

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Perfil de extração de água do solo pela cultura de soja de alta e baixa
produtividade de grãos**

João Paulo de Sá Dantas

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2018**

João Paulo de Sá Dantas
Engenheiro Agrônomo

**Perfil de extração de água do solo pela cultura de soja de alta e baixa
produtividade de grãos**

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Sá, João Paulo Dantas de

Perfil de extração de água do solo pela cultura de soja de alta e baixa produtividade de grãos / João Paulo Dantas de Sá. - - Piracicaba, 2018.

59 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Glycine max* [L.] Merrill 2. Sistema radicular 3. Capacidade de armazenamento de água no solo I. Título

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 A cultura de soja.....	13
2.1.1 Exigência hídrica de soja.....	16
2.2 Deficiência hídrica	17
2.3 Evapotranspiração.....	17
2.4 Capacidade de água disponível no solo.....	18
2.5 Sistema radicular de soja.....	18
2.5.1 RESTRIÇÃO FÍSICA AO CRESCIMENTO RADICULAR.....	20
2.5.1.1 Resistência do solo ao crescimento radicular.....	20
2.5.1.2 Compactação e porosidade do solo	22
2.5.2 RESTRIÇÃO QUÍMICA AO CRESCIMENTO RADICULAR	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Local do experimento.....	29
3.1.1 Piracicaba (SP).....	30
3.1.2 Goiatuba (GO).....	30
3.2 Caracterização físico/química do solo e clima	31
3.3 Quantificação da evapotranspiração real de soja	32
3.3.1 Amostragem do conteúdo de água no solo.....	32
3.3.2 Cálculo da evapotranspiração real	34
3.3.3 Profundidade efetiva do sistema radicular de soja.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Caracterização do perfil do solo.....	37
4.2 Crescimento radicular	39
4.3 Evapotranspiração real	41
4.4 Profundidade efetiva do sistema radicular	45
4.5 Perfil de raiz e produtividade	48

5	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS	51

RESUMO

Perfil de extração de água do solo pela cultura de soja de alta e baixa produtividade de grãos

A soja no Brasil está entre as culturas agrícolas que apresentam crescimento mais expressivo em área de cultivo e na economia do país. O que se deve ao fato da cultura apresentar diversas finalidades desde a produção de biodiesel até consumo humano. Dentre os fatores que afetam a produtividade de soja, o déficit hídrico é tido como o principal. Desta forma, a absorção de água pelo sistema radicular não é capaz de suprir a evapotranspiração apenas com o regime pluviométrico durante o ciclo de soja, logo a planta depende da absorção de água disponível pelo solo, que é diretamente proporcional a profundidade do sistema radicular. Estudos realizados pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB) demonstraram que o sistema radicular de soja de alta produtividade se estende a profundidades superiores a 100 cm. Portanto, a hipótese deste trabalho é de que a absorção de água pela planta ocorre majoritariamente em profundidades superiores à de 15 cm para áreas de alta produtividade, associado a um solo sem restrição química, física ou biológica para o crescimento radicular. Assim, o objetivo desse trabalho foi determinar a profundidade efetiva do sistema radicular (80% da evapotranspiração real, ETr) de soja em duas áreas distintas de alta e baixa produtividade. O cálculo para quantificar a ETr baseia-se na quantidade de água presente no solo e massa específica do mesmo por camada. Para isso o solo foi saturado com água e após 24 horas foi realizada a coleta de amostras de solo indeformadas através de anéis volumétricos em 10 profundidades distintas do solo espaçadas a cada 10 cm (5 a 95 cm), a qual foi repetida após três dias, sem a ocorrência de irrigação ou chuva. A área de baixa produtividade estava localizada em Piracicaba, SP, caracterizada por Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, e a área de alta produtividade em Goiatuba-GO, sendo um Latossolo Vermelho eutrófico típico, ambos com textura médio-arenosa. Após a coleta das amostras, as mesmas foram pesadas e alocadas em estufas de ventilação forçada até atingir massa constante, determinando o conteúdo de água em cada amostra, e a partir da diferença entre os dois dias determinar o consumo hídrico total. Os resultados da análise química do solo demonstraram que a área de Piracicaba apresentava restrição química ao crescimento radicular pela alta concentração de alumínio abaixo de 40 cm profundidade, e pela resistência do solo a penetração, observando-se valores altos de compactação na camada entre 20 e 40 cm. Tais limitações não estavam presentes na área de Goiatuba. O sistema radicular obteve um crescimento mais expressivo em Goiatuba, tendo 175% e 188%, respectivamente, maior comprimento e área superficial que Piracicaba. A evapotranspiração real da cultura acumulada em três dias foi de 23,7 e 24,4 mm, respectivamente, para Goiatuba e Piracicaba, sendo que Goiatuba obteve o acumulado de 80% entre 70 e 80 cm de profundidade, enquanto que Piracicaba, esse acumulado ocorreu entre 10 e 20 cm. Na área de Goiatuba, a produtividade foi de 91 sc ha⁻¹, contra 61 sc ha⁻¹ na área de Piracicaba. Ademais, a ausência de restrição física e química no solo para crescimento radicular permitiu aumentar a capacidade de água disponível no solo para a planta, reduzindo as perdas de produtividade ocasionadas pelo déficit hídrico.

Palavras-chave: *Glycine max* [L.] Merrill; Crescimento radicular; Compactação do solo; Restrição química

ABSTRACT

Soil water extraction by soybean crop of high and low yield

Soybean is among the agricultural crops that show more expressive growth in the area of cultivation and economy in Brazil. This is because the crop has several purposes from the production of biodiesel to human consumption. Among the factors that affect soybean yield, the water deficit was considered the main one. Thus, the water uptake by the root system is not able to supply the evapotranspiration only using rainfall during the soybean cycle, this way, crop depends on the water uptake available in the soil, which is directly proportional to the root depth. Researches carried out by the Soybean Brazil Committee showed that the soybean root system extends below 100 cm of depth. Therefore, the work hypothesis is that the water uptake by the soybean occurs mainly in depths greater than 15 cm for the areas of high yield, associated with a soil without chemical, physical or biological restriction for root growth. This way, the aim of this research was quantify the effective root depth (80% of the actual crop evapotranspiration, ETr). The ETr was quantified based on the amount of water in the soil and its specific mass by layer. The soil was sutured with water and after 24 hours was made the soil samples in 10 different soil depths spaced every 10 cm (from 5 to 95 cm), which was replicated three days after the first one, without occurrence of irrigation or rainfall. The area of low yield was located in Piracicaba, SP, characterized by typical dystrophic Red-Yellow Latosol, and the area of high yield in Goiatuba, GO, being typical Eutrophic Red Latosol. The both soil were medium-sandy texture. The soil samples were weighed and allocated in forced ventilation greenhouses until reaching constant mass, determining the percentage of water and by the difference from day 0 and day 3 was quantified the total water uptake. The chemical soil analysis showed that the area in Piracicaba had restriction for root growth by high aluminum concentration below 40 cm, and also by high soil compaction between 20 e 40 cm. These limitations were not observed in the area of Goiatuba, which had 175% e 188%, respectively, more root length and superficial area than Piracicaba. The actual crop evapotranspiration accumulated in three days were 23.7 and 24.4 mm, respectively, for Goiatuba e Piracicaba, where the 80% accumulated was between 70 e 80 cm for Goiatuba, and 10 e 20 cm for Piracicaba. In Goiatuba, the yield was 91 sc ha⁻¹ against 61 sc ha⁻¹ in Piracicaba. Thus, the no chemical and physical restriction for the root growth helped to increase the water available for the crop, reducing the yield losses by water deficit.

Keywords: *Glycine max* [L.] Merrill; Root growth; Soil compaction; Chemical restriction

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Destino dos grãos de soja e planta verde no complexo soja expressa em porcentagem em relação a produção total de grão no Brasil em 2017. Fonte: ABIOVE (2017) 14
- Figura 2. Valor (milhões de dólares) da exportação do complexo soja no Brasil composto por grão, farelo e óleo. Fonte: ABIOVE (2017)..... 15
- Figura 3. Valor de pressão de resistência do solo (MPa) em relação a profundidade do solo em centímetros. Fonte: Adaptado de Cesb (2017). A resistência a penetração do solo foi medida em três áreas distintas de produção de soja expressas em produção de sacas por hectare (sc ha⁻¹), sendo a área de 120 sc ha⁻¹ representada como a de alta produtividade. 19
- Figura 4. Representação do sistema radicular de soja na profundidade de 3 metros com base no estágio fenológico da cultura..... 20
- Figura 5. Localização geográfica dos experimentos e densidade de cultivo de soja na safra 2015/16. Fonte: Adaptado do IBGE (2018)..... 29
- Figura 6. A imagem de satélite demonstra a delimitação da área experimental de 0,65 ha (preto) pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da Esalq/USP. Fonte: Google maps (2018). 30
- Figura 7. A imagem de satélite demonstra a delimitação da área experimental (preto) em Goiatuba (GO), pertencente à Fazenda Rancho Alegre. Fonte: Google maps (2018). 31
- Figura 8. Medição da profundidade da trincheira através da trena, para estratificação da profundidade e alocação dos anéis volumétricos para coleta de amostras do solo a cada 10 cm. 34
- Figura 9. Perfil de resistência do solo a penetração para área experimental em Piracicaba, SP, e em Goiatuba, GO. Escala de cores representam o efeito da resistência sobre o crescimento radicular, de menor (verde) para maior (vermelho) restrição (BENIE, 2013)..... 39
- Figura 10. Foto do perfil de crescimento radicular de plantas de soja em Piracicaba (SP) (a) e em Goiatuba (GO) (b) no estágio fenológico R_{5.1}..... 40

- Figura 11. Imagem obtida a partir do software INRISO para determinação do comprimento e da área superficial do sistema radicular de plantas de soja em Piracicaba (SP) (a) e em Goiatuba (GO) (b) no estágio fenológico R_{5.1}..... 41
- Figura 12. Temperatura do ar máxima (linha superior), média (linha intermediária) e mínima (linha inferior) durante a realização dos experimentos em Piracicaba (SP) e em Goiatuba (GO).
..... 42
- Figura 13. Evapotranspiração potencial da cultura de soja obtida a partir do coeficiente de cultivo e evapotranspiração de referência (Penman-Monteith) durante a realização dos experimentos em Piracicaba (SP) e em Goiatuba (GO). Setas indicam momento da semeadura, avaliação da evapotranspiração real (ET_r) e da colheita para Piracicaba (seta pontilhada preta) e Goiatuba (seta contínua cinza)..... 43
- Figura 14. Valores absolutos (mm) (a) e relativos (%) (b) de evapotranspiração real acumulada (linha pontilhada indica o ponto acumulado de 80%, enquanto que as setas indicam a profundidade em que esse valor foi atingido) por camada a partir da superfície entre os dias 0 e 3 para Piracicaba, SP, e Goiatuba, GO. 47

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Área semeada (milhões de hectares) e produção (milhões de toneladas) de soja no mundo, nos Estados Unidos e no Brasil (principais Estados produtores de soja) (USDA, 2018; CONAB, 2018)..... 16
- Tabela 2. Resultados da análise química de macronutrientes (P, K, Ca, Mg - $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ - e S - mg dm^{-3}), hidrogênio e alumínio ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), pH, capacidade de troca catiônica (CTC, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases (SB, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação por bases (V, %) e por alumínio (m, %) em diferentes profundidades (Z) do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico em Piracicaba (SP), e do Latossolo Vermelho eutrófico típico em Goiatuba (GO). 37
- Tabela 3. Teor de água no solo extraído entre dia 0 e dia 3 ($u_{\text{dia } 0} - u_{\text{dia } 3}$), massa específica do solo e evapotranspiração real da cultura (ETr) por camada de solo para Goiatuba (GO) e Piracicaba (SP). 44

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos mais importantes produtores de soja do mundo, onde a cultura é utilizada para vários fins, desde a produção de alimentos até à produção de biodiesel. Os níveis de produção de soja em diferentes regiões do país variam substancialmente, o que resulta em uma instabilidade de magnitude considerável. Em um período de 32 anos de análises de clima (1980-2011), os resultados mostraram que a maior parte das perdas de produção foi causada por deficiência hídrica (SENTELHAS et al., 2015).

A água é crucial na vida das plantas e frequentemente constitui um fator limitante básico na produção da cultura. Para o desenvolvimento correto, cada planta deve conseguir uma economia de água de modo que sua demanda seja equilibrada pela oferta disponível. O problema real é que a demanda evaporativa da atmosfera é geralmente contínua, e no entanto, o fornecimento de água por precipitação natural é apenas ocasional e irregular (RIGHES, 1980).

Para manter o fluxo da água nas plantas à atmosfera, a planta utiliza as reservas de água armazenadas no perfil do solo e na maioria das vezes isso não é possível, devido aos impedimentos de caráter físico, químico ou biológico que impedem o desenvolvimento radicular e que cada vez estão se tornando mais comuns nos sistemas de produção. Uma vez que a maior parte da água necessária é absorvida pelas raízes, a sua distribuição no perfil e capacidade de obter essa água em condições de instabilidade climática é decisiva para o máximo potencial produtivo (BATTISTI; SENTELHAS, 2017).

Da totalidade do sistema radicular de soja, estima-se que 70 a 80% da massa das raízes de soja distribuem-se nos primeiros 15 cm do solo, em condições normais de cultivo (GREGORY, 1992), porém os trabalhos realizados recentemente, pelo Comitê Estratégico de Soja Brasil (CESB), mostram que nas áreas de máxima produtividade o sistema radicular ultrapassou a camada de 100 cm (SAKO et al., 2016a). Essa relação da produtividade e crescimento radicular deve ser esclarecida de forma que possa afirmar se realmente a água do perfil, em que há presença de raiz, é aproveitada pelas plantas e em que quantidades isso acontece.

Qualquer tentativa de controlar a quantidade e disponibilidade da água do solo para as plantas deve-se basear numa compreensão profunda do conhecimento quantitativo do equilíbrio dinâmico da água no solo. Cada planta tem sua própria capacidade de extrair água em uma dada condição por outro lado, cada solo tem suas próprias características hidráulicas em um

determinado potencial de água. Muitas destas questões ainda precisam ser respondidas no que diz respeito ao sistema solo-água-planta-atmosfera e principalmente na profundidade máxima efetiva do sistema radicular que corresponde a maior parte da evapotranspiração.

Este trabalho foi desenvolvido com base na hipótese de que a absorção de água pelo sistema radicular de soja ocorre em grandes quantidades em camadas mais profundas, desde que não haja nenhum tipo de restrição química, física ou biológica para o crescimento radicular, levando a planta a expressar melhor seu potencial produtivo.

