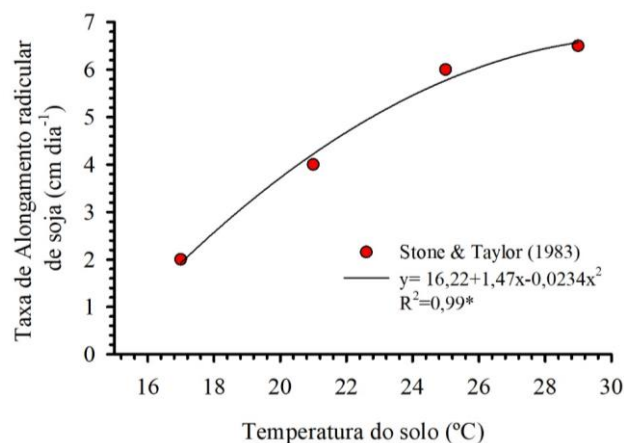
RESULTADOS E DISCUSSÕES

A temperatura do solo é um dos fatores físicos que afeta diretamente a taxa e a profundidade que o sistema radicular da planta se desenvolve no perfil do solo. Conforme apresentado na Figura 2, pode-se observar que nos experimentos de Stone (STONE; TAYLOR, 1983), a taxa de alongamento radicular da soja depende diretamente da temperatura do solo. Neste experimento, sobre o impacto da temperatura do solo no crescimento radicular de soja, plântulas de soja foram cultivadas em ambiente sem limitações de resistência à penetração e potencial hídrico, e quanto maior a temperatura no solo, maiores foram as taxas de alongamento radicular da soja (Figura 2). Uma variação de 12 °C possibilitou incrementos em até 4,5 cm dia⁻¹ na taxa de alongamento radicular. Dessa forma, a temperatura é fator de suma importância para o desenvolvimento da soja, o

controle desse fator agroclimatológico contribui para o adequado crescimento e desenvolvimento desta cultura.

O crescimento do sistema radicular é uma função resultante dos processos de divisão e expansão celular, os quais são dependentes de variáveis tais como a temperatura, a disponibilidade de oxigênio, de água e de nutrientes. Sendo assim, a temperatura do solo afeta o crescimento dos componentes do sistema radicular, iniciação e ramificação, orientação e direção do crescimento e renovação da raiz (KASPAR; BLAND, 1992). O alongamento adequado da raiz é importante para o aprofundamento do sistema radicular no perfil do solo, e por consequência captação de água e nutrientes para o crescimento e desenvolvimento da planta, especialmente no solo onde os recursos de água e nutrientes são escassos (BENGOUGH et al., 2011).

Figura 2. Impacto da temperatura do solo na taxa de alongamento radicular de soja.



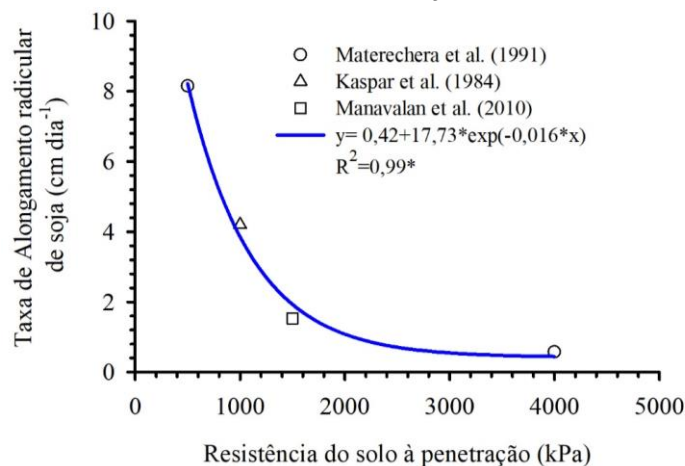
Fonte: Adaptado de Stone e Taylor (1983).

