

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**Crescimento de raízes de soja em resposta a variações químicas, físicas e biológicas
do solo**

Mariele Müller

Passo Fundo

2020

Mariele Müller

Crescimento de raízes de soja em resposta a variações químicas, físicas e biológicas do solo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção de título de Doutora em Agronomia.

Orientador:

Dr. Geraldo Luiz Chavarria Lamas Junior

Passo Fundo

2020

CIP – Catalogação na Publicação

M958c Müller, Mariele

Crescimento de raízes de soja em resposta a variações químicas, físicas e biológicas do solo [recurso eletrônico] / Mariele Müller. – 2020.

5.6 MB; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Luiz Chavarria Lamas Junior.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, 2020.

1. Solos – Análise. 2. Solos – Manejo. 3. Soja – Cultivo.
I. Lamas Junior, Geraldo Luiz, orientador. II. Título.

CDU: 631.4

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO



PPGAgro
Programa de Pós-Graduação
em Agronomia

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a tese

“Crescimento de raízes de soja em resposta a variações químicas, físicas e biológicas do solo”

Elaborada por

Mariele Müller

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
“Doutora em Agronomia – Área de Produção e Proteção de Plantas”

Aprovada em: 02/10/2020
Pela Comissão Examinadora

Dr. Geraldo Luiz Chavarría Lamas Junior
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador

Dr. João Augusto Lopes Pascoalino
Comissão examinadora - CESB

Dr. Vilson Antonio Klein
Comissão examinadora - UPF

Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi
Coordenador do PPGAgro

Dr. José Pereira da Silva Júnior
Comissão examinadora – Embrapa Trigo

Dr. Eraldo Lourenso Zanella
Diretor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária
Universidade de Passo Fundo

Dr. Thomas Martin
Comissão examinadora - UFSM

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Geraldo Chavarria, pelos conhecimentos e paciência durante o mestrado e doutorado. Muito obrigada por me orientar e confiar no meu trabalho.

Ao professor Dr. Vilson Klein e toda a equipe do laboratório Física do Solo, especialmente a Manuelli Zulpo, pela ajuda na realização das análises.

Ao Dr. José Pereira e toda a sua equipe, especialmente o Eliardo da Silva, pela ajuda na realização das análises biológicas do solo.

Ao Dr. Adriano Mendonça Souza, pelos ensinamentos sobre análise multivariada.

Ao Programa de Pós Graduação em Agronomia e Universidade de Passo Fundo, sou grata pela oportunidade que me proporcionaram.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de doutorado.

Ao grupo do laboratório de Fisiologia Vegetal, pela amizade e ajuda na condução dos experimentos.

Aos colegas, em especial, Jonas Manica e Julia Schneider, pela amizade e ajuda.

A todos que contribuíram e auxiliaram no meu crescimento pessoal e profissional, meu sincero agradecimento.

RESUMO

MÜLLER, Mariele. **Crescimento de raízes de soja em resposta a variações químicas, físicas e biológicas do solo.** 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

Condições ambientais afetam o rendimento das culturas e o déficit hídrico tem se destacado pelo impacto negativo sobre a produção de grãos da soja. Dessa forma, o crescimento radicial em maior volume e profundidade, pode ser uma alternativa para minimizar as perdas causadas pela falta de água. O conhecimento de como as raízes de soja se comportam perante os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, pode ajudar a estabelecer manejos que beneficiam o crescimento radicial em profundidade. O objetivo foi avaliar o crescimento de raízes de soja em resposta a variações químicas, físicas e biológicas no solo, em diferentes locais e profundidades do solo. Foram conduzidos seis experimentos em diferentes locais. Amostras de solo foram coletadas a cada 5 cm até 60 cm de profundidade, para análise química, física e biológica do solo. As raízes foram coletadas a cada 5 cm de profundidade até 45 cm de profundidade do solo. Os atributos químicos do solo avaliados, correspondem a análise completa padrão de laboratórios. Os atributos físicos avaliados foram a densidade relativa, porosidade do solo e resistência à penetração das raízes. Os atributos biológicos foram a biomassa microbiana, respiração basal e quociente metabólico. Das raízes, foi determinado o comprimento, área de superfície, diâmetro, volume, massa seca e raiz fina, média e grossa. Os seis locais apresentaram valores insatisfatórios de pH e matéria orgânica e apresentaram o fósforo, potássio e cálcio concentrados nos primeiros centímetros de profundidade do solo. A porosidade total do solo foi acima de $50 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mas a proporção de macroporos, microporos e criptoporos resultou em solos com resistência a penetração às raízes. A biomassa microbiana foi maior na superfície do solo quando comparada com camadas do solo mais profundas, no entanto, o quociente metabólico foi maior em profundidade, mostrando que os microrganismos em profundidade, apresentam baixa capacidade de incorporar carbono à biomassa microbiana. O crescimento radicial ocorreu em maior proporção na superfície do solo, possivelmente porque os atributos do solo que favorecem o crescimento da raiz estão concentrados nesse ponto.

Palavras-chave: 1. Produção de grãos. 2. Nutrientes. 3. Porosidade. 4. Biomassa microbiana. 5. Multivariada.

ABSTRACT

MÜLLER, Mariele. **Soybean root growth in response to soil chemical, physical, and biological variations.** 89 f. Thesis (Doctor in Agronomy) – University of Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

Environmental conditions affect agricultural production, and water deficit has been highlighted by the negative impact on soybean production. Thus, radical growth in greater volume and depth can be an alternative to minimize losses caused by lack of water. Knowledge of how soybean roots behave in view of soil chemical, physical and biological attributes can help establish managements that benefit root growth in depth. The objective was to evaluate the growth of soybean roots in response to chemical, physical, and biological variations in the soil, in different soil locations and depths. Six experiments were carried out in different locations. Soil samples were collected every 5 cm to 60 cm depth for chemical, physical and biological analysis of the soil. The roots were collected every 5 cm deep up to 45 cm deep in the soil. The chemical attributes of the evaluated soil correspond to the complete standard laboratory analysis. The physical attributes evaluated were relative density, soil porosity and resistance to root penetration. Biological attributes were microbial biomass, baseline respiration and metabolic quotient. From the roots, roots, length, surface, diameter, volume, dry matter, and fine, medium, and coarse root were determined. The six sites presented unsatisfactory values of pH and organic matter and presented phosphorus, potassium and calcium concentrated in the first centimeters of soil depth. The total porosity of the soil was higher than 50 m³/m³, but the proportion of macropores, micropores and cryptopores resulted in soils with resistance to penetration to the roots. Microbial biomass was higher on the soil surface when compared to deeper soil layers, however, the metabolic quotient was higher in depth, showing that microorganisms in depth have low capacity to incorporate carbon into microbial biomass. Radical growth occurred in a greater proportion on the soil surface, possibly because the soil attributes that favor root growth are concentrated at this time.

Key words: 1. Grain production. 2. Nutrients. 3. Porosity. 4. Microbial biomass. 5. Multivariate.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	11
2.1	<i>Crescimento radicial sob restrição hídrica.....</i>	<i>11</i>
2.2	<i>Atributos do solo e o crescimento radicial.....</i>	<i>15</i>
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1	<i>Tratamento e delineamento experimental.....</i>	<i>21</i>
3.2	<i>Atributos químicos do solo.....</i>	<i>23</i>
3.3	<i>Atributos físicos do solo.....</i>	<i>24</i>
3.4	<i>Atributos biológicos do solo.....</i>	<i>26</i>
3.5	<i>Crescimento de raiz.....</i>	<i>27</i>
3.6	<i>Análise estatística.....</i>	<i>28</i>
4	RESULTADOS.....	29
4.1	<i>Atributos químicos do solo.....</i>	<i>29</i>
4.2	<i>Atributos físicos do solo.....</i>	<i>38</i>
4.3	<i>Atributos biológicos do solo.....</i>	<i>47</i>
4.4	<i>Crescimento de raiz.....</i>	<i>49</i>
4.5	<i>Correlações entre os atributos do solo e o crescimento de raízes.....</i>	<i>56</i>
4.6	<i>Relação do crescimento de raízes com os atributos do solo pela análise de componentes principais.....</i>	<i>59</i>
5	DISCUSSÃO.....	65
6	CONCLUSÕES.....	75
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A produtividade da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] tem apresentado constante incremento no passar dos anos, principalmente devido às novas tecnologias e técnicas de manejo utilizadas. Eventualmente as condições ambientais afetam negativamente o rendimento das culturas, e o déficit hídrico é a condição ambiental que gera maior impacto negativo sobre a produção.

A água é absorvida pelas raízes, então fornecer condições adequadas para o crescimento radicial em volume e profundidade no solo, pode ser uma alternativa para diminuir o estresse causado pela falta de água, pois assim, as raízes irão explorar maior volume de solo, conseqüentemente estarão em contato com maior volume de água. A falta de água às plantas, ocasiona o fechamento dos estômatos e diminui a taxa fotossintética das plantas, causando prejuízos na produção de grãos da soja.

Os diferentes manejos adotados pelos agricultores resultam em características química, física e biológica distintas do solo, podendo apresentar reflexos no crescimento radicial das plantas. Geralmente, as restrições químicas ocorrem pela ausência de elementos essenciais e/ou presença de elementos tóxicos, a restrição física se dá principalmente pelo incremento da densidade do solo, que aumenta a resistência de penetração e pode diminuir a porosidade do solo e a biológica por afetar a quantidade de microrganismos no solo que são benéficos às plantas.

É importante compreender a plasticidade fenotípica de raízes, quanto ao ambiente de cultivo, pela razão do impacto que essa variável pode apresentar sobre a produção vegetal. Assim, avaliar o sistema radicial das culturas pode ajudar a compreender a interação solo-

planta-atmosfera, indicando quais as possíveis práticas de manejo que visam aumentar a exploração do solo pelas raízes e manter a estabilidade produtiva das culturas.

O uso intenso das áreas pode gerar problemas físicos, químicos e biológicos do solo, resultando em compactação, déficit nutricional e inibição biológica. Por meio desta pesquisa, busca-se entender o crescimento das raízes em solos que apresentam atributos químicos, físicos e biológicos distintos. O objetivo foi avaliar o crescimento de raízes de soja em resposta a variações químicas, físicas e biológicas no solo, em diferentes locais e profundidades do solo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Crescimento radicial sob restrição hídrica

A sustentabilidade do rendimento da soja é ameaçada por mudanças climáticas, sendo que eventos de restrição hídrica, estão tornando-se comuns em muitas partes do mundo (FOYER et al., 2016). Perante essa ameaça iminente à redução de alimento proteico, faz-se necessário, a seleção de cultivares de soja mais tolerantes à seca (FOYER et al., 2016). Recentes avanços na compreensão dos efeitos do déficit hídrico sobre o crescimento da soja, são predominantemente baseados na avaliação de características da parte aérea das plantas. Em contraste, os efeitos da restrição de água nas raízes da soja, têm sido menos estudados (KUNERT et al., 2016).