Assim, o objetivo do presente estudo foi determinar a profundidade efetiva do sistema radicular (correspondente à profundidade do solo que contribui com ETr acumulada de 80%) e avaliar a influência da compactação e do teor de alumínio no crescimento radicular e na absorção de água pelo sistema radicular de soja para diferentes profundidades dois solos de produtividade de soja contrastantes: (i) Latossolo Vermelho eutrófico típico de alta produtividade em Goiatuba (GO), e (ii) Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de baixa produtividade em Piracicaba (SP).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura de soja

A soja cultivada (*Glycine max* [L.] Merrill) tem como origem a região nordeste da China há mais de cinco milênios, de onde foi levada para o sul da China, Japão e sudeste da Ásia. Foi apenas em 1982 que a leguminosa foi relatada na Bahia, introduzida posteriormente, em 1908, por imigrantes japoneses no Estado de São Paulo. Todavia, foi em 1935, no estado do Rio Grande do Sul, dada as condições climáticas semelhantes a região de origem que a soja encontrou circunstâncias favoráveis para o desenvolvimento. Em 1950 a soja já era cultivada no Sudeste, Nordeste e Norte brasileiro. Ademais, na década de 70 consolidou-se no Cerrado e, o Brasil alcançou o segundo lugar no *rank* de maior produtor mundial de soja (SEDIYAMA et al., 2015).

A produção de soja está entre as atividades econômicas que apresentam, nacionalmente, crescimentos mais expressivos. Devido a estruturação e demanda do mercado internacional, isso pode ser atribuído a diversos fatores, dentre os quais: desenvolvimento e estruturação de um sólido mercado internacional; importância da oleaginosa como fonte de proteína vegetal, demandas de produtos de origem animal e, geração e oferta de tecnologias na cadeia da cultura. Logo, a versatilidade da cultura foi crucial para estabelecer-se e expandir (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014).

A composição do grão de soja varia com o tipo de cultivar, localização geográfica, condições ambientais e época de plantio. A constituição química do grão de cultivares brasileiros pode ser descrita como: 40 % de proteínas, 20% de óleo 35% os carboidratos e 5% de fibras (POYSA; WOODROW, 2002; SEDIYAMA et al., 2015).

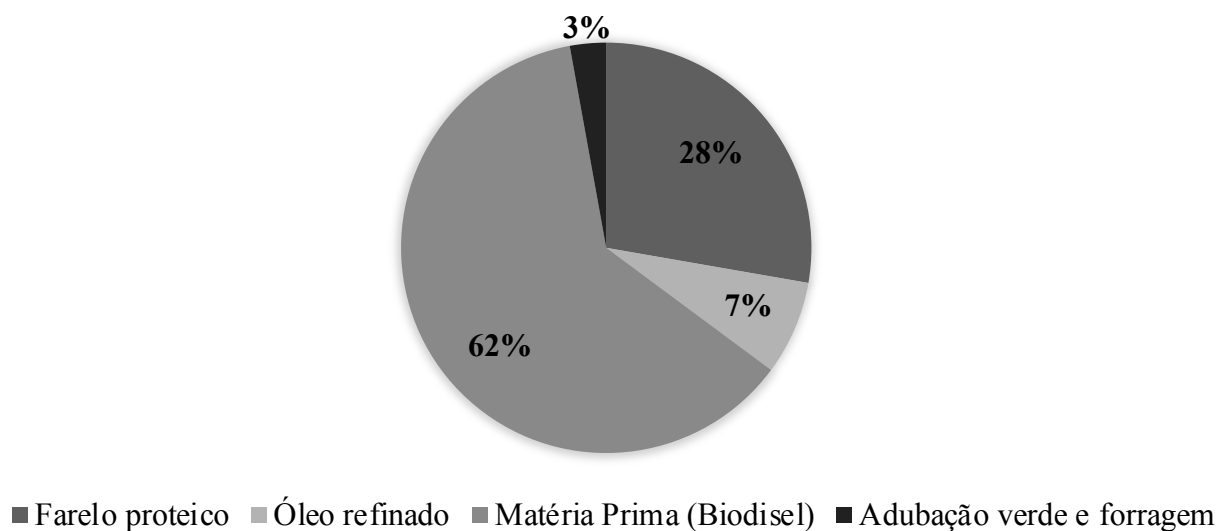


Figura 1. Destino dos grãos de soja e planta verde no complexo soja expressa em porcentagem em relação a produção total de grão no Brasil em 2017. Fonte: ABIOVE (2017)

A composição química do grão determina traz diversas finalidades para planta de soja, como matéria prima, adubação verde e forrageira, alimentação humana e animal, através da extração de óleo ou fonte de farelo proteico (Figura 1). Como exemplo: a soja representa entre 60 a 65% da matéria prima para a produção de biodiesel no Brasil. Do mesmo modo, representa a principal fonte de farelo proteico do mundo logo, devido à versatilidade de uso, alta qualidade proteica e baixo custo relativo de produção, a cultura ganhou espaço do cenário internacional. (SILVA et al., 2006; SEDIYAMA et al., 2015, ABIOVE, 2017).

Do ponto de vista econômico a cadeia produtiva de soja brasileiro exportou 31,72 milhões de dólares em 2017, o que representa 11,88% do valor total da exportação brasileira em 2017. Considerando o capital total de exportação da cadeia produtiva de soja (Figura 2), tem-se que 81% é referente a soja grão, 15,7 % farelo de soja e, 3,25% óleo de soja (ABIOVE, 2018).

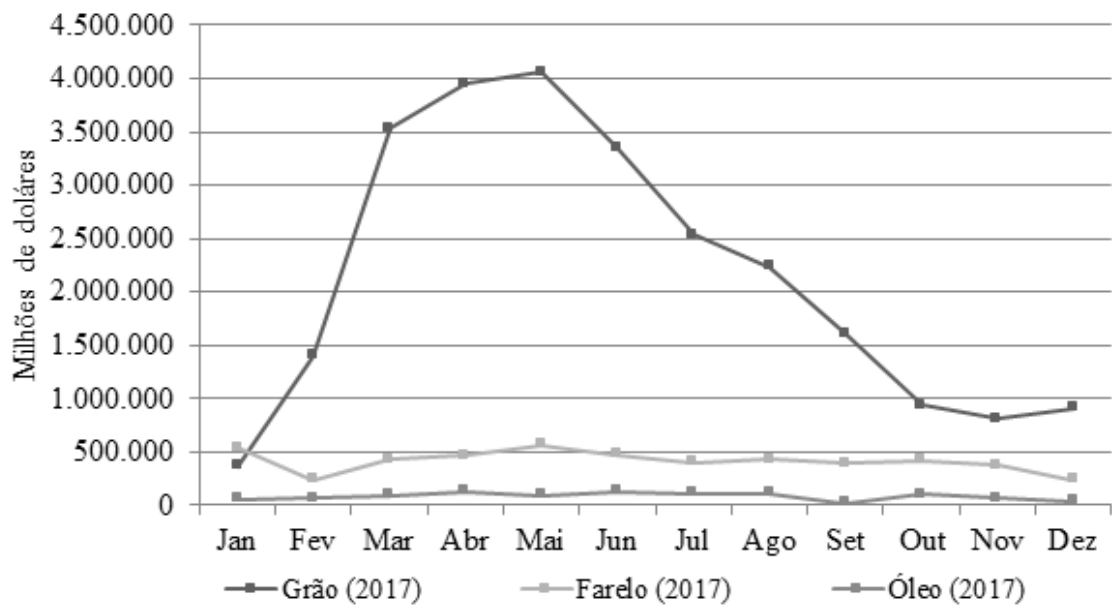


Figura 2. Valor (milhões de dólares) da exportação do complexo soja no Brasil composto por grão, farelo e óleo. Fonte: ABIOVE (2017).

Com relação a produção total, os Estados Unidos da América é o país que apresenta maior produtividade, seguido do Brasil. A representação da produção de soja do Brasil somada a dos Estados Unidos equivaleu a 65% da produção mundial do grão em 2017 (Tabela 1). No Brasil, o Estado que representa a maior produção nacional é Mato Grosso, seguido do Rio Grande do Sul, Paraná, Goiás e Mato Grosso do Sul (USDA, 2018; CONAB, 2018).

Tabela 1. Área semeada (milhões de hectares) e produção (milhões de toneladas) de soja no mundo, nos Estados Unidos e no Brasil (principais Estados produtores de soja) (USDA, 2018; CONAB, 2018).

Produção de soja	Área semeada (milhões de hectares)	Produção (milhões de toneladas)
Mundial	120,958	351,311
Estados Unidos da América	33,482	117,208
Brasil	33,890	114,0
Mato Grosso	9,322	30,5
Paraná	5,249	19,6
Mato Grosso do Sul	2,522	8,5
Goiás	3,278	10,8
Rio Grande do Sul	5,569	18,7

2.1.1 Exigência hídrica de soja

A água é responsável por 90% do peso da planta, além de ter a função de solvente de nutrientes e gases, está presente, direta ou indiretamente, em todos os processos fisiológicos e bioquímicos da planta como balanço energético, fotossíntese, respiração, turgescência e, meio de transporte de gametas. Bem como a regulação térmica da planta através do resfriamento e na distribuição do calor (EMBRAPA, 2013)

A necessidade total de água pela cultura varia entre 450 a 800 mm ciclo⁻¹ para alcance do máximo rendimento, de acordo com o cultivar, manejo cultural e condições climáticas para o cultivo (FARIAS et al., 2009). Embora a precipitação total anual no Brasil seja suficiente para o cultivo de soja, pode ocorrer a deficiência de água dada algumas semanas sem chuvas no meio do período de crescimento em um determinado local (BATTISTI et al., 2018). As deficiências hídricas provocam diminuição da taxa de crescimento, atividade de fotossíntese e fixação de nitrogênio da planta (SINCLAIR et al., 2007). A maior parte das perdas de produção de soja podem ser ocasionadas por deficiência hídrica (FLOSS, 2008; OYA et al., 2008; EMBRAPA, 2013; SENDELHAS; BATISTTI, 2015).

2.2 Deficiência hídrica

A deficiência hídrica pode ser descrita como a taxa de transpiração da cultura excedente a taxa de absorção e transporte de água na planta. A taxa de absorção é determinada pelos fatores como a disponibilidade de água no solo, pois quanto menor o conteúdo de água no solo mais difícil é a extração pela cultura, e a capacidade da cultura em explorar o solo com as raízes, definindo a habilidade da cultura em utilizar a água armazenada no solo. Em um cenário de limitação de água no solo, as raízes enviam sinais para os estômatos para reduzir o consumo hídrico e, conseqüentemente, reduzindo o metabolismo e impactando a produtividade (SINCLAIR; LUDLOW, 1986; CARLESSO, 1995; MARTINS et al., 2008).

A melhor época de plantio para soja com as temperaturas do ar entre 20°C e 30°C; a temperatura ideal para o desenvolvimento em 30°C. Na região Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil a janela de plantio mais adequada compreende os meses de outubro a novembro e, a colheita nos meses de janeiro a março. Os meses referentes a condução da cultura em campo são suscetíveis à deficiência hídrica, pois a evapotranspiração da cultura de soja é maior que o volume pluviométrico (EMBRAPA 2013; FATTORI JÚNIOR et al., 2017), principalmente no período reprodutivo (FIETZ; RANGEL, 2008).

2.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração pode ser definida pela água perdida por uma superfície coberta com vegetação por meio da evaporação direta da superfície do solo acrescida da água liberada na transpiração das plantas (JESSEN et al., 1971; SMITH, 1991). Thornthwaite (1948) implementou o termo evapotranspiração potencial (ETp) que consiste na água utilizada por uma área vegetada extensa, em crescimento ativo e cobrindo totalmente a superfície do terreno, em condições ótimas de umidade do solo, área vegetada padrão definida por Penman (1956) como sendo a grama. Já Allen et al. (1998) padronizaram a definição da evapotranspiração de referência (ETo), que se refere à perda de água do solo e pelas plantas (transpiração) que ocorre em uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, poder refletor de 23% e resistência difusiva do dossel ao transporte de vapor de água de 69 s m^{-1} . Thornthwaite (1948) também conceituou a evapotranspiração real (ETr), referente à perda de água que ocorre em uma determinada superfície vegetada, sem imposição de qualquer condição de contorno como o porte da vegetação e teor de água do solo.

Outro fator que altera a evapotranspiração são os estádios fenológicos das culturas, bem como a ocupação das mesmas na área disponível. Por este motivo caracterizou-se a

evapotranspiração potencial da cultura (ETc), como sendo a demanda de água a ser resposta ao solo para manter a produtividade da cultura em condições ideais. Para determinação da ETc, leva-se em consideração as condições meteorológicas, características da planta, como controle estomático, e principalmente, o índice de área foliar (COELHO FILHO et al., 2011). Em muitos casos no Brasil, quando comparado a evapotranspiração potencial da cultura de soja (ETc) com o volume pluviométrico durante o seu ciclo, a ETc é superior à água ofertada pela precipitação pluviométrica, indicando a necessidade da cultura em absorver a água disponível e armazenada no solo (FIETZ; RANGEL, 2008; FATTORI JÚNIOR et al., 2017).

2.4 Capacidade de água disponível no solo

Como água advinda da precipitação não é suficiente para manter a evapotranspiração durante o ciclo de soja, a planta utiliza a água disponível e armazenada no perfil de solo. A capacidade de água disponível no solo proposta por Veihmeyer e Hendrickson (1927; 1931; 1949) indica a capacidade de um solo em armazenar e disponibilizar esta água para raízes e, é definido como o teor de água no solo entre um limite superior, denominada capacidade de campo e um limite inferior ou, denominado de ponto de murcha permanente. A massa específica (Dg , $g\ cm^{-3}$) do solo e profundidade efetiva do sistema radicular (Zr , cm) são levados em consideração, fazendo com que quanto maior o comprimento radicular, maior tende a ser a capacidade de água disponível para a planta (CAD , mm) e, a ocorrência de falta de água para a planta tende a reduzir (SILVA et al., 2014). Para o cálculo da capacidade de água disponível (CAD , mm), pode-se utilizar a seguinte equação (Equação 1):

$$CAD = \left[\frac{(CC - PMP)}{10} \right] \cdot \frac{Dg}{Da} \cdot Zr \quad (1)$$

em que CC se refere ao teor de água correspondente à capacidade de campo em porcentagem (%); PMP ao teor de água correspondente ao ponto de murcha permanente em porcentagem; Dg à massa específica do solo ($g\ cm^{-3}$); Da à massa específica da água ($g\ cm^{-3}$); e Zr à profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

2.5 Sistema radicular de soja

O crescimento radicular reflete das adaptações da planta as exigências impostas pelas exigências ambientais, e é tido como umas das principais alternativas de redução de déficit hídrico (SINCLAIR et al., 2010). Desta forma, a absorção de água e nutrientes se relaciona diretamente com a habilidade da planta em desenvolver um sistema radicular extenso e capaz

de explorar eficientemente o solo, tido como ambiente heterogêneo e cheio de obstáculos como a compactação e porosidade (TAIZ; ZEIGER, 2017).