Outro fator físico limitante ao crescimento e desenvolvimento radicular da soja é o impedimento mecânico (BENGOUGH et al., 2011), o qual pode ser mensurado por meio de valores de resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2014). Na figura 3 foram apresentados dados de experimentos científicos que mostram a relação exponencial entre algumas limitações físicas no solo, nela é possível observar que com um mesmo potencial matricial, quanto maior a resistência do solo, menor vai ser a taxa de alongamento radicular da soja. A redução exponencial na taxa de alongamento radicular em relação a resistência do solo à penetração indica que os valores de 3000 kPa reduzem o crescimento radicular de soja em 7 cm dia⁻¹ em relação a condição sem impedimento mecânico. Estas relações consideram crescimento radicular de soja em condição de solo reestruturado em cilindros, ou seja, representa condições similares ao sistema de preparo convencional. Entretanto, em sistemas modernos de conservação do solo, tais como o sistema plantio direto há formação e preservação de bioporos e poros contínuos no perfil solo, os quais podem ser usados como rotas para crescimento radicular com baixos níveis de impedimento mecânico ao alongamento radicular (JIN et al., 2013; MORAES et al., 2018, 2020). Portanto, para estas condições ainda são necessários realização de estudos de medição e modelagem para quantificação dos efeitos de bioporos no alongamento radicular da soja. Desta forma, principalmente para a cultura da soja, os avanços do uso de sistemas conservacionistas, tais como o sistema plantio direto, tem alterado a estruturação

dos solos (MORAES et al., 2016), o que impacta diretamente nas medições de resistência mecânica do solo à penetração, devido a presença de bioporos no perfil do solo (MORAES et al., 2017; MORAES et al., 2014).

A compactação do solo, como resultado do aumento da densidade dos solos, causa redução do espaço poroso ocupado por ar, promovendo reduções nos fluxos de ar e alterações na difusividade de oxigênio (HAMZA; ANDERSON, 2005). Além disso, como consequências da compactação do solo, há reduções nas taxas de infiltração e de fluxos de água no solo (CHERUBIN et al., 2016), incrementando os riscos de erosão do solo (GOMES et al., 2019; MERTEN; MINELLA, 2013). Assim, solos fisicamente degradados limitam o crescimento radicular (OTTO et al., 2011; SOUZA et al., 2014) o acesso à água e nutrientes (HEINEN; MOLLIER; DE WILLIGEN, 2003), e consequentemente, reduzem a produtividade das culturas (AGUILERA ESTEBAN et al., 2019; GALVÃO; PANSANI; HARRAD, 2015; SOUZA et al., 2014).

Figura 3. Impacto da resistência mecânica do solo à penetração na taxa de alongamento radicular de soja.

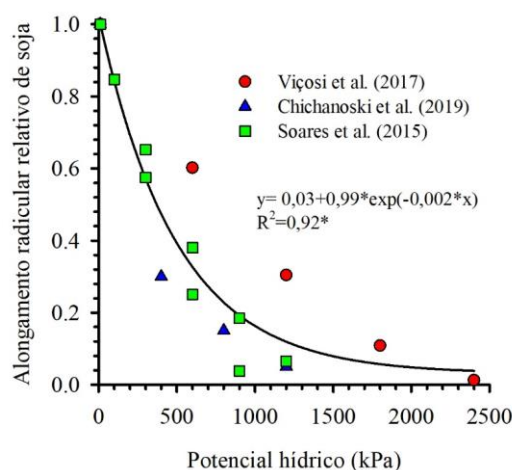


Fonte: Adaptado de Materechera et al. (1991), Kaspar et al. (1984) e Manavalan et al. (2010).

O potencial hídrico, também é considerado um fator físico que influencia diretamente o crescimento radicular (LETEY J., 1985), pois este mensura a disponibilidade de água e de oxigênio no solo. Nas limitações físicas do crescimento das raízes, à medida que o solo seca, as forças capilares tornam o potencial matricial mais negativo, fazendo com que a força que a água é retida na matriz do solo aumente rapidamente (WHALLEY et al., 2005; WHITMORE; WHALLEY, 2009). Esse efeito pode se tornar ainda maior com o aumento de compactação do solo, causado, por exemplo, pelo tráfego de máquinas agrícolas, resultando em redução do tamanho dos poros do solo, o que dificulta o crescimento das raízes (BENGOUGH, 2006; DA SILVA; KAY; PERFECT, 1994). Assim, a taxa de alongamento radicular é reduzida exponencialmente em função do potencial hídrico (Figura 4), por exemplo, a redução do potencial hídrico de zero para -500 kPa favoreceu redução da taxa relativa de alongamento radicular da cultura da soja em 60%. Portanto, a redução do conteúdo de água do solo, mensurado pelo potencial hídrico, induz limitações físicas ao crescimento radicular e por consequência restringe o aprofundamento radicular para absorção de água e nutrientes no perfil do solo.