Melhorar o rendimento das plantas sob a seca é um grande desafio dos programas de melhoramento, normalmente focados na eficiência do uso da água, floração precoce e desenvolvimento vegetativo precoce (RICHARDS, 1996). Por exemplo, o controle das trocas gasosas pelos estômatos entre a folha e a atmosfera, pode tornar a planta mais eficiente no uso da água (VIALET-CHABRAND et al., 2017). Enquanto o crescimento mais vigoroso das plantas, garante maior interceptação de luz (MÜLLER et al., 2017) e maior assimilação líquida de carbono (WERADUWAGE et al., 2015). No entanto, além dessas estratégias, proporcionar condições para que as plantas desenvolvam um sistema radicial mais profundo, aumentando o contato com maior volume de solo, pode ser um mecanismo de adaptação fundamental das plantas à seca (RAO et al., 2016). Assim, otimizando a absorção de água e nutrientes (POLANIA et al., 2017).

Sob seca, a soja pode modificar a relação de massa seca aérea e raiz (THU et al., 2014). O déficit hídrico, não apenas altera a arquitetura das raízes, mas também a partição

da massa seca da raiz (FENTA et al., 2014). Estudos evidenciaram que raízes atingem maior massa de raiz em profundidade do solo sob estresse hídrico (ALI et al., 2016) e raízes que apresentam mais pelos radiciais, são vantajosas sob condições de seca (TANAKA et al., 2014; VADEZ, 2014). Os pelos radiciais aumentam a área de superfície total, o que facilita a extração de água e nutrientes para manter a fotossíntese (COMAS et al., 2013), em soja, foi encontrado 43% das raízes com diâmetro menor de 20 μ m, diâmetro esse, que configura os pelos radiciais (YAMAGUCHI, 2002).

Em soja, sob condições de déficit hídrico, o número de raízes laterais aumentou, mas nenhum incremento no comprimento e no diâmetro da raiz principal foi observado (READ; BARTLETT, 1972). A soja não irrigada apresentou aumento no comprimento de raiz, quando comparada com plantas irrigadas (HUCK et al., 1983). Foram observadas correlações positivas entre a resistência à seca com a massa seca, comprimento total, volume e número de raízes laterais em soja (READ; BARTLETT, 1972; LIU et al., 2005). Em soja, quando as plantas não foram irrigadas no final do vegetativo e início do reprodutivo, apresentaram aumento no crescimento radicial, especialmente nas camadas mais profundas do solo (MANAVALAN et al., 2009). O crescimento das raízes de soja foi menos afetado, quando a seca foi imposta no estágio de frutificação plena e cessou início do enchimento de grãos (HOOGENBOOM; JONES; BOOTE, 1992). Em outro estudo, foi observado que as plantas de soja, que são submetidas à seca antes da floração, apresentaram maior rendimento de grãos do que aquelas estressadas após a floração, porque já haviam desenvolvido um sistema radicial vigoroso, antes do florescimento (HIRASAWA et al., 1998). Isso mostra, que se uma planta desenvolve mais o sistema radicial durante o início de desenvolvimento vegetativo, estaria em vantagem para manter o turgor sob condições de seca, em relação às plantas com menor crescimento radicial.

É importante compreender a plasticidade fenotípica de raízes quanto ao ambiente de cultivo, pela razão do impacto que essa variável pode apresentar sobre a produção vegetal (POSTMA; SCHURR; FIORANI, 2014). Assim, avaliar o sistema radicial das culturas, pode ajudar a compreender a interação solo-planta-atmosfera, indicando quais as possíveis práticas de manejo visam aumentar a exploração do solo pelas raízes (BORDIN et al., 2008;

FAN et al., 2016) e manter a estabilidade produtiva das culturas (WHITE; KIRKEGAARD 2010; POLANIA et al., 2017). Mudanças climáticas, escassez de água e nutrientes, são condições abióticas que reduzem o rendimento das culturas. Uma forma de minimizar o impacto negativo desses fatores no rendimento, é criar um perfil de solo, o qual favorece a distribuição de raízes no solo, otimizando a absorção de água e nutrientes (POLANIA et al., 2017).

O sistema radicial das plantas está ligado diretamente na capacidade da planta em absorver água do solo e ao melhorar a capacidade de absorção de água do solo, também beneficia alguns processos fisiológicos das plantas. Entre esses processos fisiológicos, podemos citar a fixação de carbono, a absorção de elementos minerais do solo e a mobilização de produtos fitossanitários e consequente redução de fitotoxidez na planta, processos esses, que irão determinar o rendimento final das culturas.

A retenção de água na planta determina o turgor da mesma, impulsiona a expansão das células e regula os movimentos estomáticos (BLATT; CHAUMONT; FARQUHAR, 2014). Quase que na totalidade, a perda de água da planta ocorre nos estômatos das folhas, que tem a dinâmica de abrir para haver trocas gasosas, com objetivo de captar dióxido de carbono (CO₂) para a fotossíntese, e assim há o fluxo de água em toda a planta (BLATT; CHAUMONT; FARQUHAR, 2014). Por meio de sinais químicos emitidos pelas raízes, há o fechamento dos estômatos perante a falta de água no solo. Sabe-se que é o hormônio ácido abscísico (ABA) que induz o fechamento dos estômatos, reduzindo assim a perda de água pela transpiração e diminuindo a taxa fotossintética (EISENACH; ANGELI, 2017). Desta forma, sob reduções na disponibilidade hídrica, a formação de adenosina trifosfato (ATP) e fosfato de dinucleótido de nicotinamida e adenina (NADPH) diminui e consequentemente menos CO₂ é fixado pelas plantas (SOUZA et al., 2005; YANG et al., 2014).

A produção sustentável das culturas agrícolas, é um desafio perante o continuo aumento na demanda por alimentos (HUNTER et al., 2017) e a dependência de fertilizantes químicos, provenientes de combustíveis fósseis finitos e reservas minerais, é a prova desse desafio (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). Apenas 50% do fertilizante aplicado

nos solos, são adquiridos pelas raízes das culturas, mostrando ser um processo ineficiente e insustentável (PASK et al., 2012). De acordo com Duncan e Baligar (1991) as plantas podem ser mais eficientes na aquisição de nutrientes por meio da morfologia das raízes, sendo elas: alta relação raiz/parte aérea, em condições de deficiência de nutrientes; maior distribuição lateral e vertical de raízes; mais pelos radiciais, especialmente sob estresse; eficiência fisiológica de absorção de nutrientes; geração de redutores e quelantes; extensão do sistema radicial, por associações com micorrizas; associação com organismos fixadores de N₂ atmosférico; longevidade de raízes e habilidade de raízes em modificar a rizosfera, para evitar toxidez ou deficiência de nutrientes.

A planta absorve água em forma de solução do solo, então quando os estômatos fecham, diminui o fluxo de água no xilema e reduz ou cessa a entrada de solução do solo na planta (ARVE et al., 2011; OSAKABE et al., 2014). Ainda, com os estômatos fechados há redução na concentração de ATP e na falta desta molécula, ocorre redução na atividade de absorção ativa de nutrientes e água (GRIFFITHS; LARRY, 2020). Desta forma, plantas podem apresentar sintomas de deficiência nutricional, pois os nutrientes, dependem da taxa de transpiração, para serem absorvidos pela planta.

Além das vantagens já citadas de um sistema radicial vigoroso, a eficiência de um produto fitossanitário pode ser melhorada, ou seus efeitos nocivos podem ser abrandados. Isso, porque a aplicação de produtos fitossanitários, pode causar fitotoxidez nas plantas (BAIBAKOVA et al., 2019) e alterações no seu metabolismo (VENANCIO et al., 2003), como no processo fotossintético (PETIT et al., 2012), transpiração, biomassa das plantas e conteúdo total da clorofila (BAIBAKOVA et al., 2019). Desta forma, os fungicidas são considerados compostos xenobióticos, pois são substâncias aplicada exogenamente, que provocam reações na planta. Esse efeito de fitotoxicidade, pode ser potencializada quando o fungicida é aplicado sob condições de estresse hídrico (PEDERSON, 2007). Desta forma, quando a gota pulverizada entrar em contato com a folha, a baixa concentração de água no interior da folha, ocasionará uma maior difusão do fungicida para o interior da folha e com a baixa circulação de água na planta, a alta concentração do produto na célula causará maior dano fitotóxico (MADALOSSO et al., 2014). É por isso, que a eficácia de herbicidas

aplicados sob condições de déficit hídrico é reduzida, por apresentar baixa absorção e translocação do produto (ZANATTA et al., 2008) e para os fungicidas a fitotoxidez pode aparecer (ZUNTINI et al., 2019).

Desta forma, observar-se que o crescimento radicial mesmo que pouco estudado em relação a parte aérea das plantas, tem grande importância para o sistema produtivo. Apresenta relação direta com a absorção de água e nutrientes do solo, o que está diretamente ligado ao sistema fisiológico das plantas, que será responsável pelo rendimento final das culturas. Assim, a compreensão do crescimento radicial, perante as condições de solo em que são submetidas, é necessário para poder melhorar o sistema produtivo.

2.2 Atributos do solo e o crescimento radicial

As condições químicas, físicas e biológicas do solo, definem um ambiente de produção que pode condicionar alto potencial produtivo. Entre eles, a fertilidade, que representa a fonte de nutrientes às plantas, a profundidade do solo, que representa o espaço físico que a raiz tem para crescer, a textura, que se relaciona com os teores de matéria orgânica do solo e a disponibilidade de água, que está intimamente relacionada com a solução do solo (PRADO, 2008).

A distribuição dos nutrientes no solo é bastante variável e a quantidade e a mobilidade dos nutrientes, podem influenciar no comportamento das raízes (SILVA; DELATORRE, 2009). O fósforo (P) é um nutriente que possui baixa mobilidade e concentra-se nas camadas superficiais do solo. Acredita-se, que os pelos radiciais são desenvolvidos para a absorção do P, pois expandem a área de absorção pelo aumento do volume do solo explorado (BROWN et al., 2013). O P participa de muitos processos metabólicos, como na transferência de energia, fotossíntese, respiração, síntese de ácidos nucléicos e glicose (MUKHERJEE, 2014), assim a oferta adequada de P, promove o crescimento das raízes e aumenta a quantidade de nutrientes absorvidos (ROSE et al., 2010; MUKHERJEE, 2014). Fageria e Stone (2006) relataram que a massa seca de raiz foi

reduzido em 62% no arroz, 74% no feijão, 50% no milho e 21% na soja, sem adição de P no solo, comparado ao P adequado.

O potássio (K) favorece o crescimento das raízes por participar do suprimento e transporte de açúcares (KANAI et al., 2011; SINGH; REDDY, 2016), além de atuar no processo fotossintético, por controlar a condutância estomática (GERARDEAUX et al., 2009). A presença de K no solo, está relacionada com a distribuição do sistema radicial, influenciando a morfologia das raízes, principalmente na biomassa e comprimento de raízes finas (WANG et al., 2016). A deficiência de K, reduziu o crescimento radicial em 30% em feijão, 12% em milho e 11% em soja (BALIGAR; FAGERIA; ELRASHIDIT, 1998). Silberbush e Barber (1984) relataram, que a soja absorveu 80% de P e 54% K nos primeiros 15 cm de profundidade do solo. Isso ocorre, porque esses nutrientes estão concentrados na superfície do solo e então as raízes se desenvolvem nessa camada.