Os primeiros trabalhos de caracterização do sistema radicular de soja mostram que em sistemas ausentes de irrigação, 67% da massa radicular localiza-se nos primeiros 30 cm do solo, 16 % entre 30 e 90 cm, e 17% abaixo dos 90 cm. Já em sistemas irrigados a percentagem de massa radicular nos primeiros 30 cm corresponde a 71%, 21% de 30 a 90 cm e, 9% da massa radicular abaixo de 90%. Logo, o aprofundamento do sistema radicular é extremamente importante para o suprimento hídrico da cultura em condições de sequeiro, principal forma de cultivo no Brasil (RAPER; BARBER, 1970; MITCHELL; RUSSEL, 1971; STONE et al., 1976).

Estudos mais recentes desenvolvidos pelo Cesb (2017) mostram que em áreas de cultivo de soja de altas produtividades (maiores que 80 sacas por hectare), apresentam crescimento do sistema radicular de soja a profundidade maior que 100 cm no perfil do solo, devido a menor resistência do solo ao crescimento radicular (Figura 3).

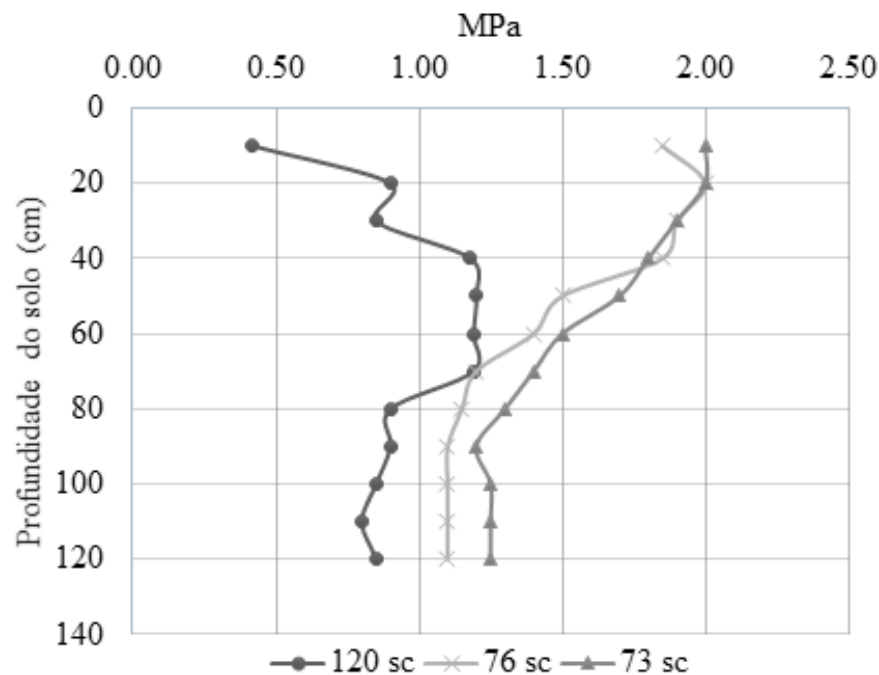


Figura 3. Valor de pressão de resistência do solo (MPa) em relação a profundidade do solo em centímetros. Fonte: Adaptado de Cesb (2017). A resistência a penetração do solo foi medida em três áreas distintas de produção de soja expressas em produção de sacas por hectare (sc ha⁻¹), sendo a área de 120 sc ha⁻¹ representada como a de alta produtividade.

Além da resistência do solo a penetração, fatores como o conteúdo de água disponível no solo, taxa de difusão do oxigênio, temperatura, resistência mecânica do solo ao alongamento celular e, concentração de nutrientes afetam o crescimento radicular (EMBRAPA, 2013; MORAES et al., 2018). Todos estes fatores encontram-se distribuídos heterogeneamente no solo e um favorecimento para um maior crescimento do sistema radicular permite a planta explorar mais recursos, como água e nutrientes (LYNCH, 1995; PIVETA, 2011). Tal condição de crescimento ótimo é apresentada na Figura 4, em que o sistema radicular de soja alcança 2 metros de profundidade no início do período reprodutivo (R₁) e 3 metros no momento de enchimento de grão (R₅), em que há máxima demanda hídrica.

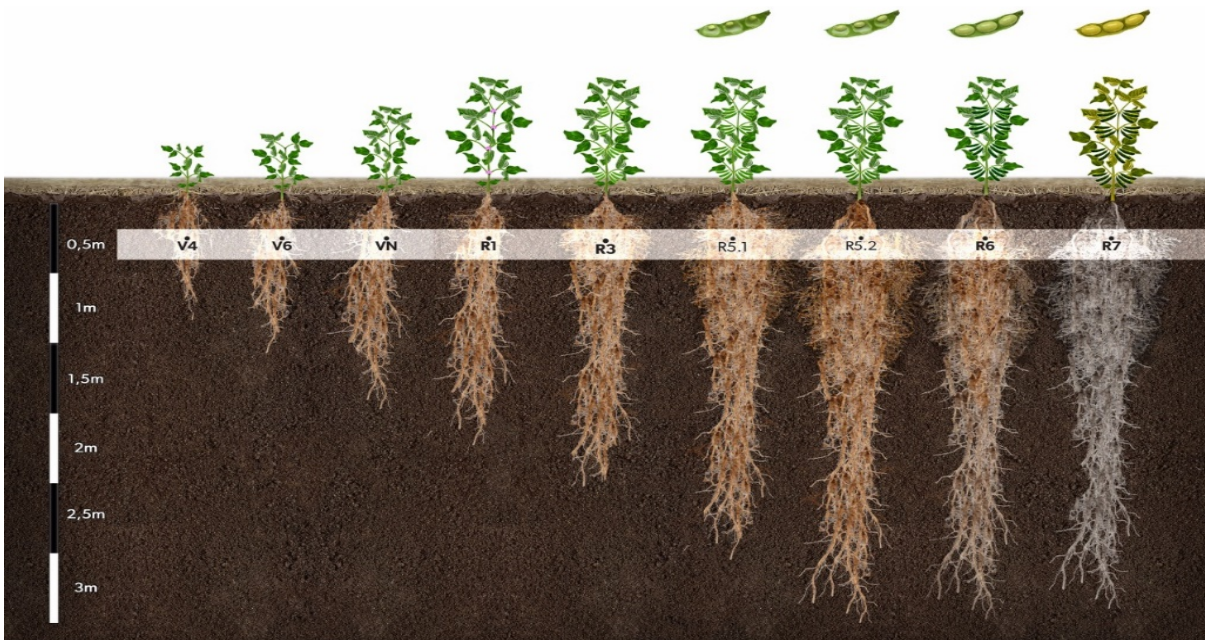


Figura 4. Representação do sistema radicular de soja na profundidade de 3 metros com base no estágio fenológico da cultura.

2.5.1 Restrição física ao crescimento radicular

2.5.1.1 Resistência do solo ao crescimento radicular

O crescimento radicular só ocorre quando a pressão de crescimento imposta pelas raízes for maior que a resistência mecânica do solo à penetração (PASSIOURA, 1991). Tormena et al. (1998) e Silva et al. (2002) concluíram que aos valores acima de 2.000 kPa de resistência à penetração do solo apresentam impedimento no crescimento radicular para cultura agrícola, o que limitou a produtividade, conforme observado na Figura 4. Contudo a capacidade de crescimento radicular em solos compactados é diferente entre as plantas. Desta forma, Foloni

(2006) constatou que a soja é mais sensível a compactação quando comparado aos adubos verdes: mucuna preta, crotalária e feijão, os quais podem ser utilizados para redução da compactação do solo.

Valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular (IIJIMA; KONO, 1991). De acordo com Materechera et al. (1992), a compactação do solo pode promover o engrossamento das raízes em razão de mudanças morfológicas e fisiológicas do sistema radicular, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem. Relatado por Russel e Goss (1974), o aumento da resistência mecânica do solo à penetração pode estimular a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas e capazes de crescer em poros do solo de diâmetro reduzido.

A pressão de crescimento exercida pelas raízes está relacionada com o turgor das células do meristema radicular e da área de contato com o solo. Portanto a pressão aumenta com o aumento do diâmetro radicular, com isso o engrossamento das raízes de soja pode ser um indicativo da sua sensibilidade à compactação do solo e a justificativa para o $Q_{1/2}$ relativamente baixo na camada compactada (CAMARGO; ALLEONI, 1997). O índice $Q_{1/2}$ é uma forma de comparar o crescimento radicular dentro da camada de solo compactado, preconizado por Dexter (1987), que é o valor da resistência mecânica do solo à penetração, medido com penetrômetro, em que o crescimento radicular é reduzido à metade do máximo.

Embora o diâmetro radicular de algumas poáceas (gramíneas) tenha aumentado com o aumento da compactação do solo, as espécies que apresentaram melhor desempenho de crescimento radicular dentro da camada de solo compactado, de maneira geral, foram as que tiveram menor diâmetro médio de raízes (MÜLLER et al., 2001). Com isso podemos pensar que as raízes podem reduzir seu tamanho para entrar em poros menores do solo, porém segundo Merotto Júnior e Mundstock (1999), as raízes podem crescer através dos poros e pontos de menor resistência, mas são incapazes de reduzir seu diâmetro para penetrar em poros menores.

Zou (2001) trabalhou com crescimento radicular em *Pinus radiata* e verificou que o crescimento das raízes foi o dobro quando o solo apresentava 0,5 MPa de resistência, comparado a um solo de 1,5 MPa. Porém Silva e Rosolem (2001) constataram que o aumento da resistência mecânica do solo à penetração de 0,05 para 2 MPa, na camada compactada localizada de 15 a 18,5 cm de profundidade, não prejudicou a produção total de matéria seca do sistema radicular da aveia preta, do guandu, da mucuna preta e do tremoço branco,

reforçando a constatação que essas plantas possuem uma capacidade de penetrar em camadas compactadas.

Foloni et al. (2003) e Rosolem et al. (1994) verificaram que a produção total de matéria seca do sistema radicular do milho não foi prejudicada pelo aumento da impedância mecânica do solo em camadas compactadas localizadas abaixo de 10 cm de profundidade. Nos trabalhos com plantas de milho submetidas à compactação do solo, verificou-se que o crescimento radicular foi inibido na camada compactada e abaixo dela, mas a intensificação da impedância mecânica do solo em subsuperfície causou um incremento de raízes na camada superficial, de modo que o nível mais alto de resistência mecânica do solo à penetração não resultou em menor produção total de matéria seca radicular, quando comparado ao tratamento testemunha. Freddi (2004) constatou uma diminuição na produtividade de milho quando a compactação se altera de 1,65 MPa para 5,69 MPa a partir do qual a produtividade decresceu de 6,718 para 4,137 Mg ha⁻¹ com 5,69 MPa reduzindo a produtividade em 38 %. Tais afirmações podem ser utilizadas para entender o comportamento da cultura de soja frente a compactação do solo e a disponibilidade de água para a cultura.

2.5.1.2 Compactação e porosidade do solo

A compactação pode ser definida como a reorganização das partículas do solo ocasionando decréscimo da porosidade e aumento da densidade do solo afetando a difusão de gases, infiltração, armazenamento de água e pressões de resistência do solo, que, por consequência, afetam o crescimento radicular das plantas. Principalmente o desenvolvimento de raízes novas, responsáveis pela maior taxa de absorção de água e nutrientes (TAYLOR; BRAR, 1991; QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000).

A compactação está relacionada também com a drenagem insatisfatória, devido a redução da macroporosidade, reduzindo a disponibilidade de oxigênio para as células das raízes (BAILEY-SERRES; VOESENEK, 2008). A drenagem não depende apenas do tamanho e do diâmetro dos poros, mas também da continuidade desses poros, os quais em solos de elevada densidade é fortemente comprometido pela perda da estrutura (BEUTLER et al., 2001).

A macroporosidade é uma medida diretamente relacionada com a difusão de oxigênio no solo para as raízes (GRABLE; SIEMER, 1968). A compactação gera uma restrição ao fluxo de gases e aumento na resistência ao crescimento de raízes (HAMZA; ANDERSON, 2005). Valores de porosidade de aeração abaixo de 10 a 15% são, geralmente, adotados como

restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas, apesar da dependência da espécie de planta e da atividade biológica do solo (THOMASSON, 1978).

Souza et al. (2011) encontraram que solo compactado, com densidades variando de 1,0 a 1,4 Mg m⁻³, sofreram redução de permeabilidade e porosidade. Porém com o cultivo de arroz no solo, a permeabilidade melhorou, mostrando que as raízes são capazes de reorganizar a estrutura do solo, criando poros e agregados que melhoram a infiltração de água.

2.5.2 Restrição química ao crescimento radicular

Os fatores que afetam o crescimento radicular estão relacionados à baixa fertilidade de solos tropicais e subtropicais e, conseqüentemente a acidez dos mesmos. Com isso, nota-se que o crescimento radicular é limitado e até mesmo inibido pela presença de toxidez de alumínio e manganês e a deficiência de cálcio, magnésio, fósforo e molibdênio (PETRERE et al., 2007).

A acidez dos solos é reconhecidamente uma das principais limitações para o desenvolvimento das culturas. As raízes da maior parte das plantas não se desenvolvem bem em solos ácidos por duas razões principais: excesso de alumínio (Al) ou deficiência de cálcio (Ca), sendo comum esses dois fatores ocorrerem associados, principalmente em solos de baixa fertilidade natural, como na região do cerrado (MALAVOLTA, 1985).

Abundante nos solos brasileiros, o alumínio (Al) é um dos principais fatores limitantes para o crescimento das plantas, com grande potencial tóxico (MALAVOLTA, 1980). Em solos ácidos (pH < 5,5), devido à alta solubilidade do metal, nutrientes considerados essenciais para a boa nutrição da cultura de soja, como o fósforo (P) e o molibdênio (Mo), encontram-se indisponíveis (PEIXOTO et al., 2007), resultando em perdas de produtividade.