As características de distribuição do tamanho de poros no perfil do solo (BHATTACHARYYA et al., 2006) são fatores importantes pois além de impactar diretamente na resistência do solo à penetração das raízes (BODNER; LEITNER; KAUL, 2014) influenciam diretamente com o fluxo de água no solo, grau de saturação do solo, e permeabilidade dos solos à água e ao ar (PIRES et al., 2008). Uma maior infiltração está diretamente relacionada a permeabilidade do solo, ou seja, na continuidade e tamanho dos poros presentes no solo (SOUZA; ALVES, 2003).

Figura 4. Impacto do potencial hídrico (osmótico e matricial) na taxa de alongamento radicular de soja (expresso em relação ao controle sem estresse).



Fonte: Adaptado de Chichanoski et al. (2019), Soares et al. (2015) e Viçosi et al. (2017).

Dessa forma, a absorção de água pelas raízes em condições de estresse hídrico pode ser otimizada por meio do (i) rápido aprofundamento radicular (GAO et al., 2016), (ii) aumento da profundidade efetiva do sistema radicular (FAN et al., 2016), e (iii) aumento da densidade radicular (BODNER; NAKHFOROOSH; KAUL, 2015). Portanto, a presença de bioporos no perfil do solo pode aliviar os estresses mecânicos e hídricos ao alongamento radicular (BENGOUGH, 2012).

CONCLUSÕES

As quantificações das limitações físicas do solo para o crescimento radicular podem ser realizadas por meio do potencial hídrico, que mensura a disponibilidade de água e de ar no solo, da resistência do solo à penetração, a qual está relacionada com os impedimentos mecânicos e compactação do solo, além disso, com a medição da temperatura do solo é possível identificar os processos de fluxos de calor no solo, os quais interferem nas taxas de alongamento radicular da soja.

Apesar do impedimento mecânico, da temperatura e o potencial matricial serem fatores muito relevantes no crescimento radicular da soja, na literatura não se tem muitos trabalhos que apresentam medições dessas limitações físicas ao alongamento radicular de soja. Portanto, novos estudos são necessários, principalmente devido a evolução dos sistemas produtivos, por exemplo, o sistema plantio direto, no qual a preservação de bioporos e poros contínuos no perfil do solo, reduz o impacto das limitações físicas dos solos ao alongamento radicular da soja.

REFERÊNCIAS

AGUILERA ESTEBAN, D. A. et al. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 187, n. October 2018, p. 60–71, 2019.

BENGOUGH, A. G. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 437–447, 19 set. 2006.

BENGOUGH, A. G. et al. 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.

BENGOUGH, A. G. Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: So what happens in field soil? **Plant and Soil**, v. 360, n. 1–2, p. 15–18, 2012.

BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. **Field Crops Research**, v. 97, n. 2–3, p. 248–253, 2006.

BHATTACHARYYA, R. et al. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. **Soil and Tillage Research**, v. 86, n. 2, p. 129–140, 2006.

BODNER, G.; LEITNER, D.; KAUL, H. P. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. **Plant and Soil**, v. 380, n. 1, p. 133–151, 2014.

BODNER, G.; NAKHFOROOSH, A.; KAUL, H. P. Management of crop water under drought: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 2, p. 401–442, 2015.

BORDONAL, R. DE O. et al. Sugarcane yield and soil carbon response to straw removal in south-central Brazil. **Geoderma**, v. 328, n. March 2018, p. 79–90, 2018.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, n. 2016, p. 156–168, 2016.

CHICHANOSKI, C. et al. Physiological potential of soybean seeds under hypoxia and salinity stress. **Científica**, v. 47, n. 2, p. 210, 4 jun. 2019.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira 2019/2020. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2019/2020**, p. 1–29, 2020.

DA SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 6, p. 1775, 1994.