A falta de cálcio (Ca), afeta o crescimento da raiz nos meristemas apicais (LEITÃO et al., 2019), paralisa seu crescimento, causa escurecimento e até a morte da raiz (FERNANDES, 2006). O Ca atua na estruturação da planta, compondo a parede celular, no solo, tem atuação reduzindo a acidez do solo e a toxidez de alumínio, cobre e manganês (HOSSAIN et al., 2014). Assim, o não atendimento das exigências desse mineral nas plantas provoca inibição da extensão celular, sobretudo as radiciais, que são as primeiras a cessar o crescimento (FAGERIA; MOREIRA, 2011; BALZERGUE et al., 2017).

O enxofre (S) apresenta na planta reações de oxidação-redução, atributo esse, que o torna fundamental no metabolismo das plantas, além do mais, o S é constituinte de alguns aminoácidos e coenzimas (BLOEM; HANEKLAUS; SCHNUG, 2015). A limitação de S às plantas de soja, pode afetar o rendimento e a qualidade do grão da soja, pela participação do S na síntese de proteína (IBAÑEZ et al., 2020). A aplicação de enxofre elementar, aumentou o número de raízes laterais da soja em 8,6% para 33,2% e a massa seca em 6,6% para 34,3% e aumentou a produção de soja por planta em 7,3% para 12,8% (ZHAO et al., 2008).

Embora os micronutrientes sejam necessários em pequenas quantidades às culturas, sua influência pode ser tão grande, quanto a dos macronutrientes na produção das plantas. Micronutrientes, normalmente catalisam processos redox, pela transferência de elétrons, como os elementos de transição cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e molibdênio (Mo) e formam complexos por acoplamento de enzimas com substratos Fe e Zinco (Zn), ou atuam em reações enzimáticas, influenciando as configurações moleculares entre enzima e substrato Zn (FAGERIA, 2002). Por exemplo, o Zn está associado a distúrbios no metabolismo das auxinas, que é responsável pela promoção do enraizamento (ALMEIDA; RODRIGUES, 2016).

Além dos nutrientes, existem outros parâmetros químicos do solo que estão ligados ao crescimento radicial, como o teor da matéria orgânica (MO) do solo, que afeta a arquitetura da raiz e a absorção de nutrientes (PAN et al., 2018) devido aos efeitos benéficos à física, química e biologia do solo (ZANDONADI et al., 2014; CORREA et al., 2019). A capacidade de troca de cátions (CTC), é a quantidade de cargas negativas que o solo possui e conseqüentemente, a capacidade de adsorver elementos de carga positiva, sendo a argila e a MO, as principais fontes da CTC do solo (CARMO; LIMA; SILVA, 2016). E ainda, o potencial hidrogeniônico (pH) que altera a capacidade de absorção de nutrientes, podendo levar a deficiência mineral ou toxicidade por metais como o Alumínio (Al) (GENTILI et al., 2018).

Entre os manejos adotados para melhorar a química do solo, a aplicação de calcário tem se mostrado eficaz na resposta do rendimento das culturas. As necessidades de calcário, são determinadas pelo material de calagem, estado de fertilidade do solo, espécies de planta, práticas de manejo de culturas e considerações econômicas. A calagem, aumenta o pH do solo, Ca e magnésio (Mg) e reduz as concentrações de Al na solução do solo. Beneficia as populações microbianas e a concentração de P na solução do solo, pela redução da imobilização de P (LWIN et al., 2018; RAHMAN et al., 2018).

A resposta da planta perante a presença de Al no solo, é imediata, sendo que o Al inibe a expansão e alongação das células das raízes e depois, inibe a divisão celular

(RAHMAN et al., 2018). O sítio da toxicidade do Al, localizado no ápice da raiz, pode causar injúrias na parede celular, na membrana plasmática, no citoesqueleto e até no núcleo celular (HARTWIG et al., 2007). Assim, os efeitos fitotóxicos de Al em raízes, incluem reduções no rendimento de matéria seca, o número e comprimento das raízes laterais, e normalmente, as raízes apresentam maior diâmetro médio (BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 2002). Desta forma, pelo menor volume de raízes explorando o solo, o Al afeta negativamente a absorção de nutrientes como P, Ca e Mg (RAHMAN et al., 2018).

Existe uma interação entre os atributos do solo, por exemplo, a modificação da química do solo pela calagem, pode afetar as propriedades físicas do solo (GONÇALVES; ROCHA; MAEDA, 2015). O ciclo de carbono e nutrientes do solo, são influenciados pela estrutura do solo, que altera a capacidade de estocar água, a presença de gases, a resistência à penetração das raízes e a erosão do solo (SALTON et al., 2008). A influência da MO na agregação do solo, é um processo dinâmico, em que os efeitos benéficos estão associados com a intensificação da atividade microbiana, resultando em produtos que desempenham função na formação e estabilidade dos agregados (ZHOU et al., 2020). A agregação do solo tem respaldo na densidade, porosidade, aeração do solo e na capacidade de retenção e infiltração de água no solo. São importantes para controlar propriedades biológicas, por meio da porosidade formada entre as partículas primárias aderidas umas às outras (GARCIA; ROSOLEM, 2010; NASCENTE; LI; CRUSCIOL, 2015).

Os componentes físicos do solo, normalmente são consequência da densidade do mesmo, pois maior densidade do solo, resulta em solo compactado, que aumenta a resistência à penetração das raízes (BENGOUGH et al., 2011), reduz o volume de solo explorado pelas raízes e conseqüentemente, diminui o contato das raízes com a solução do solo (VALENTINE et al., 2012). Dessa forma, a compactação do solo pode ocasionar sistema radicial superficial e raízes mal formadas, devido ao aumento da resistência mecânica à penetração das raízes, além da redução na taxa de infiltração e disponibilidade de água e oxigênio às plantas (LYNCH; WOJCIECHOWSKI; 2015; VALADÃO et al., 2015), podendo afetar negativamente a produtividade das culturas (FAGUNDES; SILVA; BONFIM-SILVA, 2014). Conforme Klein (2014), a densidade dos solos agrícolas, pode

variar de 0,9 a 1,8 g/cm³. Em solo Argissolo Vermelho distrófico típico, culturas de cobertura apresentaram deformações na morfologia das raízes na faixa de densidade de 1,75 e 1,85 g/cm³, enquanto que acima de 1,85 g/cm³, houve um grande engrossamento das raízes, crescimento vertical e concentração na camada mais superficial (REINERT et al., 2008).

A compactação do solo modifica a aeração e umidade do solo, bem como o pH e a disponibilidade de nutrientes orgânicos e inorgânicos, são atributos físicos e químicos que influenciam a presença de microrganismos no solo, podendo ser pelo efeito isolado ou somatório de dois ou mais atributos (PEREIRA et al., 2000). Estima-se que as plantas disponibilizam até 30% dos fotossintatos aos fungos micorrízicos (DRIGO et al., 2010; GOUGOULIAS; CLARK; SHAW, 2014). No entanto, em troca desses fotossintatos, os microrganismos disponibilizam nutrientes às plantas.

A principal fonte de nitrogênio (N) à cultura da soja, é por meio da fixação biológica de N₂. Processo realizado por várias espécies de bactérias que habitam o solo e dentre essas bactérias, o gênero *Bradyrhizobium* se destaca por se associar simbioticamente às plantas, formando nódulos (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2001). Desta forma, o uso do *Bradyrhizobium* como inoculante, é atualmente uma tecnologia indispensável para a cultura da soja no Brasil (ZILLI; CAMPO; HUNGRIA, 2010).

Além de disponibilizar N, os microrganismos do solo são essenciais nos processos de solubilização e mineralização de P no solo. Os microrganismos, incrementam a área superficial de raízes pela extensão do sistema radicial, pelas associações micorrízicas e promovem o crescimento de raízes laterais e pelos radicias por meio de fito-hormônios. Ainda, transferem íons fosfato para a solução do solo e aumentam a mobilidade de formas orgânicas de P, além de solubilizar e mineralizar o P de formas poucas disponíveis de P inorgânico e orgânico (MENDES; REIS JÚNIOR, 2003).

As raízes que permanecem no solo após a colheita das plantas, melhoram o teor de MO do solo, contribuem para o ciclo de N e atividade microbiana do solo (ADAMCZYK et al., 2019; GMACH et al., 2020), fornecendo quantidades significativas de carbono e nitrogênio ao solo. Desta forma, as raízes têm importante papel na quantidade e atividade

dos microrganismos do solo (MASSENSINI et al., 2014). A contribuição das raízes ao aporte orgânico das culturas no solo é de 23 a 45% da matéria seca da parte aérea, conforme a cultura e o manejo utilizado (PRAKASH et al., 2002). Em Latossolo Vermelho distroférico foram realizadas coletas de solos por meio de anéis volumétricos, de 0 a 1 m de profundidade, as coletas foram realizadas na linha e entrelinhas de semeadura. Dessa forma, o acúmulo total de matéria seca das raízes de soja até 1 m de profundidade foi de 1,94 Mg/ha em semeadura direta, que proporcionou aporte de C de 0,61 Mg/ha (BORDIN et al, 2008). O problema é que a maior parte da biomassa das raízes de culturas anuais está localizado de 0 a 20 cm de profundidade do solo, possivelmente porque existem limitações para o crescimento mais profundo.

O conhecimento da dinâmica de crescimento da raiz, pode ajudar a melhorar a produtividade das culturas em agroecossistemas, tornando as plantas mais eficiente na aquisição de água e nutrientes. O estudo das raízes das plantas é uma das áreas de pesquisa mais promissoras, devido a importância que tem para a estabilidade de produção e por ser pouco explorada. A parte aérea das plantas receberam maior atenção e estudo, enquanto a parte subterrânea foi de certa forma negligenciada, provavelmente devido à dificuldade de observar e amostrar o sistema radicial (SILVA-OLAYA; PELLEGRINO; CERRI, 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Tratamento e delineamento experimental

A cultivar utilizada nos experimentos foi DM 53i54 IPRO. Os experimentos foram conduzidos na safra de 2017/2018 e 2018/2019, em três locais cada ano, totalizando seis locais (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição dos seis experimentos conduzidos em diferentes locais.