A presença do alumínio (Al) disponível na solução do solo reduz o crescimento e o desenvolvimento das raízes, a absorção de nutrientes como fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e molibdênio (Mo) (FREITAS et al., 2006), e, conseqüentemente, menor acúmulo de matéria seca da planta e diminuição da parte aérea (NOLLA et al., 2007; LÓPEZ-BUCIO et al., 2000; MENOSSO et al., 2001; MARÍN-GARZA et al., 2010). Causa o engrossamento e amarelecimento radicular, formando ramificações secundárias escuras, degeneradas e tortuosas, e ausência de pelos absorventes (PEIXOTO et al., 2007). Além disso, altas concentrações do metal no solo podem diminuir a eficiência da nodulação e fixação do nitrogênio (N) atmosférico, com reflexos negativos à atividade microbiana (FERNANDES, 2006).

Após a sua absorção, o Al se liga às paredes celulares do córtex da raiz, impossibilitando os processos para o crescimento radicular, alterando a biossíntese e o acúmulo de etileno e auxina, que são responsáveis pelo alongamento celular (KOPITTKE et al., 2015). Em solos com altos teores de Al, Smyth e Cravo (1992) avaliaram a eficiência da utilização de calcário e gesso na cultura de soja e observaram que a saturação por Al do solo não deve ser superior a 27%, havendo uma estreita correlação entre a produtividade e a relação Ca/Al trocáveis do solo, com um valor crítico de 0,42 para obtenção de máxima produtividade. Tal fato demonstra que a produtividade pode não ser afetada pelo Al trocável desde que exista quantidade suficiente de Ca para manter a relação Ca/Al elevada.

Contudo, em sistemas de plantio direto, estudos mostram que a acidez ocasionada pela alta saturação de Al não influencia a densidade e a superfície radicular das plantas de soja (CAIRES et al., 2001), posto que o não revolvimento do solo resulta em maior liberação de ácidos orgânicos pelas raízes, possibilitando a manutenção de microrganismos benéficos que diminuam o potencial tóxico do Al presente no solo (BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 2002). Neste sistema de plantio, o carbono orgânico solúvel pode reduzir a toxidez do metal, formando complexos solúveis de carga neutra com cátions metálicos, porém apenas na superfície do solo. Logo, tais complexos, quando formados com Ca e Mg, elementos essenciais às plantas, têm a sua translocação facilitada no perfil do solo, favorecendo a absorção pelas raízes (CIOTTA et al., 2004).

Para superar os efeitos deletérios ocasionados pelo nutriente, a utilização cultivares com algum grau de tolerância é uma ferramenta de grande valia nas áreas de produção, além da incorporação profunda de calcário visando a correção da acidez do solo (KOPITTKE et al., 2015). A calagem favorece a nitrificação da matéria orgânica, que possui efeito positivo na fixação simbiótica do N, além de beneficiar as propriedades físicas pela adição de cátions floculantes aos colóides do solo, que estimulam sistemas radiculares mais extensos, posto a maior eficiência no aproveitamento de água e nutrientes.

Em estudo realizado pela Rede de Pesquisa do Cesb (safra 2015/16), constatou-se que para as produtividades acima de 70 sc ha⁻¹, os teores de Al no solo não interferiram na produtividade da cultura, provavelmente devido aos altos teores de Mg e B nos solos. Segundo Silva (2001), analisando doses de Mg e Ca, o autor verificou que o Mg possui uma capacidade 100 vezes maior em reduzir a toxidez de Al do que o Ca, ao passo que o B, possui efeito em melhorar a tolerância ao Al (CORRALES et al., 2008).

Além de exercer importante papel no crescimento e desenvolvimento das raízes, o cálcio (Ca) promove o aumento da atividade microbiana e da disponibilidade de molibdênio (Mo),

indispensáveis na fixação biológica do nitrogênio (FBN); melhora a estrutura, a permeabilidade e a infiltração de água no solo, favorecendo a planta em condições de estresse, aumentando o seu potencial de absorção radicular (FIOREZI et al., 2013).

O calcário é uma das fontes mais utilizadas para o fornecimento de Ca, além de servir como neutralizante da acidez do solo. Quando aplicado junto ao gesso, que apresenta alta mobilidade no perfil, é capaz de disponibilizar Ca^{+2} e SO_4^{-2} em profundidade, enriquecendo as camadas subsuperficiais, reduzindo a saturação por Al^{+3} (ALCARDE, RODELLA, 2003), e favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular. Em estudos conduzidos por Raij et al. (1994), a aplicação conjunta de calcário e gesso na produção de soja, reduziu a acidez do solo, atribuindo efeito do calcário na camada superficial e do gesso em profundidade, deixando o solo mais permeável ao desenvolvimento de raízes e consequente absorção de nutrientes, garantindo maior produtividade de grãos.

A prática da calagem também é responsável por aumentar linearmente a disponibilidade do molibdênio ($\text{Mo} - \text{MoO}_4^{2-}$) e diminuir a dos cátions metálicos (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} e Co^{2+}), ao passo que o boro ($\text{B} - \text{H}_3\text{BO}_3$ ou $\text{H}_2\text{BO}_3^{-}$) apresenta baixa disponibilidade em reação ácida (falta de mineralização da matéria orgânica) e queda na disponibilidade em pH próximo da neutralidade (aumenta a lixiviação pelo aumento da CTC do solo e pelo aumento na relação Ca/B). Portanto, principalmente em sistema de plantio direto (SPD), é importante atentar-se para as doses de calcário (VITTI, TREVISAN, 2000).

Segundo Sako et al. (2015), com relação à presença de Ca no solo, as altas produtividades de soja (superior a 90 sc ha^{-1}) são decorrentes da fertilidade no perfil em subsuperfície (de 40 cm até 100 cm de profundidade), que devem estar acima de 10 mmolc dm^{-3} de Ca, para que a planta possa expressar o seu máximo potencial produtivo, conforme mostrado na Figura 1. Arelado a isso, condições de saturação de base acima de 30%, saturação de Ca acima de 20% na CTC efetiva, pH entre 5,0 a 5,5 e a resistência ao solo com valores de no máximo 1,5 MPa, são parâmetros que garantem bom enraizamento e altas produtividades.

Com relação ao molibdênio (Mo), o nutriente está intimamente ligado à fixação biológica de nitrogênio (FBN). A sua deficiência, aliada a deficiência de cobalto (Co), vem se acentuando nos últimos anos, em função da sua exportação pelos grãos, fibras e colmos, reduzindo a sua disponibilidade nos solos cultivados, sendo cerca de 70% do Mo absorvido, exportado pelos grãos de soja (OLIVEIRA et al., 2007). Dessa forma, à medida que a

agricultura se intensifica e as produtividades aumentam, verifica-se uma importância crescente da adubação mineral com tais nutrientes.

No que diz respeito ao fósforo (P), o mesmo promove a formação inicial e o desenvolvimento das raízes (GRANT et al., 2001). O seu uso adequado aumenta a eficiência da utilização de água pela planta, bem como a absorção e a utilização dos nutrientes, venham eles do solo ou do adubo. Em sistema de plantio direto (SPD), onde há a manutenção da palhada na superfície do solo, mínima mobilização, fertilização e calagem superficial, há uma alteração na dinâmica dos nutrientes, aumentando a disponibilidade, sobretudo de P e Ca no solo (NOLLA, ANGHINONI, 2004). A solubilização do P favorece o desenvolvimento das raízes, posto que em condições de solos ácidos, inativa parte do Al^{+3} formando precipitados (ANGHINONI, 2005). A aplicação de P aumenta a produtividade de soja, principalmente quando aplicado calcário e gesso, melhorando a eficiência de utilização do nutriente pelas plantas (FREITAS et al., 1999) e favorecendo o desenvolvimento das raízes em camadas subsuperficiais.

Apesar de não ser exigido em grandes quantidades, é importante o correto manejo de P para o sistema de produção de soja, posto que devido às características dos solos tropicais, o nutriente pode ser permanentemente fixado a óxidos de ferro (Fe) e Al, se tornando indisponível para as plantas (VALLARADARES et al., 2003).

O magnésio (Mg) por sua vez é conhecido pela sua essencialidade no processo de fotossíntese e formação da clorofila. No entanto, as raízes em crescimento também são severamente afetadas pela sua deficiência. Devido ao seu potencial de lixiviação em solos altamente intemperizados e à sua interação com o alumínio (Al), a deficiência de Mg em solos ácidos é uma preocupação. O nutriente exerce ação protetora contra a toxicidade de Al, sendo necessário para a liberação dos ânions de ácidos orgânicos nas raízes, responsáveis por formar quelatos com os íons tóxicos de Al, formando os complexos Al-ácido orgânico que não são fitotóxicos (YANG et al., 2007). Plantio de culturas com alta exigência, em solos com textura mais arenosa, utilização de altas doses de potássio (K) nas adubações, aplicações de corretivos de solo com alta concentração de Ca e baixa de Mg (calcários com baixos teores de MgO), ou utilização do gesso agrícola, são fatores que favorecem a deficiência do nutriente (VALE, 2018).

Com relação ao boro (B), o nutriente é responsável por desenvolver as raízes, apresentando efeito positivo no seu crescimento, auxiliando nos processos de divisão e expansão celular. A sua deficiência inibe o desenvolvimento radicular, pela paralisação da

elongação das células (MARSCHNER, 1995). Sua adequada disponibilidade se dá entre pH 6 e 7, diminuindo em valores abaixo ou acima dessa faixa. Grande parte do B total do solo está preso à matéria orgânica, sendo liberado para a solução após mineralização, podendo ser absorvido pelas raízes ou perdido por lixiviação. Os adubos boratados, em sua maioria, apresentam alta solubilidade, estando o nutriente sujeito à grande mobilidade no solo, principalmente em solos arenosos. Logo, a preferência é por fontes de solubilidade lenta, menos suscetíveis a perdas por lixiviação (MORTVEDT, 1994).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O presente estudo foi conduzido a campo em duas áreas experimentais distintas, em que as mesmas foram selecionadas com base em produtividade e desenvolvimento radicular da cultura de soja em anos anteriores. A área com impedimento físico/químico estava localizada no município de Piracicaba, Estado de São Paulo. Já a área com elevado potencial produtivo e sem restrição para o crescimento radicular está localizada no município de Goiatuba, pertencente ao Estado de Goiás. A localização geográfica das áreas experimentais está apresentada a seguir na Figura 5, juntamente com a densidade de cultivo de soja.

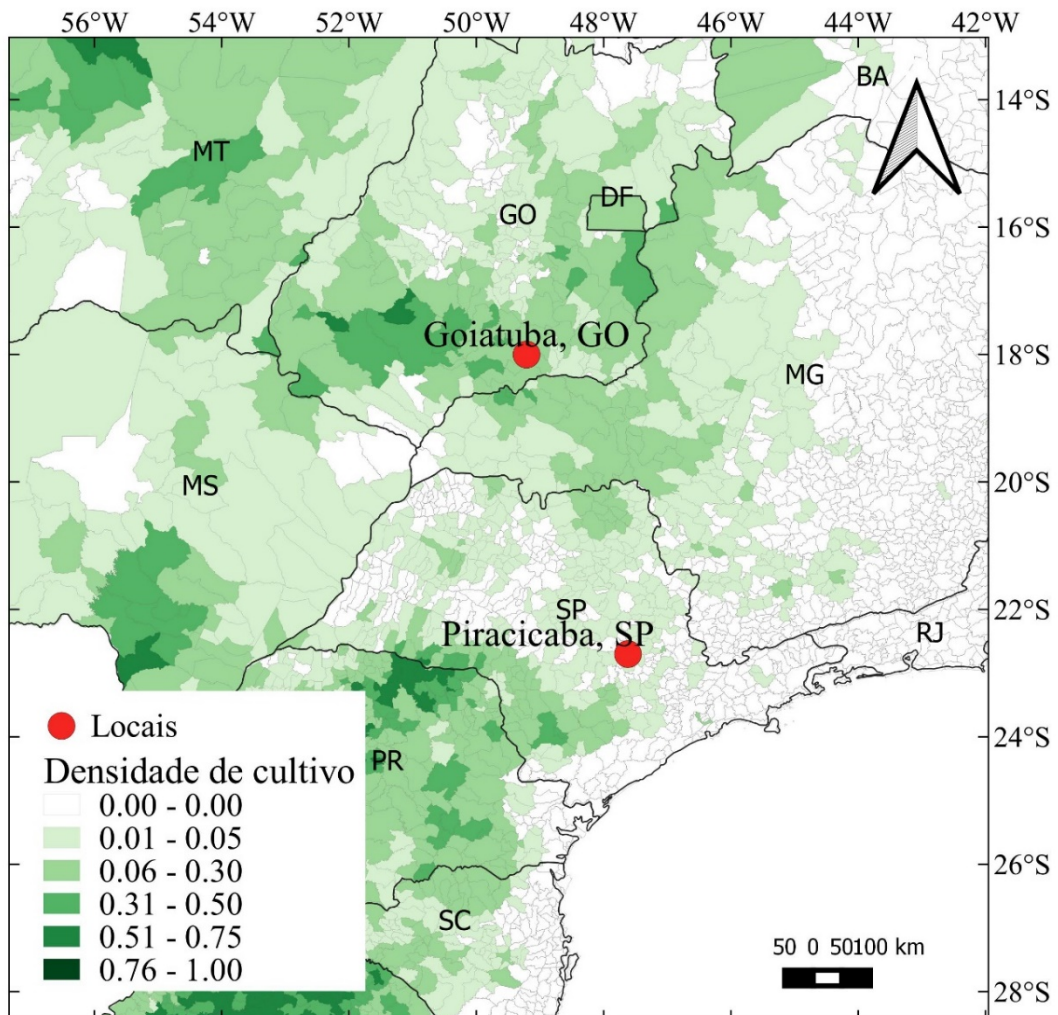


Figura 5. Localização geográfica dos experimentos e densidade de cultivo de soja na safra 2015/16. Fonte: Adaptado do IBGE (2018).

3.1.1 Piracicaba (SP)

A área para a condução do primeiro ensaio, constituída de 0,65 hectares (Figura 5), pertencendo ao grupo de estudos Projetando Agricultura Compromissada em sustentabilidade (PACES), do Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, localizada em Piracicaba - SP ($22^{\circ} 42' 24''$ Sul e $47^{\circ} 37' 53''$ Oeste) (Figura 6). O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1948), é do tipo Cwa, subtropical úmido, com estiagem no inverno e verão quente e chuvoso. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e do mês mais frio inferior a 18°C (SENTELHAS, 1998). O solo presente na área de condução do experimento, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SIBCS), desenvolvido pela Embrapa Solos (EMBRAPA, 2010) é caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, com textura média-arenosa, com o teor de areia equivalente de 63%. A semeadura ocorreu em 09/11/2016 e a colheita em 24/02/2017, sendo que o resultado de produtividade foi obtido uma amostra em área total.