EYSHI REZAEI, E. et al. Heat stress in cereals: Mechanisms and modelling. **European Journal of Agronomy**, v. 64, p. 98–113, 2015.

FAN, J. et al. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. **Field Crops Research**, v. 189, p. 68–74, mar. 2016.

FOY, C. D. **Limitations to Plant Root Growth**. New York, NY: Springer New York, 1992. v. 19

FRANCHINI, J. C. et al. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 137, p. 178–185, 2012.

GALVÃO, T. F.; PANSANI, T. DE S. A.; HARRAD, D. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 24, n. 2, p. 335–342, jun. 2015.

GAO, W. et al. Deep roots and soil structure. **Plant, Cell & Environment**, v. 39, n. 8, p. 1662–1668, ago. 2016a.

GOMES, T. F. et al. Runoff, soil loss, and sources of particulate organic carbon delivered to streams by sugarcane and riparian areas: An isotopic approach. **Catena**, v. 181, n. June, p. 104083, 2019.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005.

HEINEN, M.; MOLLIER, A.; DE WILLIGEN, P. Growth of a root system described as diffusion. II. Numerical model and application. **Plant and Soil**, v. 252, n. 2, p. 251–265, 2003.

JIN, K. et al. How do roots elongate in a structured soil? **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 15, p. 4761–4777, 2013.

KASPAR, T.C., BLAND, W. Soil temperature and root growth. **Soil Science**, v. 154, p. 290–299, 1992.

KASPAR, T. C.; TAYLOR, H. M.; SHIBLES, R. M. Taproot-Elongation Rates of Soybean Cultivars in the Glasshouse and Their Relation to Field Rooting Depth. **Crop Science**, v. 24, n. 5, p. 916–920, set. 1984.

LETEY J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277–294, 1985.

LICHT, M. A.; AL-KAISI, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, v. 80, n. 1–2, p. 233–249, 2005.

MANAVALAN, L. P. et al. Evaluation of diverse soybean germplasm for root growth and architecture. **Plant and Soil**, v. 330, n. 1, p. 503–514, 2010.

MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. **Plant and Soil**, v. 135, n. 1, p. 31–41, ago. 1991.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture: Soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 1, n. 3, p. 37–48, 2013.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, 2009.

MORAES, M. T. et al. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 170, p. 27–37, 2017.

MORAES, M. et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 351–362, jan. 2016.

MORAES, M. T. et al. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 179–193, 2014.

MORAES, M. T. et al. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. **Plant and Soil**, v. 428, n. 1–2, p. 67–92, 2018.

MORAES, M. T. et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, n. February, p. 104611, jun. 2020.

NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 119–126, 2015.

OTTO, R. et al. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 201–210, 2011.

PIRES, L. F. et al. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil and Tillage Research**, v. 100, n. 1–2, p. 72–77, 2008.

SCHNEPF, A. et al. Call for Participation: Collaborative Benchmarking of Functional-Structural Root Architecture Models. The Case of Root Water Uptake. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, n. 3, 2020.

SOARES, M. M. et al. Estresse hídrico e salino em sementes de soja classificadas em diferentes tamanhos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 4, p. 370–378, 2015.

SOUZA, G. S. DE et al. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 135–146, 2014.

SOUZA, Z. M. DE; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 18–23, 2003.

STONE, J. A.; TAYLOR, H. M. Temperature and the development of the taproot and lateral roots of four indeterminate soybean cultivars. **Agronomy Journal**, v. 75, n. 4, p. 613–618, 1983.

TURNER, F. T. et al. Soybean Seedling Response to Anaerobiosis. **Crop Science**, v. 23, n. 1, p. 40–44, jan. 1983.

VALENTINE, T. A. et al. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, v. 110, n. 2, p. 259–270, 2012.

VIÇOSI, K. A. et al. Estresse hídrico simulado em genótipos de feijão, milho e soja. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 4, n. 5, p. 36–42, 20 dez. 2017.

WHALLEY, W. R. et al. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v. 84, n. 1, p. 18–27, 2005.

WHITMORE, A. P.; WHALLEY, W. R. Physical effects of soil drying on roots and crop growth. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2845–2857, 2009.