Experimento	Safra	Município	Local
Local 1	2017/2018	Coxilha	Sementes Butiá
Local 2	2017/2018	Coxilha	Sementes Butiá
Local 3	2017/2018	Passo Fundo	UPF
Local 4	2018/2019	Coxilha	Sementes Butiá
Local 5	2018/2019	Coxilha	Sementes Butiá
Local 6	2018/2019	Passo Fundo	UPF

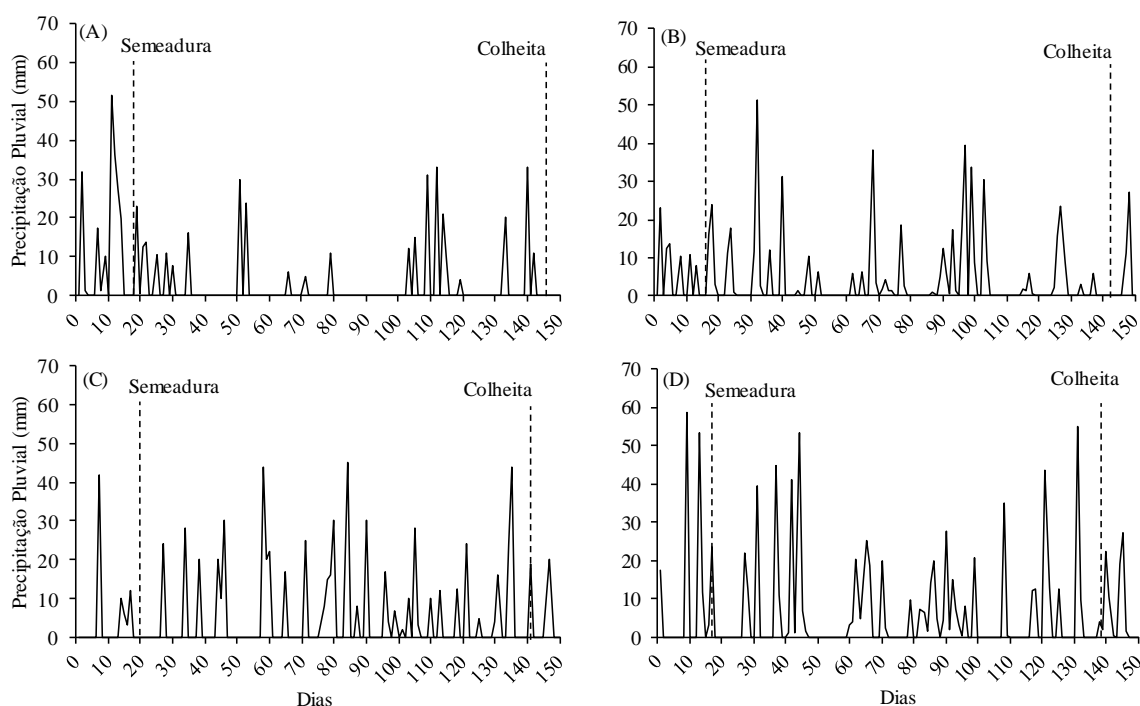
Os locais do município de Coxilha (S 28°07', O 52°17' e 721 m de altitude) foram em diferentes talhões, por isso não foram considerados como uma repetição e sim locais distintos. Da mesma forma, os locais do município de Passo Fundo (S 28° 12', O 52° 23' e 667 m de altitude) foram em diferentes talhões, sendo considerados locais distintos. Em todos os locais o clima é do tipo fundamental úmido, conforme classificação de Köpen e o solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico húmico (STRECK et al., 2008).

Os **Locais 1, 2, 4 e 5** são áreas manejadas com rotação de culturas, principalmente com as espécies, aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), trigo (*Triticum* spp.), capim-sudão (*Sorghum sudanense*), soja e milho (*Zea mays*). No ano de 2016 os **Locais 1 e 4** foram

subsolados. Os **Locais 3 e 6** são áreas manejadas com sucessão de culturas, sendo trigo no inverno e soja no verão.

A semeadura nos seis locais foi realizada com semeadora de facão afastado. A semeadura no **Local 1 e 2** foi realizada dia 17/10/2017, no **Local 3** foi realizada dia 03/11/2017, no **Local 4 e 5** foi realizada dia 13/10/2018 e no **Local 6** foi realizada dia 05/11/2018. No **Local 1, 2, 4 e 5** a semeadura foi realizada com adubação de base de 15 kg/ha de N, 87 kg/ha de P₂O₅ e 21 kg/ha de K₂O, antes da semeadura foi aplicado 200 kg/ha de cloreto de potássio (KCl) no solo a lanço. No **Local 3 e 6** a adubação na semeadura foi de 6 kg/ha de N, 60 kg/ha de P₂O₅ e 60 kg/ha de K₂O.

Figura 1 – Precipitação pluvial durante o ciclo da soja nos experimentos.



Locais 1 e 2 (A), Local 3 (B), Locais 4 e 5 (C) e Local 6 (D).

Fonte: Informações coletadas na propriedade dos experimentos de **Locais 1, 2, 4 e 5** e na Embrapa Trigo (2020) para os **Locais 3 e 6**.

No **Local 3 e 6** as parcelas tinham 10 m de comprimento e 10 linhas de semeadura, com cinco repetições, as repetições estavam lado a lado. Nos **Locais 1, 2, 4 e 5** as parcelas

eram de 15 m de comprimento e 10 linhas de semeadura com cinco repetições, as repetições estavam na sequência das linhas de semeadura.

A densidade de plantas nos seis locais foi de 10,8 plantas/m, totalizando 240 mil plantas/ha, com espaçamento entre linhas de 0,45 m. Em todos os locais é consolidado o sistema de plantio direto. Foi utilizada a escala fenológica de Fehr e Caviness (1977) para determinação dos estádios fenológicos da soja. A precipitação pluvial acumulada durante o ciclo foi de 360,8 mm nos **Locais 1 e 2**, 537,8 mm no **Local 3**, 688,2 mm nos **Locais 4 e 5** e 783,7 mm no **Local 6** (Figura 1).

3.2 Atributos químicos do solo

Para avaliação dos atributos químicos do solo (Tabela 2), foi coletado solo na linha de semeadura até 60 cm de profundidade e em camadas de 5 cm, totalizando 12 amostras por trincheira (Figura 2).

Tabela 2 – Métodos utilizados para a determinação dos atributos químicos do solo.

Atributo químico do solo	Unidade	Método de análise
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	Água 1:1
Fósforo (P); Potássio (K)	mg/dm ³	Mehlich I
Matéria orgânica (MO)	%	Digestão úmida
Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Alumínio (Al)	- cmol _c /dm ³	KCl 1 mol/L
Manganês (Mn); Zinco (Zn); Cobre (Cu)	mg/dm ³	KCl 1 mol/L
Enxofre (S)	mg/dm ³	CaHPO ₄ 500 mg/L de P
Boro (B)	mg/dm ³	Água quente

Figura 2 – Coleta de solo na linha de semeadura, para análise química, física e biológica.



Fonte: Autor

3.3 Atributos físicos do solo

O solo foi coletado na linha de semeadura até 60 cm de profundidade e a cada 5 cm de profundidade. Foram coletadas amostras de solo deformado e estrutura preservada (Figura 3).

Figura 3 – Coleta de solo com estrutura preservada com auxílio de um extrator acoplado a cilindros volumétricos.



Fonte: Autor

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). Foi utilizado 40 g de solo seco em estufa 105 °C e peneirado em peneira de malha 2 mm. Em seguida, em um vidro de 600 mL foi adicionado 100 mL de solução Calgon que consiste em hexametáfosfato de sódio + hidróxido de sódio ($\text{Na}_2\text{PO}_6 + \text{NaOH}$) e 250 mL de água,

essa mistura foi agitada mecanicamente por 15 horas a 295 rpm. Após agitação, a amostra foi peneirada em malha 0,053 mm para reter toda a areia, então o restante foi colocado numa proveta e foi completado com água até 1 litro. Imediatamente após a agitação manual, foi realizado uma pipetagem de 25 mL, que correspondia a fração de silte + argila e o momento da segunda pipetagem de 25 mL, foi determinado conforme a temperatura da suspensão, para então determinar a fração silte (KLEIN, 2014).

Os cilindros volumétricos para a coleta de solo com estrutura preservada, tinham aproximadamente 5 cm de diâmetro e altura. Os cilindros com o solo foram colocados em estufa 105 °C até atingirem massa constante, após foram pesados para obter o valor da massa seca do solo. Assim, por meio do quociente da massa seca do solo pelo volume do cilindro, determinou-se a densidade do solo (DS) (EMBRAPA, 1997).

A densidade relativa do solo, consiste na divisão da DS pela densidade máxima do solo (DS_{máx}). A densidade máxima do solo foi determinada em função do teor de argila (MARCOLIN; KLEIN, 2011).

Em balões volumétricos de 50 mL, foi colocado aproximadamente 20 g de solo seco. O volume restante do balão foi preenchido com álcool etílico. Pela diferença entre o volume do balão e o volume de álcool adicionado foi determinado a densidade dos sólidos (EMBRAPA, 1997).

Para determinar a umidade do solo na capacidade de campo (CC), os cilindros com o solo saturado foram dispostos em funis de Haines, no potencial de 6 kPa (60 cm). Depois que a umidade estava constante, os cilindros foram pesados e levados à estufa a 105 °C. Desta forma, foi possível determinar a umidade gravimétrica do solo e quando multiplicada pela DS, obteve-se a umidade volumétrica (KLEIN, 2014). O ponto de murcha permanente (PMP), foi determinado por meio de equação que considera o teor de argila do solo (KLEIN et al., 2010).

A porosidade total foi determinada pela equação proposta por Embrapa (1997). Os poros foram classificados em macroporos (> 0,05 mm), microporos (0,05 - 0,0002 mm) e

criptoporos ($<0,0002$ mm) e determinados por meio de tensões crescentes em funis de placa porosa. Na tensão de 6 kPa determinou-se os macroporos (Embrapa, 1997) e os criptoporos (1500 kPa - 150m) foram determinados por meio da equação que considera o teor de argila do solo (KLEIN et al., 2010). Os microporos foram determinados pela diferença entre as tensões de 6 e 1500 kPa.

A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com velocidade constante de 0,17 mm/s, equipado com uma célula de 200 N e haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30° e os dados coletados a cada segundo de penetração.

3.4 Atributos biológicos do solo

Foi avaliada a biomassa microbiana e a respiração basal do solo, utilizando a metodologia de colorimetria desenvolvida por Bartlett e Ross (1988). Para avaliar a biomassa microbiana, foi colocado 20 g de solo em frasco de vidro Snap-Cap transparente e fumigada em dessecador acoplado a uma bomba de vácuo, contendo um frasco béquer de 50 mL com 25 mL de clorofórmio livre de álcool (CHCl_3). As amostras foram mantidas no dessecador por 48h, no escuro e temperatura de 25 ± 2 °C. Foi colocado 50 mL de sulfato de potássio (K_2SO_4) e agitado por 1 hora a 200 rpm. Então as amostras foram filtradas. Em um balão volumétrico foi preparado a solução de trabalho com pirofostafa ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$), ácido sulfúrico (H_2SO_4), permanganato de potássio (KMnO_4) e sulfato de manganês (MnSO_4). O ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) foi utilizado como a solução padrão de carbono, para a obtenção da equação. Desta forma, em placas de ELISA foi colocado 50 μL de amostra, 50 μL de água, 50 μL de solução de trabalho 50 μL de ácido sulfúrico. A leitura foi realizada no espectrofotômetro a 495 nm. O carbono da biomassa microbiana foi calculado pela diferença entre o dióxido de carbono (CO_2) liberado das amostras fumigadas (F) e amostras não fumigadas (NF), utilizando o fator de correção de 0,41 (ANDERSON; DOMSCH, 1978). Os dados de carbono da biomassa microbiana foram expressos em mg C/kg solo.