Figura 6. A imagem de satélite demonstra a delimitação da área experimental de 0,65 ha (preto) pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da Esalq/USP. Fonte: Google maps (2018).

3.1.2 Goiatuba (GO)

O segundo ensaio foi conduzido na Fazenda Rancho Alegre localizada no município de Goiatuba- GO ($18^{\circ} 00' 45''$ S ; $49^{\circ} 21' 17''$ W) (Figura 7). O clima da região, segundo a

classificação de Köppen (1948), é do tipo Aw, o que o define como clima tropical em que a pluviosidade no verão é superior à do inverno, com a média pluviométrica anual de 1369 mm e temperatura média anual representada por 23°C (CIAGRO, 2018). O solo presente na área experimental de Goiatuba, segundo o SIBCS (EMBRAPA, 2010), é caracterizado como Latossolo Vermelho eutrófico típico, apresenta textura médio - arenosa, com o teor de areia equivalente de 51%. A semeadura ocorreu em 02/11/2016 e a colheita em 28/02/2017, sendo que o resultado de produtividade foi obtido uma amostra em área total.



Figura 7. A imagem de satélite demonstra a delimitação da área experimental (preto) em Goiatuba (GO), pertencente à Fazenda Rancho Alegre. Fonte: Google maps (2018).

3.2 Caracterização físico/química do solo e clima

A caracterização química do solo foi feita a partir da coleta de dez subamostras na área experimental nas profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 80 cm. As amostras foram enviadas para laboratório para análise, seguindo os métodos propostos por Malavolta (2006). Nesta análise foi avaliado o pH do solo em CaCl_2 , concentração de fósforo em resina, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, enxofre, e ainda acidez total ($\text{H}+\text{Al}$), soma de bases, capacidade de troca de cátions, saturação de bases e por alumínio.

Para a análise física do solo, considerou-se o índice de cone, representando a resistência a penetração do solo. Para isso foi utilizado um penetrômetro digital manual (Falker®) com cone número 2 de 12,83 mm. A medida de compactação foi realizada em 10 pontos da área

experimental a partir da superfície do solo até 100 cm de profundidade, com a apresentação dos valores de compactação (índice de cone) na resolução de 10 cm. Tais medidas foram realizadas com o solo na capacidade de campo, após a irrigação das áreas de estudo. Nas duas áreas foi realizada a abertura de trincheiras de 120 cm de profundidade para verificar o crescimento radicular. Nestas trincheiras foram obtidas fotografias que em seguida foram processadas no *software* WinRhizo para determinar o comprimento de raiz e a área superficial das mesmas.

Para caracterizar a condição climática durante o experimento foram obtidos os dados meteorológicos de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), contemplando temperatura do ar, umidade relativa, chuva, radiação solar e velocidade do vento. A partir desses dados obteve-se a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) e a potencial da cultura de soja com base no coeficiente de cultivo apresentados por Farias et al. (2001). Esta análise foi realizada para comparar as condições meteorológicas durante o desenvolvimento de soja e durante o experimento de consumo hídrico.

3.3 Quantificação da evapotranspiração real de soja

3.3.1 Amostragem do conteúdo de água no solo

Na área experimental de Piracicaba e Goiatuba foram demarcadas, de forma aleatória, três pontos com estacas, representados as repetições experimentais do ensaio. Nessas áreas, com o auxílio de uma carreta do tipo tanque, com capacidade de 500 litros, foi feita a irrigação manual com a finalidade de atingir a umidade do solo correspondente a capacidade de campo (CC). A quantificação da evapotranspiração real da cultura foi feita comparando-se o conteúdo de água no solo na capacidade de campo, realizada no dia 0, e a medida do conteúdo de água no solo três dias subsequentes (dia 3). Nesse intervalo de tempo não houve a ocorrência de irrigação e de chuva nas áreas experimentais. As datas de início da avaliação da evapotranspiração real ocorreram em 01/02/2017 e 19/01/2017, respectivamente, para Piracicaba e Goiatuba.

O conteúdo de água no solo foi obtido por meio da amostragem do solo utilizando um trado, para cada repetição, retirando 1 amostra de solo a cada 10 cm para uma profundidade entre 0 e 100 cm, totalizando 10 amostras por ponto. Para evitar contaminações em relação a profundidade, de cada tradagem eram retirados 2,5 cm de solo das extremidades superior e inferior, desta forma as amostras eram constituídas do solo pertencente aos 5 cm centrais da

ponteira do trado. Todas as amostras foram colocadas em sacos de papel devidamente identificados e imediatamente, após coletadas, pesadas em balança analítica de precisão.

Tanto as amostras coletadas no dia 0 como no dia 3, de ambos ensaios, foram dispostas em estufa de ventilação forçada a 65°C até atingir massa constante. A seguir, procedeu-se novamente da pesagem na balança analítica de precisão para a obtenção do peso seco das amostras, em gramas. Logo, o resultado obtido foi a diferença entre a massa úmida e massa seca do solo, que representa o peso de água (gramas) presente em cada amostra. Sendo possível avaliar e relacionar a quantidade de água nas diferentes camadas do solo, datas e locais de coleta, determinando o consumo hídrico no período analisado.

Na mesma área de coleta das amostras de solo, para ambos municípios, foi aberta uma trincheira com a dimensão de 0,7 metros de largura e 1,0 metro de profundidade (Figura 8). A profundidade da trincheira foi estratificada em 10 partes, cada qual com 10 cm. No centro de cada camada de 10 cm anteriormente estipulada, com o auxílio da trena, foi posicionado um anel volumétrico (cilindros de aço inoxidável de 3 cm de diâmetro por 5 cm de altura) para retirada de uma amostra indeformada para determinação da massa especificado solo correspondente a cada camada predeterminada.



Figura 8. Medição da profundidade da trincheira através da trena, para estratificação da profundidade e alocação dos anéis volumétricos para coleta de amostras do solo a cada 10 cm.

Estas amostras foram levadas ao laboratório onde foram alocadas dentro de bandejas plásticas, em que na mesma foi feita a adição fracionada de água até que a lâmina de água interna a bandeja atingisse altura próxima a superfície das amostras indeformadas, garantindo assim a saturação no interior de cada anel volumétrico. Seguido da pesagem onde obteve dados referente a massa das amostras saturadas (gramas), posteriormente as mesmas foram alocadas em estufa de ventilação forçada 105°C por 48 horas. Subsequentemente procedeu-se a pesagem para obtenção da massa seca (gramas) de cada amostra. Para o cálculo da massa específica do solo foi realizada a divisão da massa seca pelo volume total da amostra, o valor obtido apresenta-se em g cm^{-3} . Com a diferença de peso inicial e final da amostra foi possível aferir a porcentagem de água presente em cada amostra.

3.3.2 Cálculo da evapotranspiração real

Após a quantificação de água nas amostras e da massa específica das mesmas, foi obtida a evapotranspiração real da cultura de soja para cada camada de 10 centímetros de profundidade, entre 0 e 100 cm, a partir da Equação 2, seguindo metodologia descrita por Righes (1980). A evapotranspiração real total do período e o valor relativa para cada camada foi obtido utilizando as Equações 3 e 4.

$$ETr_i = (u_{dia\ 0_i} - u_{dia\ 3_i}) \cdot Dg \cdot 100 \quad (2)$$

$$ETr_{Total} = \sum_i^n ETr_i \quad (3)$$

$$ETr_{rel_i} = \frac{ETr_i}{ETr_{Total}} \cdot 100 \quad (4)$$

em que ETr_i se refere à evapotranspiração real (mm), ocorrida em três dias consecutivos (entre o dia 0 e 3), para uma camada de solo representada pela profundidade i de interesse; ETr_{Total} à evapotranspiração real (mm) acumulada nas n camadas do perfil de solo considerado; ETr_{rel_i} à evapotranspiração real relativa (%) para cada camada de solo representada pela profundidade

i de interesse; u ao teor de água (g g^{-1}) presente em cada amostra; e D_g à massa específica do solo (g cm^{-3}).

3.3.3 Profundidade efetiva do sistema radicular de soja

Após a determinação da evapotranspiração real relativa para as camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 e 90-100 centímetros de profundidade do solo para a área experimental de Piracicaba e Goiatuba foi realizada a identificação da profundidade em que o acumulado, a partir da primeira camada, atingiu 80% do valor total da evapotranspiração real do período analisado (dia 0 a 3) (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Tal valor foi adotado para identificar a profundidade do sistema radicular que representou a maior atividade da raiz para absorção de água em condições de boa disponibilidade hídrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do perfil do solo

Em relação a condição química do perfil do solo em Piracicaba e Goiatuba pode-se observar que a área de Goiatuba apresenta maior valor de pH abaixo de 40 cm de profundidade, que associado a ausência de alumínio (Al) e saturação por alumínio igual a 0 (Tabela 2), favorecendo o crescimento radicular em profundidade. A ausência de alumínio no perfil do solo tem se mostrando essencial em áreas campeãs de produtividade de soja no Brasil, conforme apresentado por Cesb (2018), uma vez que a presença de alumínio no solo resulta em toxidez a planta, reduzindo o crescimento radicular, principalmente da raiz primária (MENOSSO et al., 2001).

Tabela 2. Resultados da análise química de macronutrientes (P, K, Ca, Mg - $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ - e S - mg dm^{-3}), hidrogênio e alumínio ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), pH, capacidade de troca catiônica (CTC, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases (SB, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação por bases (V, %) e por alumínio (m, %) em diferentes profundidades (Z) do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico em Piracicaba (SP), e do Latossolo Vermelho eutrófico típico em Goiatuba (GO).

Z (cm)	pH CaCl ₂	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V	m	S
		resina										SO ₄
Piracicaba, SP												
0 – 20	5,6	32,0	1,3	20,0	8,0	20,0	0	29,0	49,0	59,0	0	8,0
20 – 40	5,0	14,0	1,3	11,0	5,0	22,0	1	17,0	39,0	44,0	5	8,0
40 – 80	4,2	4,0	0,5	5,0	2,0	34,0	4	8,0	42,0	18,0	35	15,0
Goiatuba, GO												
0 – 20	4,8	40,5	1,9	30,5	12,0	35,5	0	44,5	80,0	55,5	0	11,5
20 – 40	4,9	12,0	1,6	21,0	8,0	30,0	0	30,8	60,8	51,0	0	25,0
40 – 80	5,0	5,3	0,7	10,0	6,7	19,7	0	14,5	37,2	46,3	0	14,0

Nota: P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; H: Hidrogênio; Al: Alumínio; e S: Enxofre.

O solo de Piracicaba é classificando como distrófico, apresentando saturação de bases inferior a 30% em profundidade, que nesta área está em 18% abaixo de 40 cm, contra 46% para o solo de Goiatuba, classificado como solo mesotrófico (Tabela 2). Sako et al. (2016a) observaram correlação positiva entre a produtividade e a saturação de bases entre 10 e 100 cm

de profundidade, quando analisadas 47 áreas no Brasil, com produtividade variando de 30 a 110 sc ha⁻¹. Para o estado de São Paulo, a recomendação para o cultivo de soja é que a saturação de bases apresente um valor superior a 60%, enquanto que para áreas do cerrado, como Goiás, esse valor deve ser superior a 50% (EMBRAPA, 2013). A baixa saturação de base pode afetar a disponibilidade de fósforo, fazendo com que a soja aumente o crescimento em comprimento e superfície das raízes com a mesma matéria seca total, compensando, apenas em parte, a baixa disponibilidade de nutrientes (ROSOLEM; MARCELLO, 1998).

O cálcio apresentou limitação para a área de Piracicaba abaixo de 40 cm de profundidade quando considerado o limite inferior observado por Sako et al. (2016a) para altas produtividades, que é de 8 mmol_c dm⁻³ de Ca. Esse valor é próximo do que foi observado por Rosolem e Marcello (1998), de 8,5 mmol_c dm⁻³ de Ca, tido como mínimo para o crescimento radicular normal da cultura de soja avaliando em vaso com fertilidade do solo controlada. Em Piracicaba entre 0 e 40 cm e em Goiatuba entre 0 e 80 cm os níveis de cálcio estavam superiores do limite inferior para áreas de altas produtividades (Tabela 2) (SAKO et al., 2016a). Tal diferença pode ter afetado o crescimento radicular de soja, como demonstrado por Marschner (1995), em que a remoção do cálcio na ponta das raízes causou redução expressiva no crescimento radicular, seguida de morte do tecido celular.

A resistência do solo à penetração tem se mostrado um importante variável para altas produtividades, uma vez que baixas resistências facilitam o crescimento radicular para a exploração do solo, infiltração de água no perfil e suprimento de oxigênio para as raízes (TAYLOR; BRAR, 1991; QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000). Em análise de resistência do solo à penetração para as áreas experimentais (Figura 9), observou-se que em ambas áreas os valores estavam acima de 1,20 MPa de, tido com classificação intermediária quanto à facilidade do crescimento radicular e um valor constantemente observado em áreas de alta produtividade (SAKO et al., 2016a).

A principal diferença entre Piracicaba e Goiatuba, que afetou o crescimento radicular, ocorreu na camada entre 20 e 40 cm para Piracicaba (Figura 9). Nesta camada a resistência do solo à penetração alcançou valores de 2,00 MPa, condição extremamente restritiva para o crescimento radicular, fazendo com que a planta demore mais tempo para ultrapassar essa camada e dando preferência para o crescimento radicular lateral (IJJIMA; KONO, 1991; MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999). Moraes et al. (2018) demonstraram uma redução na taxa de crescimento radicular potencial de 45% e 60%, respectivamente, para solos com e sem poros contínuos, quando comparando a taxa de crescimento potencial e a taxa de crescimento sob uma resistência de penetração no solo de 2 MPa.