Para a respiração basal, alíquotas de solo foram incubadas em frascos de vidro providos com tampa vedante. Para absorver o CO₂ liberado pelo solo, continha no interior do frasco um béquer com 10 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH (1 mol/L)). Após cinco dias de incubação no escuro e temperatura de 25 ± 2 °C, retirou-se o béquer e o CO₂ contido no NaOH foi precipitado com a adição de 2 mL de cloreto de bário (BaCl₂), e titulou-se o excedente de NaOH com a solução de ácido clorídrico (HCl (0,5 mol/L)), usando como indicador a fenolftaleína (C₂₀H₁₄O₄).

O quociente metabólico foi obtido pela relação entre a respiração basal e o carbono da biomassa microbiana (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

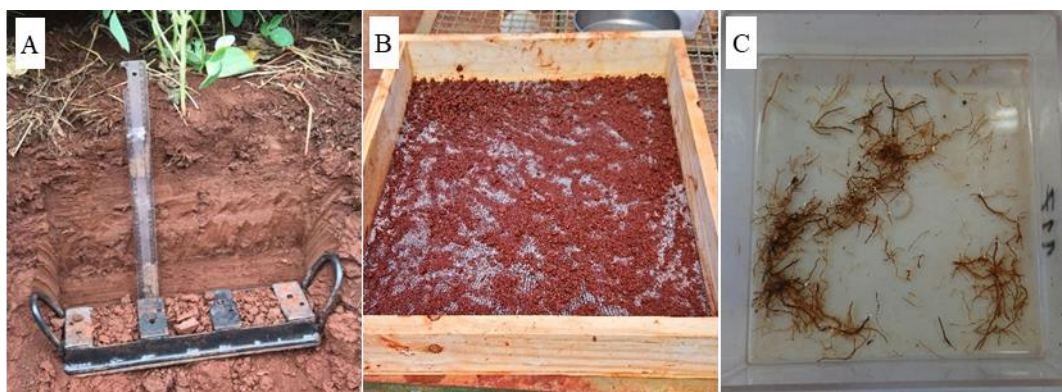
3.5 Crescimento de raiz

No estágio R5 foram feitas trincheiras para a coleta de solo e raízes das plantas, sendo uma trincheira por repetição, totalizando 10 trincheiras. As raízes foram coletadas com uma estrutura de ferro que apresentava dimensões de 45 cm x 9,25 cm x 5 cm de comprimento, largura e profundidade, respectivamente (Figura 4). Essas dimensões foram determinadas de acordo com o espaçamento entre linhas (45 cm) e a densidade de plantas de 240 mil plantas, que representa o espaçamento entre plantas na linha de 9,25 cm. As raízes foram coletadas até 45 cm de profundidade e em camadas de 5 cm, totalizando nove amostras por trincheira.

As trincheiras eram na transversal das linhas de semeadura, assim as coletas das raízes, foram realizadas da metade de uma entrelinha até a outra metade da entrelinha (45 cm). A separação do solo das raízes, foi realizada por meio de lavagem com água corrente. Foi utilizado peneira de malha 0,7 mm para não haver perda de raízes muito finas e utilizadas pinças para retirar todas as raízes da peneira. Após este procedimento as raízes foram analisadas com o auxílio do Software WinRhizo[®], determinando o comprimento (m), volume (m³/ha), raiz fina (m), média (m) e grossa (m), área de superfície (cm²) e diâmetro de raiz (mm). A classificação de raiz fina, média e grossa foi de 0 - 0,5, 0,5 - 2 e 2 - 4,5 mm, respectivamente e representam quanto do comprimento total das raízes apresentavam esses diâmetros. Essas raízes foram secas em estufa a 65 °C para determinação de massa seca

(kg/ha). Os dados de volume e massa seca de raiz foram transformados para hectare, considerando que o volume coletado de solo com raízes foi de 0,00208 m³.

Figura 4 – Estrutura utilizada para coleta das raízes, lavagem das raízes e amostras prontas para serem analisadas.



Estrutura metálica utilizada para coletar o solo com as raízes (A), peneira utilizada para lavagem das raízes (B) e amostra depois de lavada (C).

Fonte: Autor

3.6 Análise estatística

Foi realizada a média para os atributos químicos, físicos, biológicos e crescimento de raízes. Essas médias foram apresentadas em forma gráfica para cada profundidade do solo avaliada. Para avaliar a interação dos atributos do solo com o crescimento das raízes, foi realizada correlação de Pearson a 5% de probabilidade de erro. Os atributos que apresentaram correlação com o crescimento radicial, foram utilizadas nas análises de componentes principais, para explicar a maior parte da variação dos dados e determinar quais atributos químicos e físicos do solo que mais interferem no crescimento das raízes. A análise de componentes principais com todos os atributos do solo, foi realizada com os atributos que fizeram parte do componente principal 1 e 2 das análises individuais, mais os atributos biológicos que apresentaram correlação com o crescimento radicial, utilizando o software Statistica[®]. As variáveis de crescimento radicial foram consideradas variáveis suplementares na análise de componentes principais, com o intuito de verificar o seu comportamento em relação as demais, sem que estas fizeram parte da análise inicial (VICINI et al., 2018).

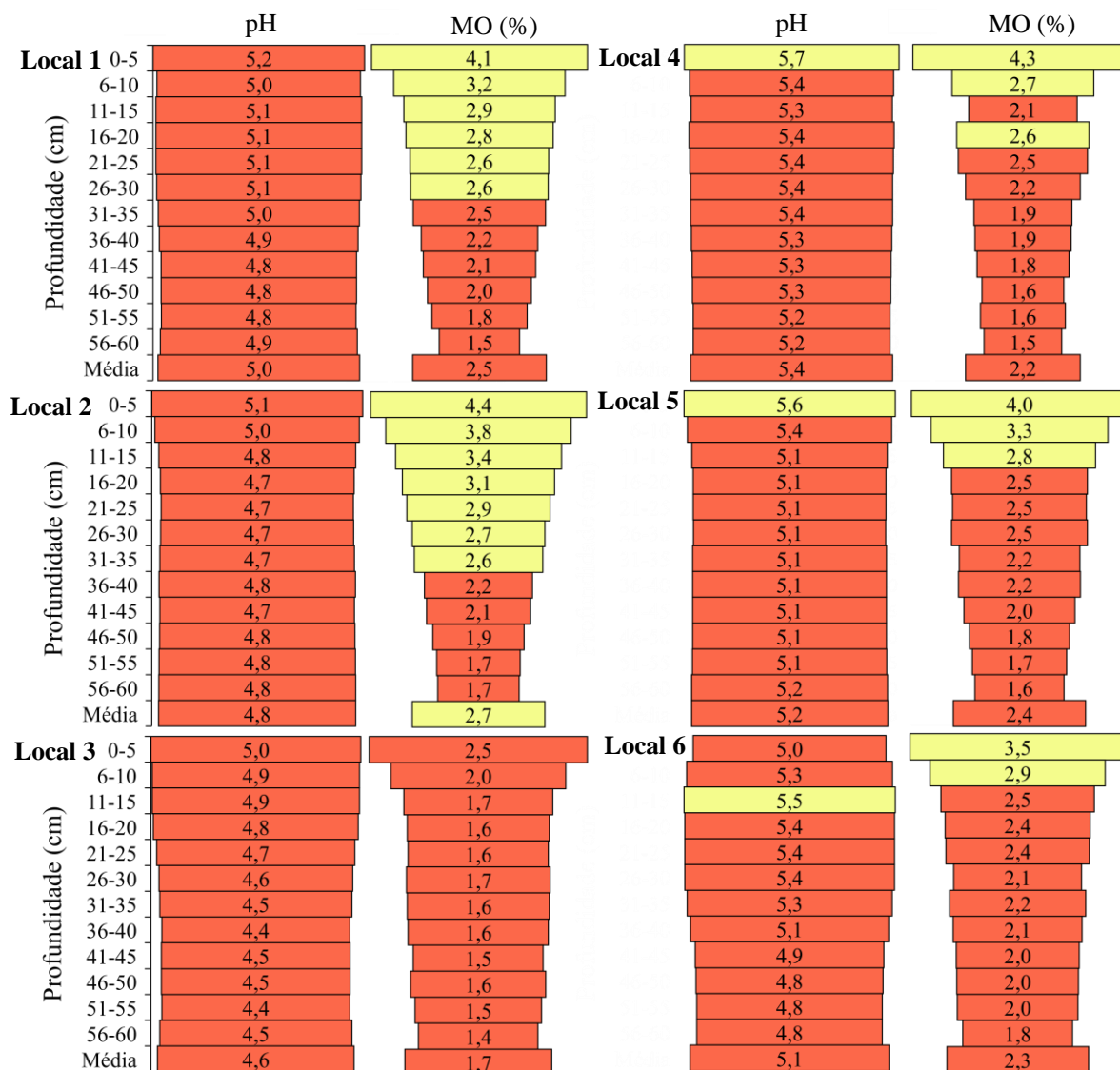
4 RESULTADOS

4.1 Atributos químicos do solo

Na figura 5, observa-se que a variação máxima do pH (água) entre as profundidades, foi de 0,7 no **Local 6**, com a média de 5,1. O pH nas primeiras camadas do solo é superior quando comparado com camadas mais profundas, no geral, observa-se que até os 30 cm de profundidade, são encontrados valores acima da média. Apenas os **Locais 2 e 5**, apresentaram o pH igual ou acima da média nas camadas abaixo de 30 cm (Figura 5). No entanto, em todos os locais e profundidades, foram observados valores de pH abaixo do adequado para a cultura da soja (pH de 6,0).

A MO em todos os locais, apresentou maior quantidade na profundidade de 0 a 5 cm em relação as demais profundidades (Figura 5). A diferença de MO na profundidade de 0 a 5 cm em comparação com a profundidade de 55 a 60 cm, foi de 2,6, 2,7, 1,1, 2,8, 2,4 e 1,7% superior para os **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6**, respectivamente. Os **Locais 3 e 6** apresentaram os menores valores de MO na camada de 0 a 5 cm e o **Local 3** apresentou a menor média de MO entre todos os locais, conseqüentemente esses locais apresentaram menor diferença de MO no perfil do solo. Pelas cores é possível observar que nenhum local e nenhuma profundidade avaliada apresentou teor de MO alta, inclusive o **Local 3** apenas apresentou valores baixos de MO.