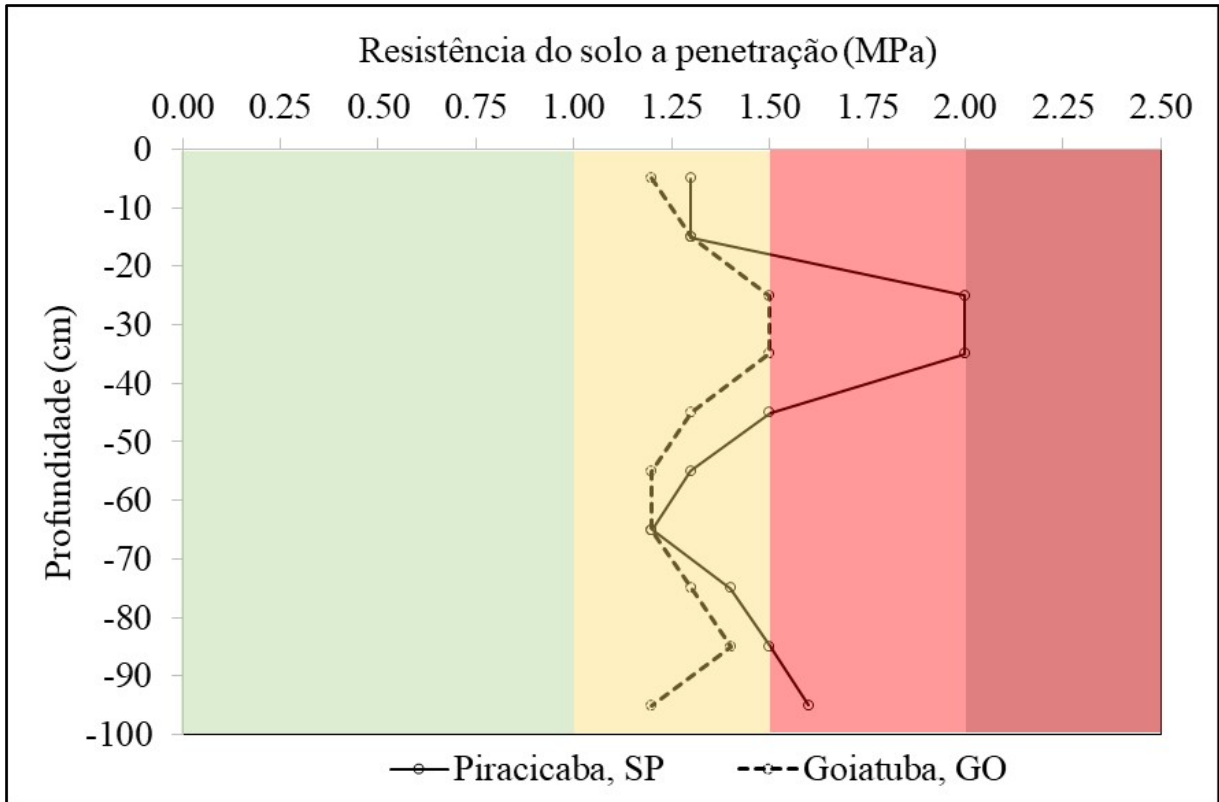


Figura 9. Perfil de resistência do solo a penetração para área experimental em Piracicaba, SP, e em Goiatuba, GO. Escala de cores representam o efeito da resistência sobre o crescimento radicular, de menor (verde) para maior (vermelho) restrição (BENIE, 2013).

4.2 Crescimento radicular

O crescimento radicular de soja foi obtido logo após a análise de consumo hídrico, por meio de fotografia da trincheira aberta na área experimental (Figura 10). Pode-se observar que ambos perfis apresentam um grande volume de raízes na primeira camada de solo. Em Goiatuba há um maior volume conforme a profundidade de análise aumenta em relação a Piracicaba, com bom volume de raiz abaixo de 60 cm de profundidade (Figura 10b). Em Piracicaba, abaixo dos 40 cm quase não há presença de raízes, provavelmente associado a maior compactação do solo e presença de alumínio abaixo dessa profundidade. Tais padrões de distribuição radicular foram apontados como condições para baixa e alta produtividade (PIVETTA et al., 2011; SAKO et al., 2016a), respectivamente, para Piracicaba e Goiatuba, afetando o perfil de extração de água do solo pela cultura de soja (FATTORI JÚNIOR et al., 2017).



Figura 10. Foto do perfil de crescimento radicular de plantas de soja em Piracicaba (SP) (a) e em Goiátuba (GO) (b) no estágio fenológico R_{5.1}.

A partir das imagens apresentadas na Figura 10 e o utilizando o *software* WinRhizo obteve-se o comprimento radicular total de 667 e 1836 cm, respectivamente, para a área de Piracicaba (Figura 11a) e Goiatuba (Figura 11b). Tal diferença representa um comprimento radicular 175% maior em Goiatuba em relação a Piracicaba. Sako et al. (2016a) obtiveram uma diferença de 133% para comprimento radicular entre uma área com produtividade de 127 sc ha⁻¹ em relação a outro com 72 sc ha⁻¹. Da mesma forma, a área superficial radicular foi de 43 cm² em Piracicaba (Figura 11a) e 124 cm² para Goiatuba (Figura 11b), diferença de 188% maior área superficial para Goiatuba. Um sistema radicular menor e superficial coloca a planta em condição de déficit hídrico de forma mais rápida e frequente de que um sistema radicular profundo (WEI et al., 2015).

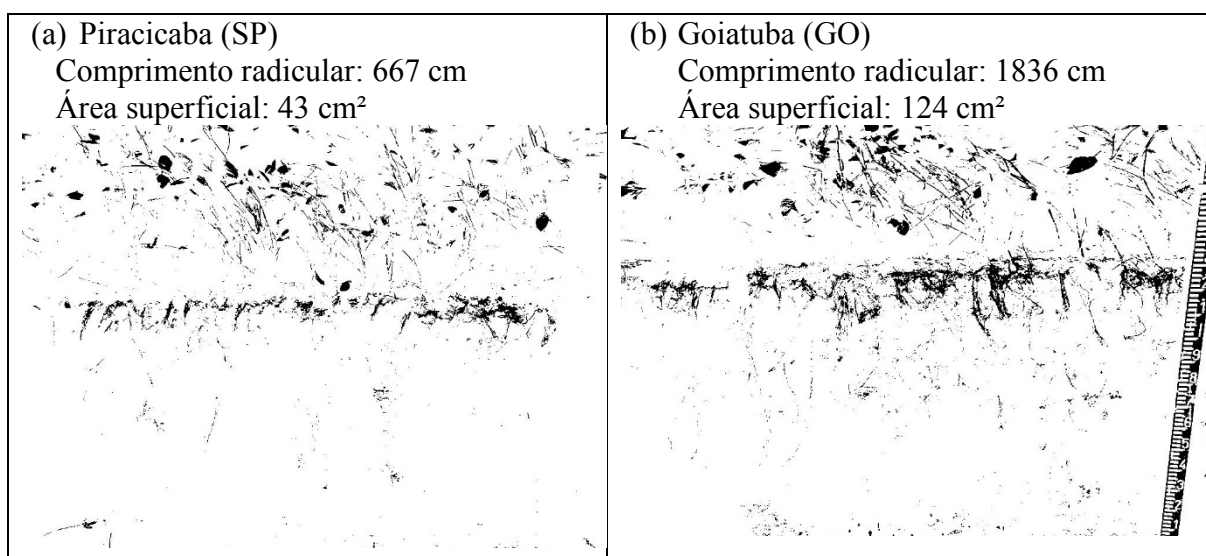


Figura 11. Imagem obtida a partir do software INRISO para determinação do comprimento e da área superficial do sistema radicular de plantas de soja em Piracicaba (SP) (a) e em Goiatuba (GO) (b) no estágio fenológico R_{5.1}.

4.3 Evapotranspiração real

No período de cultivo de soja observou-se que as tendências de temperatura entre as duas localidades foram bastante próximas com a temperatura do ar mínima superior a basal da cultura de 13°C (FARIAS et al., 2009), com exceção de dois momentos no início do ciclo em Piracicaba, SP (Figura 12). A temperatura média do ar se manteve numa faixa ideal para cultura de soja, entre 20 e 30°C, sendo que em Goiatuba a temperatura média do ciclo foi de 24,04°C e em Piracicaba foi de 23,86°C (Figura 12). Os maiores valores de temperatura do ar máxima não ultrapassaram o limite considerado adequado para a cultura de soja, sendo estes valores menores

que 40°C (FARIAS et al., 2009). Por meio destes valores de temperatura do ar é possível inferir que a cultura experimentou valores de evapotranspiração semelhantes ao longo do ciclo, já que a temperatura do ar é uma forma indireta de representar a demanda por estar relacionada com a disponibilidade de energia no ambiente e com a umidade relativa do ar (ALLEN et al., 1998).

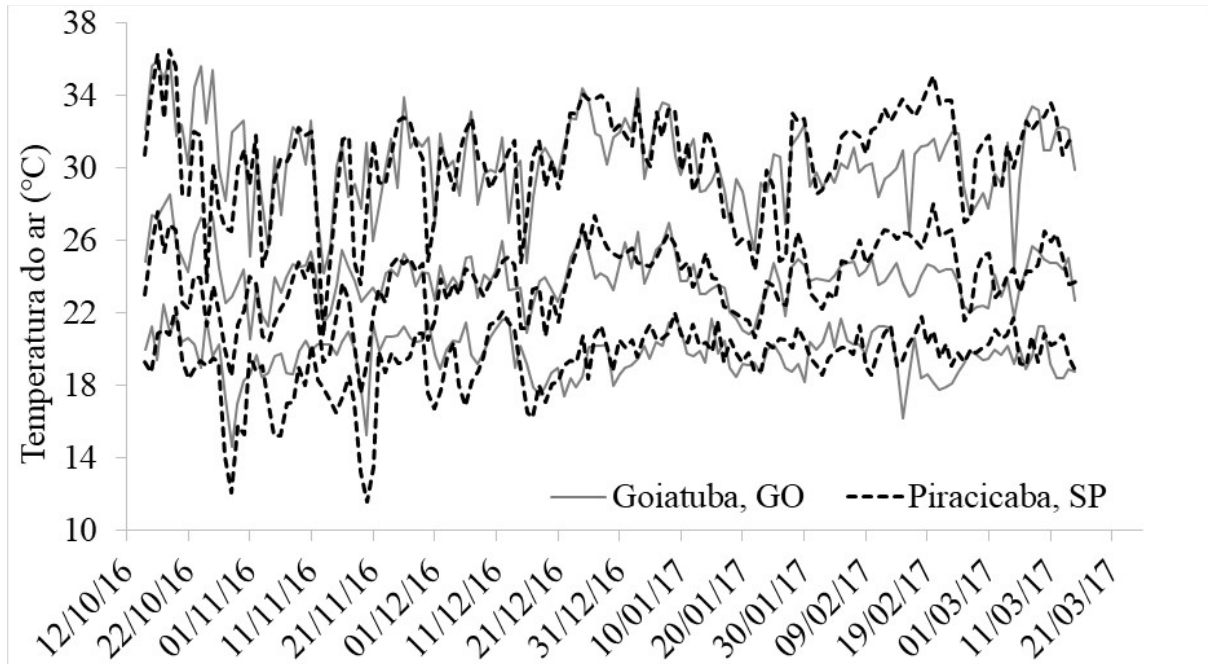


Figura 12. Temperatura do ar máxima (linha superior), média (linha intermediária) e mínima (linha inferior) durante a realização dos experimentos em Piracicaba (SP) e em Goiatuba (GO).

A partir dos dados meteorológicos foi estimado a evapotranspiração potencial da cultura de soja, a qual esteve em torno de 2 mm dia^{-1} no início do ciclo, alcançando picos entre 8 e 10 mm dia^{-1} durante o período reprodutivo da cultura (Figura 13). Ao longo do ciclo, a evapotranspiração potencial da cultura foi bastante similar entre as localidades (Figura 13). Em Goiatuba o acumulado de evapotranspiração potencial da cultura foi de 691 mm, enquanto que a chuva total acumulada no período foi de 654 mm. Já em Piracicaba, o acumulado de evapotranspiração potencial foi de 569 mm com um acumulado de chuva de 717 mm. Tais resultados demonstram que a área de Goiatuba obteve uma evapotranspiração potencial 21% superior a Piracicaba, com 9% menor volume total de chuva. Apesar da diferença na chuva acumulada no ciclo, tais totais acumulados estão próximos do ponto para máxima produtividade, que segundo Zanon et al. (2016), ocorre em torno de 600 mm.

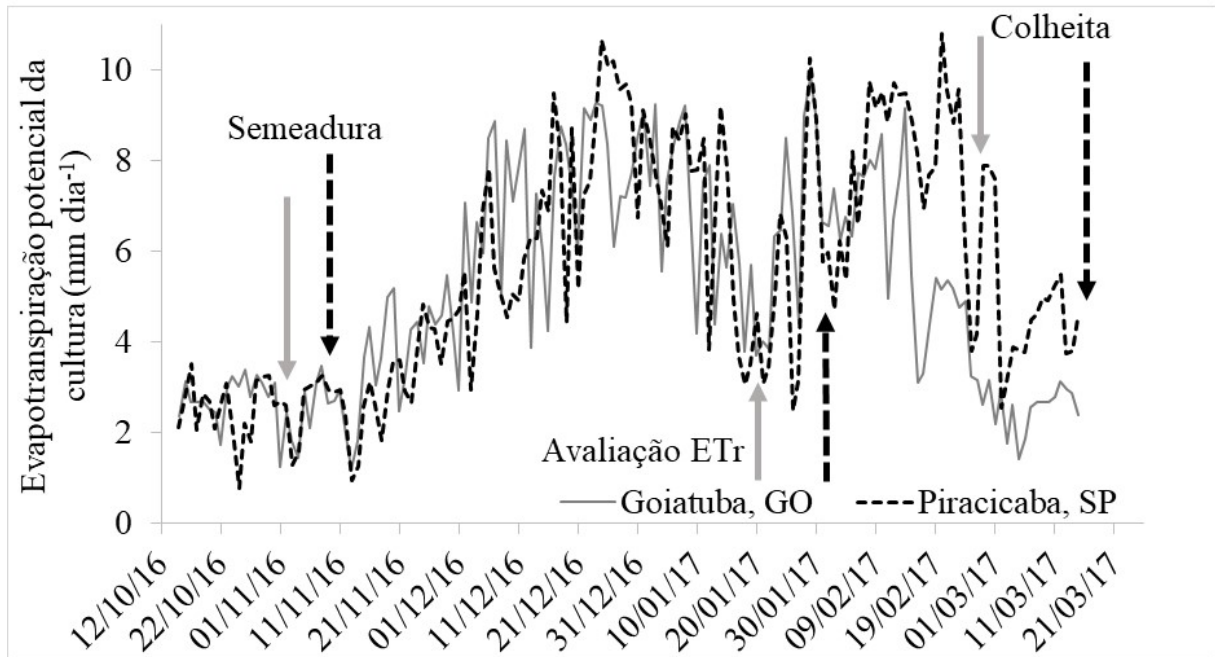


Figura 13. Evapotranspiração potencial da cultura de soja obtida a partir do coeficiente de cultivo e evapotranspiração de referência (Penman-Monteith) durante a realização dos experimentos em Piracicaba (SP) e em Goiatuba (GO). Setas indicam momento da semeadura, avaliação da evapotranspiração real (ETr) e da colheita para Piracicaba (seta pontilhada preta) e Goiatuba (seta contínua cinza).