Figura 5 – Potencial hidrogeniônico (pH), matéria orgânica (MO) nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



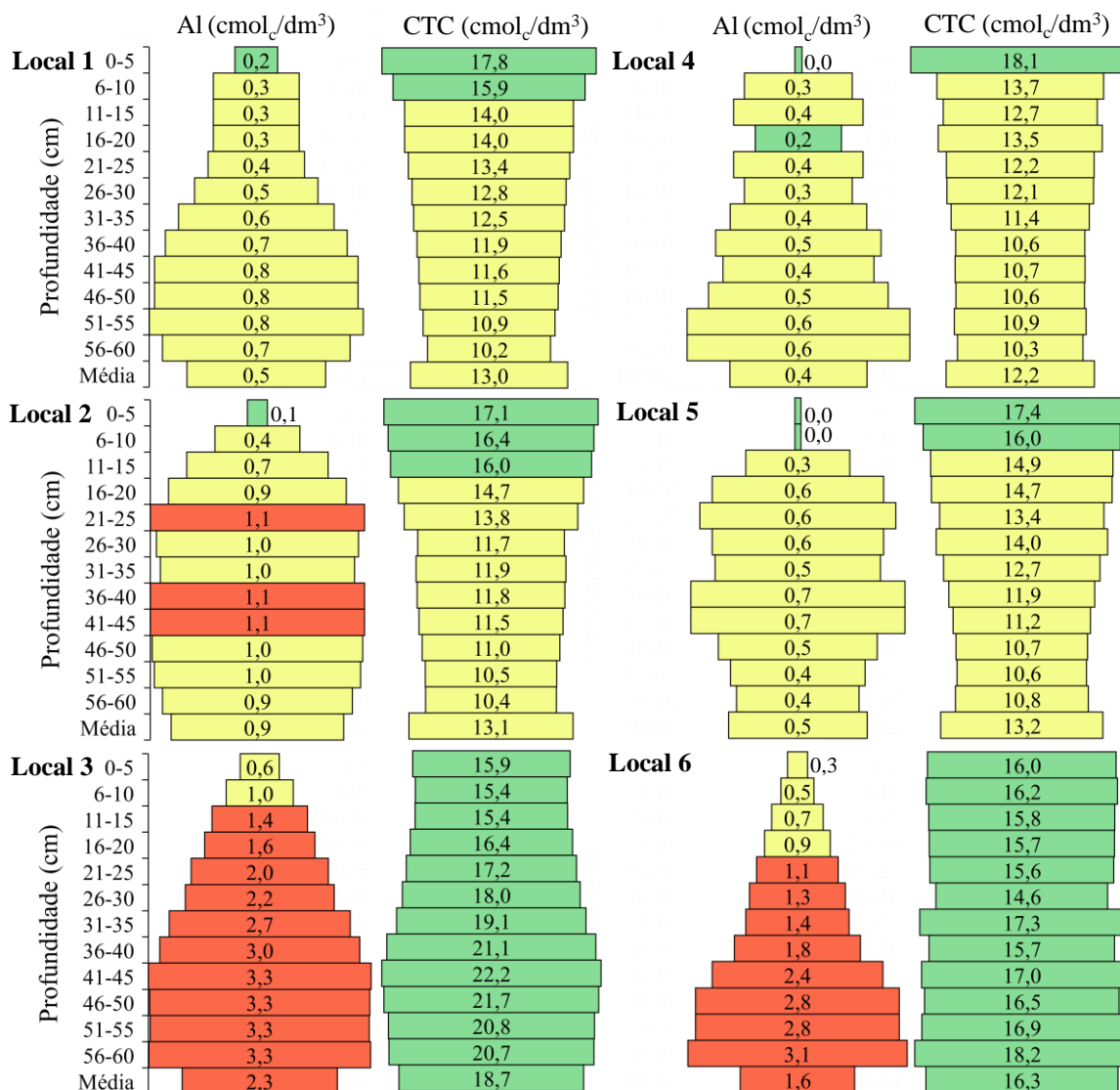
Cor verde: valores adequados; Cor amarela: valores intermediários; Cor vermelha: valores inadequados (CQFS, 2016).

Fonte: Dados do autor.

O Al tem comportamento inverso a MO no perfil do solo, apresentando os maiores valores nas camadas mais profundas (Figura 6). Os **Locais 3 e 6** apresentaram as maiores médias de Al entre os locais, com valores altos a partir dos 15 cm de profundidade. No **Local 1**, o maior valor encontrado de Al foi de 0,8 cmol/dm³ (41 a 55 cm), no **Local 2** foi de 1,1 cmol/dm³ (21 a 25 cm e 36 a 45 cm), no **Local 3** foi de 3,3 cmol/dm³ (a partir dos 41 cm),

no **Local 4** foi de 0,6 cmol_c/dm³ (51 a 60 cm), no **Local 5** foi de 0,7 cmol_c/dm³ (36 a 45 cm) e no **Local 6** foi de 3,1 cmol_c/dm³ (56 a 60 cm).

Figura 6 – Alumínio (Al) e capacidade de troca de cátions (CTC) nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



Cor verde: valores adequados; Cor amarela: valores intermediários; Cor vermelha: valores inadequados (CQFS, 2016).

Fonte: Dados do autor.

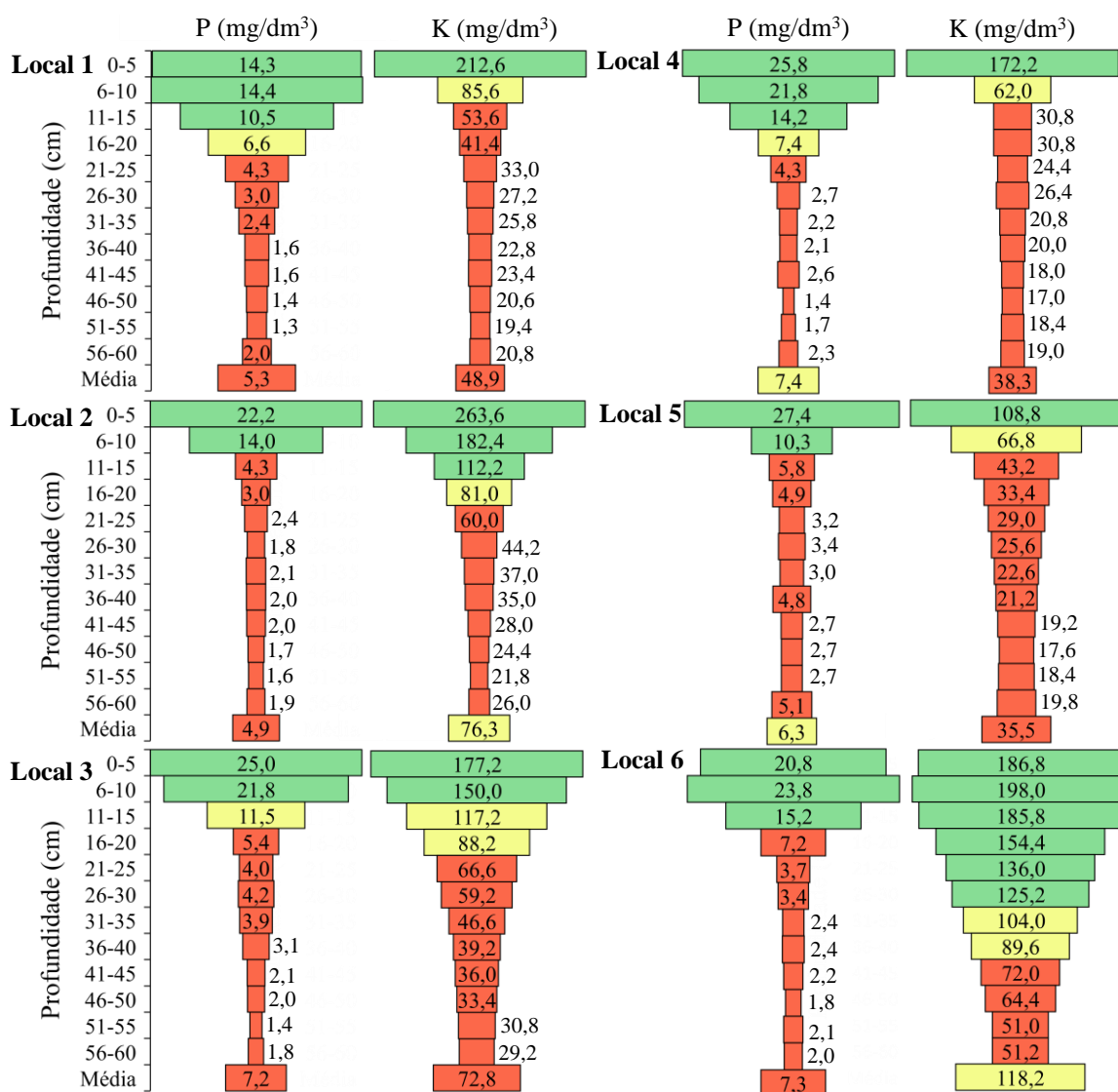
A CTC nos **Locais 1, 2, 4 e 5**, diminuiu com o aumento da profundidade e o inverso foi observado nos **Locais 3 e 6**, que apresentaram os maiores valores de CTC nas camadas

mais profundas do solo em relação as camadas superficiais (Figura 6). Os **Locais 1, 2, 4 e 5** apresentaram o maior valor de CTC na profundidade de 0 a 5 cm, enquanto no **Local 3** foi na profundidade de 41 a 45 cm e no **Local 6** foi na profundidade de 56 a 60 cm. Os **Locais 3 e 6** apresentaram valores altos de CTC em todo o perfil do solo.

O P, K e Ca apresentam comportamento similar no perfil do solo, com concentrações mais elevadas nas camadas superficiais do solo (Figuras 7 e 8). A quantidade de P presente na profundidade de 0 a 5 cm em relação a profundidade de 16 a 20 cm, foi 2,2, 7,4, 4,6, 3,5, 5,6 e 2,9 vezes superior nos **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6**, respectivamente (Figura 7). Os **Locais 1, 4 e 6** apresentaram valores altos de P até os 15 cm de profundidade, enquanto os **Locais 2, 3 e 5** até os 10 cm de profundidade, sendo que abaixo dessas profundidades, a concentração de P nos solos foi insuficiente para cultura da soja.

A quantidade de K presente na profundidade de 0 a 5 cm em relação a profundidade de 16 a 20 cm, foi 5,1, 3,2, 2,0, 5,6, 3,3 e 1,2 vezes superior nos **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6**, respectivamente (Figura 7). Com comportamento similar do K com o P no solo, a concentração de K foi alta nos primeiros centímetros de profundidade e torna-se baixa com o aumento da profundidade.

Figura 7 – Fósforo (P), potássio (K) nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.