Durante o período de avaliação do consumo hídrico, que se iniciou no dia 19/01/2017 em Goiatuba, e no dia 01/02/2017 em Piracicaba, a evapotranspiração potencial da cultura acumulada entre o dia 0 e 3 foi de 13,4 mm em Goiatuba e 16,93 mm em Piracicaba (Figura 13). Tais valores representam um consumo médio diário de 4,48 mm dia⁻¹ para Goiatuba, e de 5,64 mm dia⁻¹ para Piracicaba. Os valores estimados (Figura 13) diferiram dos valores observados, que obtiveram um valor acumulado de 23,7 e 24,4 mm, respectivamente, para Goiatuba e Piracicaba (Tabela 3), resultando em uma média diária de 7,90 mm dia⁻¹ para Goiatuba, e de 8,10 mm dia⁻¹ para Piracicaba. Apesar das diferenças, pode se verificar uma consistência entre os locais independente da metodologia, sendo estimativa ou medida no campo, com ambas taxas de evapotranspiração sendo possíveis para a soja (FARIAS et al., 2009).

Tabela 3. Teor de água no solo extraído entre dia 0 e dia 3 ($u_{\text{dia 0}} - u_{\text{dia 3}}$), massa específica do solo e evapotranspiração real da cultura (ETr) por camada de solo para Goiatuba (GO) e Piracicaba (SP).

Camada do solo cm	$u_{\text{dia 0}} - u_{\text{dia 3}}$ g g ⁻¹	Massa específica do solo g cm ⁻³	ETr mm camada ⁻¹
Goiatuba, GO			
0 a 10	0,0231	1,14	2,6
10 a 20	0,0224	1,23	2,7
20 a 30	0,0216	1,24	2,7
30 a 40	0,0225	1,23	2,8
40 a 50	0,0251	1,16	2,9
50 a 60	0,0188	1,13	2,1
60 a 70	0,0179	1,13	2,0
70 a 80	0,0171	1,10	1,9
80 a 90	0,0172	1,18	2,0
90 a 100	0,0175	1,12	2,0
Total			23,7 mm
Piracicaba, SP			
0 a 10	0,0802	1,52	12,2
10 a 20	0,0466	1,55	7,2
20 a 30	0,0145	1,60	2,3
30 a 40	0,0049	1,62	0,8
40 a 50	0,0000	1,54	0,0
50 a 60	0,0000	1,50	0,0
60 a 70	0,0024	1,45	0,3
70 a 80	0,0033	1,39	0,5
80 a 90	0,0050	1,41	0,7
90 a 100	0,0025	1,38	0,3
Total			24,4 mm

A evapotranspiração real obtida para cada camada do solo para Goiatuba variou de 1,90 mm na camada de 70-80 cm, a 2,90 mm na camada de 40-50 cm, quando considerado o período de 3 dias (Tabela 3). Tais resultados condizem com a distribuição do sistema radicular

apresentados na Figura 10. Para Piracicaba, a evapotranspiração real variou de 0,00 mm na camada de 40-50 e 50-60 cm, a 12,20 mm na camada de 0-10 cm, quando considerado o período de 3 dias (Tabela 3). Pode-se verificar que sob uma condição de boa disponibilidade hídrica, a área de Piracicaba obteve maior parte da evapotranspiração das primeiras camadas, enquanto que Goiatuba obteve uma extração de forma mais homogênea. Tais condições limitam a produtividade em período de veranicos, pois com sistema radicular superficial, a planta seca rapidamente a parte superficial do solo, enquanto que o sistema radicular profundo possui uma maior reserva de água, resultando uma menor deficiência hídrica e maiores produtividades (BATTISTI; SENTELHAS, 2017).

4.4 Profundidade efetiva do sistema radicular

A evapotranspiração real acumulada por camada da cultura de soja apresentou uma taxa de extração muito próximo a linear para Goiatuba no período de três dias (Figura 14a), resultando em um acumulado de 23,7 mm. Para Piracicaba, a curva de extração acumulada por camada de solo apresentou uma característica logaritmo, com o máximo acúmulo ocorrendo entre as camadas de 10-20 e 20-30 cm de profundidade, alcançando em torno 22 mm, contra um total de 24,4 mm extraído de todo o perfil do solo. Os formatos da curva de extração de água no solo são semelhantes aos valores de densidade radicular encontrados por Battisti e Sentelhas (2017) ao utilizar modelo de simulação limitando o sistema radicular a 60 e 150 cm de profundidade máxima, em que esta semelhança é associada ao fato de que a extração de água do solo está ligada a densidade radicular em cada camada do solo, definida pela exploração do solo.

Para identificar a profundidade efetiva do sistema radicular nas duas áreas experimentais utilizou-se como limiar o valor de evapotranspiração acumulada de 80%, conforme apresentada na Figura 14b. Em Piracicaba pode se verificar que 50% da evapotranspiração do período foi extraída da primeira camada do solo, de 0 a 10 cm. Já a camada de 10 a 20 cm contribui com 30% da evapotranspiração, sendo nesta camada que 80% da evapotranspiração real acumulada do período foi atingida. A partir da camada abaixo de 40 cm a contribuição para a evapotranspiração real foi menor que 8%, principalmente pela menor quantidade de raízes associada a compactação do solo nas camadas de 20 a 40 cm e presença de alumínio abaixo de 40 cm de profundidade (SAKO et al., 2016a).

Em Goiatuba, devido os melhores níveis de fertilidade do solo em profundidade e níveis aceitáveis de resistência a penetração do solo (SAKO et al., 2016a), resultando em maior e

melhor distribuição do sistema radicular, a taxa de extração de água foi em média de 10% para cada camada do solo e de forma homogênea (Figura 14b). A profundidade efetiva do sistema radicular (80% da evapotranspiração real) ocorreu na camada de 70 a 80 cm, mas com as camadas de 80-90 e 90-100 ainda representando 17% da evapotranspiração real total ocorrida no intervalo analisado.

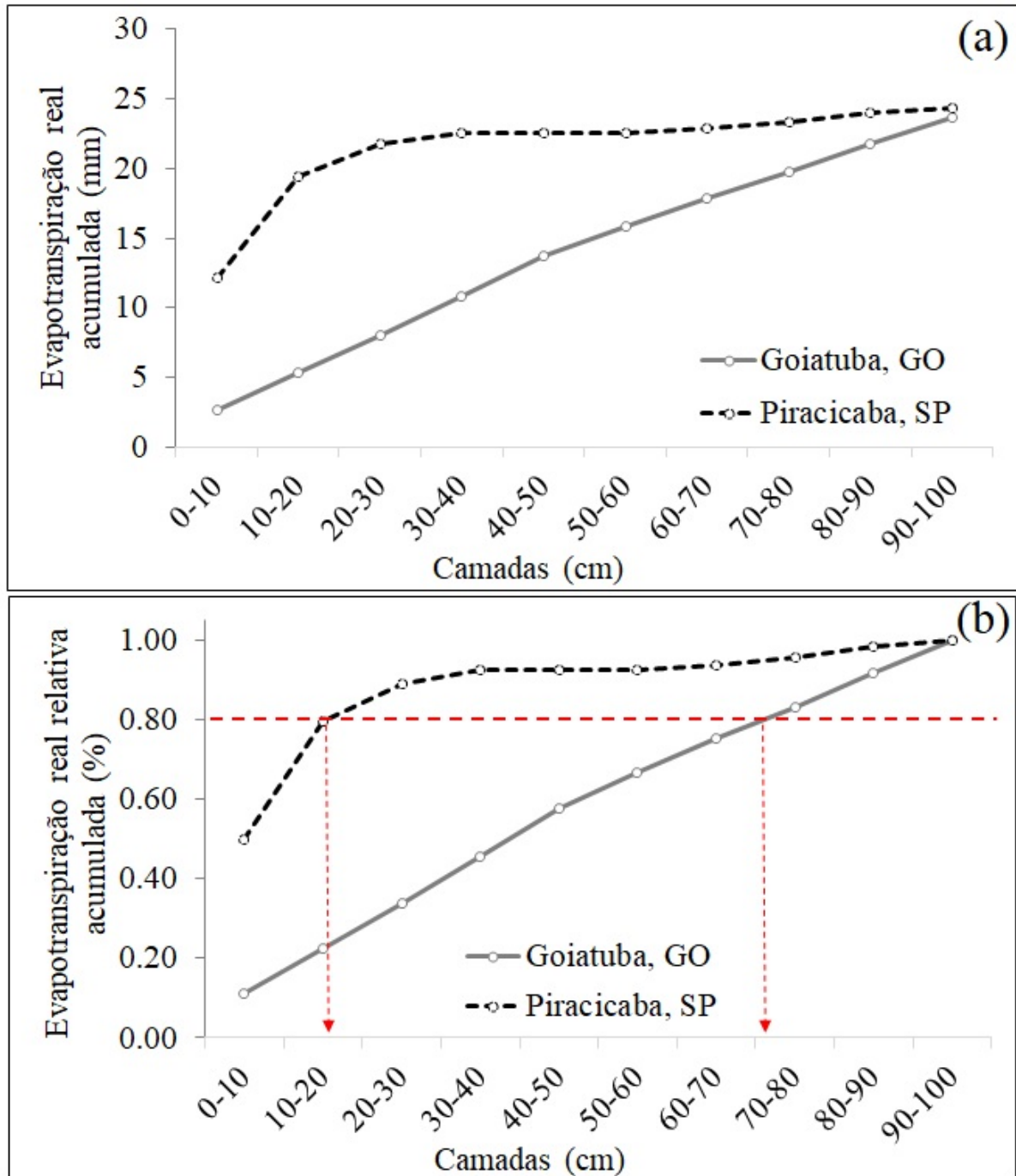


Figura 14. Valores absolutos (mm) (a) e relativos (%) (b) de evapotranspiração real acumulada (linha pontilhada indica o ponto acumulado de 80%, enquanto que as setas indicam a profundidade em que esse valor foi atingido) por camada a partir da superfície entre os dias 0 e 3 para Piracicaba, SP, e Goiatuba, GO.

Tais diferenças da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura de soja definem a disponibilidade de água total para a planta (BATTISTI et al., 2016). Em Piracicaba, com a profundidade efetiva ocorrendo no máximo a 20 cm de profundidade sistema radicular, e

considerando um solo de textura média ($1,2 \text{ mm cm}^{-1}$), resulta em uma água disponível total para a planta de 24 mm, suprimindo, por exemplo, a demanda da cultura por 3 dias durante o período reprodutivo (8 mm dia^{-1}). Já para Goiatuba, em que a profundidade efetiva ocorreu a 80 cm, a água total disponível para planta chega a máximo de 96 mm, suprimindo a cultura por um período de 12 dias sob máxima demanda hídrica da cultura no período reprodutivo.

4.5 Perfil de raiz e produtividade

A produtividade foi obtida em área total para as duas áreas experimentais, sendo que em Piracicaba foi observada uma produtividade média de 61 sc ha^{-1} e em Goiatuba um valor de 91 sc ha^{-1} , sendo uma diferença observada de 30 sc ha^{-1} . Esta diferença está associada as condições de solo, já que os demais manejos foram realizados de forma semelhante para buscar uma máxima produtividade. O primeiro ponto diz respeito a profundidade do sistema radicular e a disponibilidade de água para a cultura durante períodos de veranico e o segundo a fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes para a cultura (SAKO et al., 2016b).

A melhor distribuição do sistema radicular em Goiatuba resulta em uma disponibilidade hídrica para a cultura durante um período de 12 dias, enquanto que em Piracicaba está disponibilidade supre apenas 3 dias de demanda máxima da cultura. Battisti e Sentelhas (2017) verificaram um ganho médio de 5 a 18 sc ha^{-1} para locais próximos a Goiatuba, quando comparado um sistema radicular superficial (máximo 60 cm de profundidade) e profundo (máximo 150 cm de profundidade). Já para localidade próxima a Piracicaba (Avaré) o ganho pelo aprofundamento do sistema radicular foi, em média, de 13 sc ha^{-1} . Estes resultados que em torno de 50% da diferença de produtividade pode estar associada a menor disponibilidade hídrica a cultura para períodos de veranicos.

Além da diferença na disponibilidade hídrica das áreas avaliadas, os níveis de fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes contribuíram de forma decisiva para a variação de 30 sc ha^{-1} .

Um sistema radicular mais profundo é capaz de absorver, além de água, grande quantidade de nutrientes que, originalmente, estavam inacessíveis às plantas sob condições de limitação no crescimento radicular, sobretudo devido à baixa disponibilidade hídrica.

Do ponto de vista fisiológico, solos bem manejados com boa disponibilidade hídrica, associados ao crescimento de plantas com sistema radicular profundo, proporcionam menor estresse às plantas, beneficiando a absorção de água e nutrientes.

5 CONCLUSÃO

Em função dos resultados obtidos, pode-se concluir: (i) a resistência à penetração radicular do solo (compactação) e os níveis de alumínio limitaram o crescimento radicular para o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em Piracicaba (SP); (ii) houve absorção de água pelo sistema radicular de soja para todas as profundidades avaliadas, de 5 a 95 cm, independente das condições físicas e químicas do solo de alta e baixa produtividade; (iii) a profundidade efetiva do sistema radicular (correspondente à profundidade do solo que contribui com ETr acumulada de 80%) para o solo Latossolo Vermelho eutrófico típico de alta produtividade em Goiatuba (GO) ocorreu na camada de 70 a 80 cm de profundidade, enquanto para o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de baixa produtividade em Piracicaba (SP) ocorreu na camada de 10 a 20 cm; (iv) o Latossolo Vermelho eutrófico típico de alta produtividade em Goiatuba (GO) apresentou maior produtividade (50% superior) em relação ao Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de baixa produtividade em Piracicaba (SP) devido à maior água disponível para períodos de veranicos e melhor disponibilidade de nutrientes para a cultura de soja; e (v) a melhoria da resistência à penetração radicular do solo para níveis aceitáveis e de fertilidade (ausência de alumínio no perfil) são essenciais para melhorar o crescimento radicular, aumentando a exploração do perfil do solo e de produtividade, reduzindo o risco de perdas por veranicos para a cultura de soja.