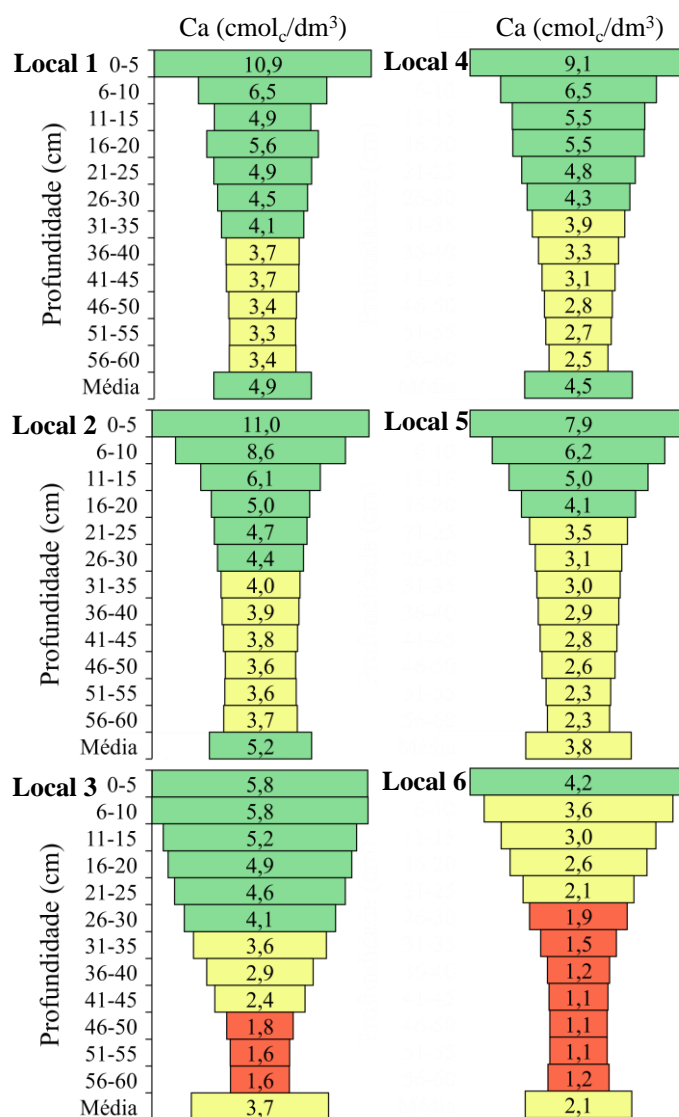


Cor verde: valores adequados; Cor amarela: valores intermediários; Cor vermelha: valores inadequados. P e K nos **Locais 1, 2, 4 e 5** (solo classe 1 e CTC média); P e K nos **Locais 3 e 6** (solo classe 2 e CTC alta) (CQFS, 2016).

Fonte: Dados do autor.

A quantidade de Ca presente na profundidade de 0 a 5 cm em relação a profundidade de 16 a 20 cm, foi 1,6, 1,9, 1,6, 1,7, 2,2 e 1,2 vezes superior nos **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6**, respectivamente (Figura 8). Os **Locais 3 e 6** apresentaram em profundidade, teores baixos de Ca.

Figura 8 – Cálcio (Ca) nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.

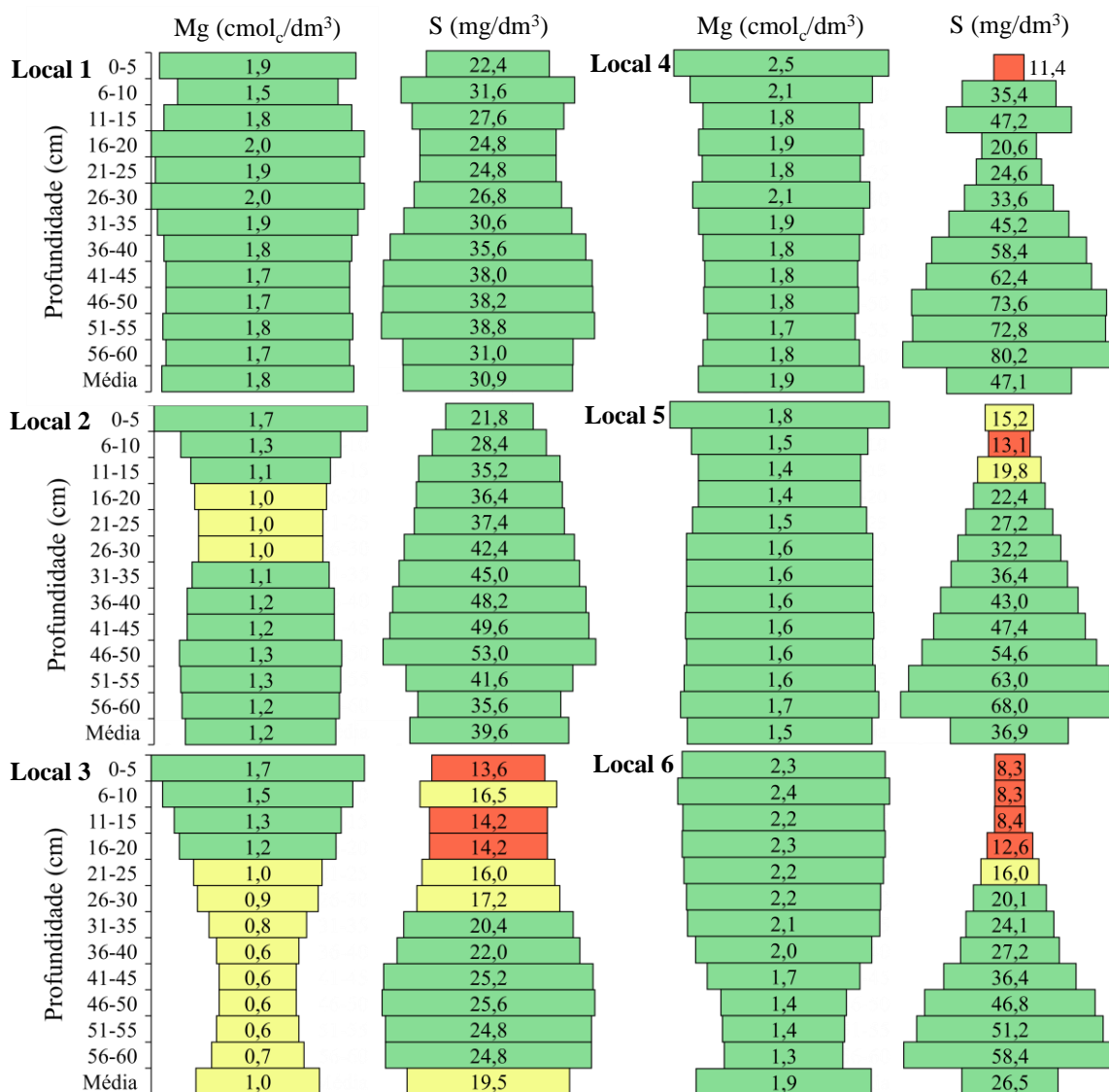


Cor verde: valores adequados; Cor amarela: valores intermediários; Cor vermelha: valores inadequados (CQFS, 2016).

Fonte: Dados do autor.

Nos **Locais 3 e 6**, percebe-se que a quantidade de Mg diminui com o aumento da profundidade do solo, sendo encontrado valores menores que a média em algumas profundidades do solo (Figura 9). Nos demais locais, a presença do Mg apresenta menor variação, sendo encontrado valores acima da média distribuídas entre camadas de solo superficiais e mais profundas. Apenas os **Locais 2 e 3** apresentaram em algumas profundidades teores médios de Mg.

Figura 9 – Magnésio (Mg) e enxofre (S) nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



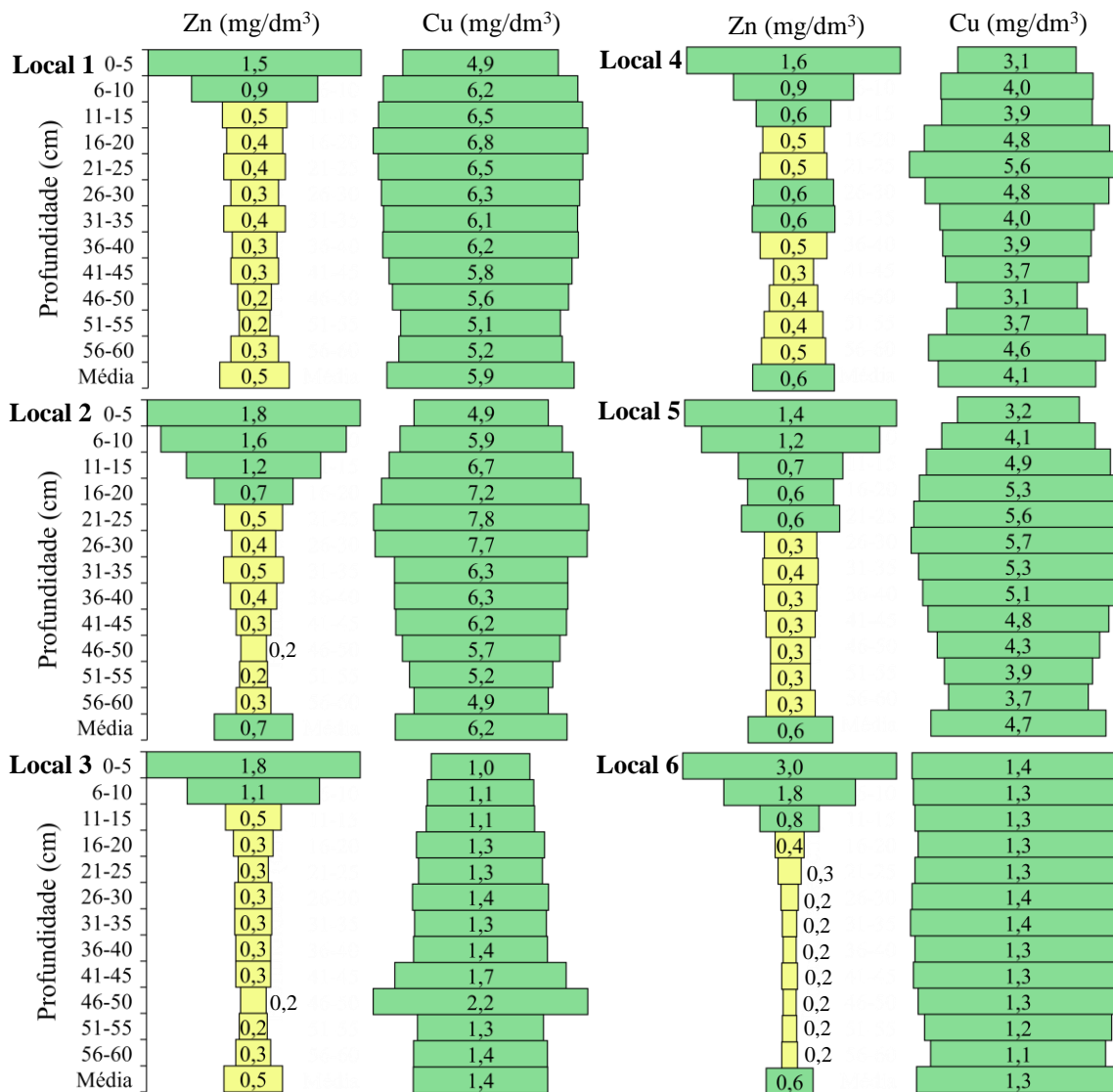
Cor verde: valores adequados; Cor amarela: valores intermediários; Cor vermelha: valores inadequados (CQFS, 2016).

Fonte: Dados do autor.