REFERÊNCIAS

- ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. **Complexo soja**. Disponível em: <<http://www.abiove.org.br/site/index.php?page=estatistica&area=NC0yLTE=>>>. Acesso em: 20 abr. 2017.
- ALCARDE, J. A.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N.; et al., ed. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade brasileira de Ciência do Solo, p. 291-334, 2003.
- ALLEN, G. R.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998. 300 p.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo no ambiente subtropical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife, PE. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 22 p. CD ROM.
- BAILEY-SERRES, J.; VOESENEK, L. A. Flooding stress: Acclimations and genetic diversity. **Annual Review of Plant Biology**, California, v. 59, p. 313-339, 2008.
- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminum toxicity and resistance: a review, **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 48, n. 1, 2002.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 1612-1622, 2017.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J.A.L.; SAKO, H.; DANTAS, J.P.S.; MORAES, M.F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, Irã, 2018.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; SAKO, H.; SHIOZAKI, E. A. Incremento de produtividade de soja: redução do déficit hídrico associado à melhor distribuição e profundidade do sistema radicular. **Circular Técnica 1**, Comitê Estratégico Soja Brasil, Sorocaba, 2016. 14 p.
- BENIE, A. T. P. Growth and mechanical impedance. In: ESHEL, A.; BEECKMAN, T. **Plant Roots: The Hidden Half**. 2013. 848 p.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, N.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.N.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência a penetração e permeabilidade de Latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1 p. 167-177, 2001
- CAIRES, E. F., FONSECA, A. F., FELDHAUS, I. C., BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição de soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2001.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 132 p.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.1, p. 183-188, 1995.

CESB - Comitê Estratégico Soja Brasil. Online. Disponível em: <www.cesbrasil.org.br>. Acesso em: 14 out. 2016.

CESB - Comitê Estratégico Soja Brasil. **Publicações**. Disponível em: <<http://www.cesbrasil.org.br/case-campeao-regional-sudeste-safra-20152016/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

CIAGRO - Centro Integrado de Informações Agrometeorologias. Disponível em: <www.ciiagro.org.br>. Acesso em: 02 mai. 2018.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolos Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 317-326, 2004.

COELHO FILHO, M.; PEREIRA, F. A. C.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; OLIVEIRA, G. X. S. O processo de evapotranspiração. In: SOUSA, V. F.; A MAROUELLI, W.; COELHO, F. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa, p. 91-113, 2011.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Safras. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 20 abr. 2017

CORRALES, I. et al. Boron-induced amelioration of aluminum toxicity in a monocot and a dicot species. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 165, n. 5, 2008.

DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 98, p. 303-312, 1987.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. M. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2010. 353 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil**. Sistema de produção 16. Londrina: Embrapa, 2013. 266 p.

FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, p. 415-421, 2001.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. cap. 15, p. 261-278.

FATTORI JÚNIOR, I. M.; SILVA, E. H. F. M.; GONÇALVES, A. O.; MARIN, F. R. Soil volumetric moisture measured and estimated by the DSSAT/CROPGRO model in soybean cultivation. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Pernambuco, v. 2, n. 3, p. 294-301, 2017.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. 432p.

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. Época de semeadura de soja para a região de Dourados – MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 666-672, 2008.

FIGUEIREDO, S. M.; RODRIGUES, J. D.; CARNEIRO, J. P. C.; SILVA, A. A.; LIMA, M. B. Fisiologia e produção de soja tratada com cinetina e cálcio sob déficit hídrico e sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 11, p. 1432-1439, 2013.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo do que está por trás do que se vê**. Passo Fundo: UPF, 2008. 733p.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 947-953, 2003.

FOLONI, J. S. S.; DE LIMA, S. L.; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular de soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p. 49-57, 2006.

FREDDI, O. D. Cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31. n. 4, p. 627-636, 2007.

FREITAS, F. A.; KOPP, M. M.; SOUSA, R. O.; ZIMMER, P. D.; CARVALHO, F. I. F.; OLIVEIRA, A. C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 72-79, 2006.

FREITAS, J. G.; CANTARELLA, H.; CAMARGO, C. E. O efeito do calcário e do fósforo na produtividade de grãos e seus componentes nos cultivares de trigo. **Bragantia**, Campinas, v. 58, p. 1-8, 1999.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas, Potafos**, Piracicaba, n. 95, 2001.

GREGORY, P. J. Crecimiento y funcionamiento de las raíces. In: WILD, A. (Coord.). **Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel**. Madrid: Mundi-Prensa, p. 121-175, 1992.

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

HIRAKURI, M. H; LAZZAROTTO, J. J. **O agronegócio de soja nos contextos mundial e brasileiro** [recurso eletrônico]: / Marcelo Hiroshi Hirakuri, Joelsio José Lazzarotto – Londrina: Embrapa Soja, 2014. 70 p. – (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n. 349).

IBGE. **Produção Agrícola**. Disponível em:

<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/>>. Acesso em: 12 fev. 2018.

IJIMA, M.; KNO, Y. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokyo, v. 60, p. 130-138, 1991.

JESEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B. J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Transactions of the ASAE**, v. 14, p. 954-959, 1971.

KOPITTKE, P. M.; MOORE, K. L.; LOMBI, E.; GIANONCELLI, A.; FERGUSON, B. J.; BLAMEY, F. P. C.; MENZIES, N. W.; NICHOLSON, T. M.; MCKENNA, B. A.; WANG, P.; GRESSHOFF, P. M.; KOUROUSIAS, G.; WEBB, R. I.; GREEN, K.; TOLLENAERE, A. Identification of the primary lesion of toxic aluminum in plant roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 167, n. 4, p. 1402-1411, 2015.

KÖPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Económica. México: 1948. 479 p.

LÓPEZ-BUCIO, L.; NIETO-JACOBO, M. F.; RAMIREZ-RODRIGUES, V.; HERRERA-ESTELLA, L. Organic acids metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. **Plant Science**, Saint Louis, v. 160, n. 1, p. 1-13, 2000.

LYNCH, J. Root architecture and plant productivity. **Plant Physiology**, Rockville, v. 109, p. 7-13, 1995.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres. 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E. A Prática da calagem. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS, 1985, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 313-357.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora agronômica Ceres Ltda. 1980. 251 p.

- MARÍN-GARZA, T.; GÓMEZ-MERINO, F. C.; TREJO-TÉLLEZ, L. I.; MUÑOZ-OROZCO, A.; TAVITAS-FUENTES, L.; HERNÁNDEZ-ARAGÓN, L.; SANTACRUZ-VARELA, A. Respostas fisiológicas y nutrimentales de variedades de arroz a la concentración de alumínio. **Revista Fitotecnia Mexicana**, Chapingo, v. 33, n. 1, 2010.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Amsterdam: Elsevier. 1995. 889 p.
- MARTINS, F. B.; STRECK, N. A.; DA SILVA, J. C.; MORAIS, W. W.; SUSIN, MAVROSKI, M. C.; VIVIAN, M. A. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1297-1306, 2008.
- MATERECHERA, S. A.; ALSTON, A. M.; KIRBY, J. M.; DEXTER, A. R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 144, p. 297-303, 1992.
- MENOSSO, O. G.; COSTA, J. A.; ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Crescimento radicular e produção de ácidos orgânicos em cultivares de soja com diferentes tolerâncias ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1339-1345, 2001.
- MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.197-202, 1999.
- MITCHELL, R. L.; RUSSEL, W. J. Root development and rooting patterns of soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill) evaluated under field conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, p. 313-316, 1971.
- MORAES, M. T.; BENGOUGH, A. G.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. **Plant and Soil**, Netherlands, 2018.
- MORTVEDT, J. J. Needs for controlled-availability micronutrient fertilizers. **Fertilizer Research**, Nova Zelândia, v. 38, p. 213-221, 1994.
- MÜLLER, M. M. L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C. A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.531-538, 2001.
- NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 97-111, 2004.
- NOLLA, A.; SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Crescimento, morfologia radicular e liberação de compostos orgânicos por plântulas de soja em função da atividade de alumínio na solução do solo de campo natural. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 97-101, 2007.
- OLIVEIRA, F. A.; SFREDO, G. J.; CASTRO, C.; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e nutrição de soja. **Circular Técnica**, 50, Londrina: Embrapa, 2007.

OYA, T.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; TOBITA, S.; OSAMU, I. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars evaluation and characterization of the field. **Plant Productions Science**, London, v. 7, 2008.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. **Australian Journal of Soil Research**, v.29, p.717-728, 1991.

PEIXOTO, P. H. P.; PIMENTA, D. S.; CAMBRAIA, J. Alterações morfológicas e acúmulo de compostos fenólicos em plantas de sorgo sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 1, p. 17-25, 2007.

PETRERE, V. G.; TECHIO, J. W.; BRESSA, F. L.; CUNHA, T. J. F.; BRAGA, M. B. Estudos de toxidez de alumínio em genótipos de soja e milho cultivados em bioensaios. In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007.

PIVETTA, L. A.; CASTOLDI, G.; SANTOS, G.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and activity as affected by the production system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 79, p. 1547-1554, 2011.

PENMAN, H. L. Evaporation an introductory survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Netherlands, v. 1, p. 9-29, 1956.

POYSA, V.; WOODROW, L. Stability of soybean seed composition and its effect on soymilk and tofu yield and quality. **Food Research Internacional**, Canadá, v. 35, p. 337-345, 2002.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C.; PARADELA FILHO, O.; SUGIMORI, M. H.; GALLO, P. B. Relação entre os sintomas morfológicos externos de cafeeiro infectado pela *Xylella fastidiosa* e a porcentagem de obstrução dos vasos do xilema. In: I SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, Poços de Caldas, 2000. Anais... Brasília. Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, v. 1, p. 241-244, 2000.

RAIJ, B. van; MASCARENHAS, H. A. A. Efeito de calcário e de gesso para soja cultivada em Latossolo roxo ácido saturado com sulfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, p. 305-312, 1994.

RAPER, D. C.; BARBER, S. A. Rooting systems of soybean. I. Differences in root morphology among varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 581-584, 1970.

RIGHES, A. A. **Water uptake and root distribution of soybeans, grain sorghum and corn** [PhD Thesis]. Iowa: Iowa State University, 1980.

ROSOLEM, C. A.; MARCELLO, C. S. Crescimento radicular e nutrição mineral de soja em função da calagem e adubação fosfatada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 448-455, 1998.

ROSOLEM, C. A.; VALE, L. S. R.; GRASSI FILHO, H.; MORAES, M. H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, p. 491-497, 1994.

RUSSEL, R. S.; GOSS, M. J. Physical aspects of soil fertility: the response of roots the mechanical impedance. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 22, p. 305-318, 1974.

SAKO, H.; SOARES, J. E.; SILVA, L. A.; BALARDIN, R. Relações de enraizamento e cálcio no solo para alta produtividade da safra 15/16. **Boletim Técnico 1**, Comitê Estratégico Soja Brasil, Sorocaba, 2016a, 15 p.

SAKO, H.; ALVES, M.; MORAES, M. F.; TEIXEIRA, W. W. R.; LIMA, R. O.; SHIOZAKI, E. A. Fatores decisivos para se obter produtividade de soja acima de 4200 kg/ha. **Circular Técnica 2**, Comitê Estratégico Soja Brasil, Sorocaba, 2016b, 29 p.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2015. 333 p.

SENTELHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. 1998. 97 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, p. 1-18, 2015.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: **Funep**, p. 1-18, 2002.

SILVA, B. M.; DA SILVA, E. A.; DE OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 464-475, 2014.

SILVA, I. R.; SMYTH, T. J.; ISRAEL, D. W.; RAPER, C. D.; RUFTY, T. W. Magnesium is More Efficient than Calcium in Alleviating Aluminum Rhizotoxicity in Soybean and its Ameliorative Effect is not Explained by the Gouy-Chapman-Stern Model. **Plant Cell Physiology**, Oxford, v. 62, n. 7, 2001.

SILVA, M. S.; NAVES, M. M. V.; OLIVEIRA, R. B.; LEITE, O. S. M. Composição química e valor proteico do resíduo de soja em relação ao grão de soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, p. 571-576, 2006.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 253-260, 2001.

SINCLAIR, T. R.; MESSINA, C. D.; BEATTY, A.; SAMPLES, M. Assessment across the United States of the benefits of altered soybean drought traits. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, p. 475-482, 2010.

SINCLAIR, T. R.; PURCELL, L. C.; KING, C. A.; SNELLER, C. H.; CHEN, P.; VADEZ, V. Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N₂ fixation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 101, p. 68-71, 2007.

SINCLAIR, T. R.; LUDLOW, M. M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. **Australian Journal Plant Physiology**, Australia, v. 13, p. 319-340, 1986.

SMITH, M. Report on the expert consultation on revision of crop water requirements. Roma: FAO, 1991. 45p.

SMYTH, T. J.; CRAVO, M. S. Aluminum and calcium constraints to continuous crop production in a Brazilian amazon Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p. 843-850, 1992.

SOUZA, M. A. S.; SANTOUCY, S. G.; SILVA, D. R. G.; MAGALHÃES, E. N.; OLI VEIRA, G.; FAQUIN, V. **Efeito da compactação sobre a porosidade e condutividade hidráulica saturada do solo**. XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação - Universidade do Vale do Paraíba. 2011.

STONE, L. R.; TEARE, I. D.; MICKELL, C. D.; MAYAKI, W. C. Soybean root development and soil water depletion. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 677-680, 1976.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Netherlands, v. 19, p. 111-119, 1991.

THOMASSON, A. J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, Temuco, v. 29, p. 38-46, 1978.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

USDA. Unites States Department of Agriculture. Disponível em: <http://www.usda.gov>
Acesso em: 20 de jun.

VALE, F. Magnésio: importância e necessidades. **Informativo Técnico**, 2018.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Phosphate sorption in low activity clay soils. **Bragantia**, Campinas, v. 62, p. 111-118, 2003.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. **Soil Science**, Netherlands, v. 68, p. 75-94, 1949.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, Netherlands, v. 32, p. 181-193, 1931.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. **Soil Science**, Netherlands, v. 3, p. 498-513, 1927.

VITTI, G. C.; TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade de soja. In: CÂMARA, G. M. S., ed. **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2000. p. 383-422.

WEI, Z.; PAREDES, P.; LIU, Y.; CHI, W. W.; PEREIRA, L. S. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. **Agricultural Water Management**, Vienna, v.147, p. 43-53, 2015.

YANG, J. L.; YOU, J. F.; LI, Y. Y.; WU, P.; ZHENG, S. J. Magnesium an enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane H⁺-ATPase activity. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 48, p. 66-74, 2007.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, p. 1447-1454, 2016.

ZOU, C.; PENFOLD, C.; SANDS, R.; MISRA, R. K.; HUDSON, I. Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 236, p. 105-115, 2001.