O S apresentou maior concentração nas camadas mais profundas do solo em comparação as camadas superficiais (Figura 9). Nos **Locais 1, 4, 5 e 6** a partir dos 36 cm de profundidade são encontrados valores acima da média das profundidades, no **Local 2** a partir

dos 26 cm e no **Local 3** a partir dos 31 cm de profundidade. Dos seis locais, apenas os **Locais 1 e 2** não apresentaram camadas com teores limitantes à soja de S.

Figura 10 – Zinco (Zn), cobre (Cu) nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



Cor verde: valores adequados; Cor amarela: valores intermediários; Cor vermelha: valores inadequados (CQFS, 2016).

Fonte: Dados do autor.

O Zn apresentou maior concentração nas camadas superficiais do solo em comparação as camadas profundas e a média de concentração de Zn até 60 cm de profundidade variou pouco entre os locais, com média máxima de 0,7 (mg/dm³) no **Local 2**

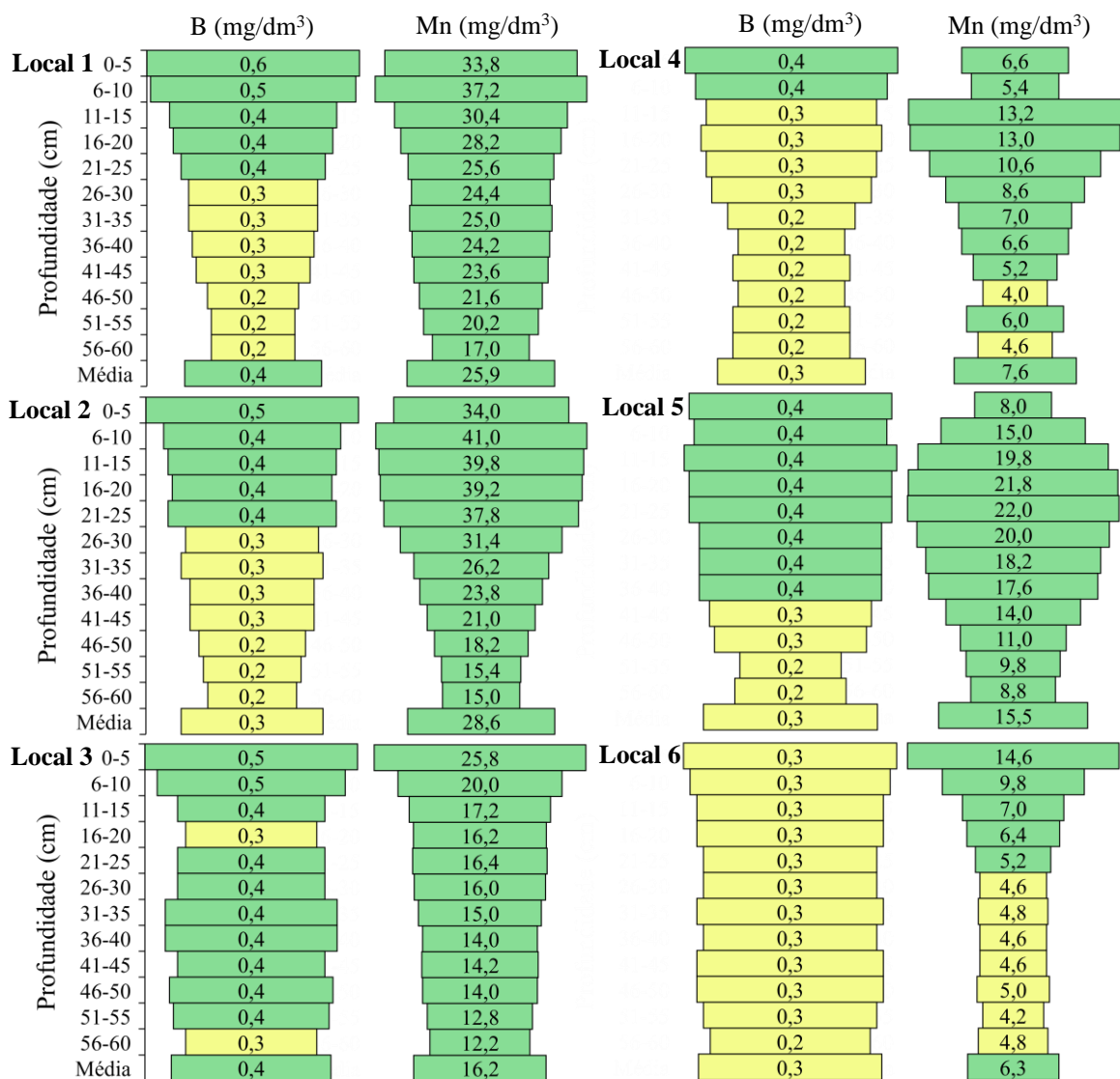
e média mínima de 0,5 (mg/dm³) nos **Locais 1 e 3** (Figura 10). Em todos os locais, a concentração de Zn em profundidade foi média para a cultura da soja.

O Cu apresentou distribuição uniforme no perfil do solo em comparação aos demais micronutrientes (Figura 10). No entanto, ao comparar as médias dos locais, observa-se que os **Locais 3 e 6** apresentaram valores menores aos demais locais, sendo a média dos **Locais 3 e 6** aproximadamente 3,9 vezes menor, que a média dos **Locais 1, 2, 4 e 5** (Figura 10). Mesmo com essa diferença entre as médias dos locais, nenhum local apresentou deficiência do nutriente Cu.

O B apresentou concentrações acima da média no **Local 1** até os 25 cm, no **Local 2** até 45 cm, no **Local 3** até 55 cm, no **Local 4** até 30 cm, no **Local 5** até 50 cm e no **Local 6** até 55 cm de profundidade (Figura 11). A média de B das profundidades foi de 0,41 (mg/dm³) nos **Locais 1 e 3** e de 0,3 (mg/dm³) nos **Locais 2, 4, 5 e 6**. O **Local 6** apresentou em todo seu perfil teores médios de B, diferente do observado para os demais locais, o qual observou apenas em algumas profundidades, sendo então, a maioria teores adequados do nutriente, caracterizando solos quimicamente melhores neste aspecto.

A concentração média de Mn nos **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6** foram 25,9, 28,6, 16,2, 7,6, 15,5 e 6,3 foi de 25,9 e 28,6 mg/dm³, respectivamente (Figura 11). Em relação ao Mn e com base nos valores, houve similaridade química dos **Locais 1 e 2, Locais 3 e 5 e Locais 4 e 6** com concentrações próximas entre si. O **Local 4** apresentou teor considerado médio de Mn nas profundidades de 46 a 50 cm e 56 a 60 cm e o **Local 6** apresentou teor considerado médio de Mn dos 26 aos 60 cm de profundidade, enquanto os demais locais apresentaram teor considerado alto em todas as profundidades.

Figura 11 – Boro (B) e Manganês (Mn) nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



Cor verde: valores adequados; Cor amarela: valores intermediários; Cor vermelha: valores inadequados (CQFS, 2016).

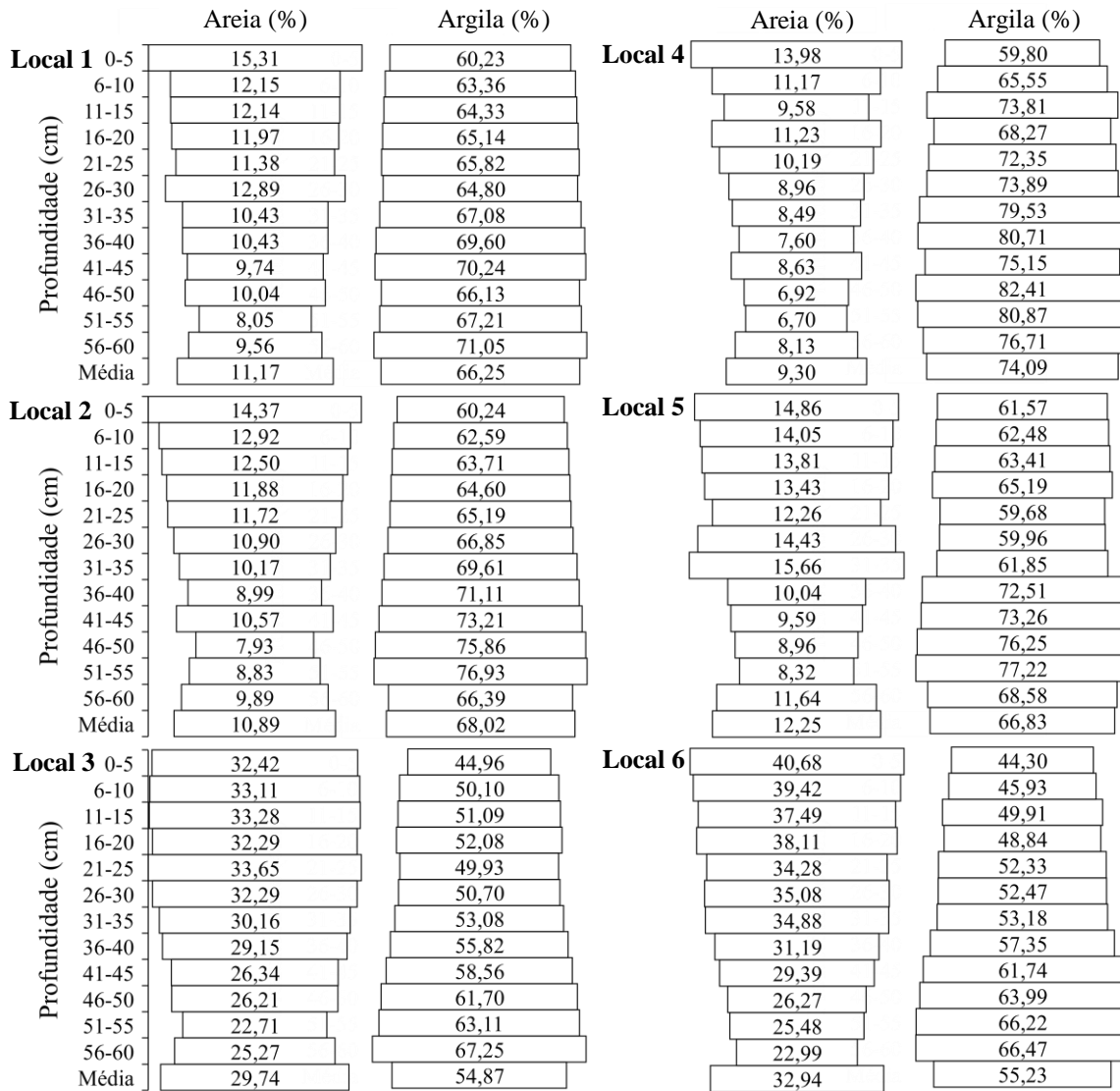
Fonte: Dados do autor.

4.2 Atributos físicos do solo

A média de areia no solo dos **Locais 3 e 6** é aproximadamente três vezes maior que os demais locais, o que representa aproximadamente 20% de areia (Figura 12). Em todos os

locais e na superfície do solo houve maior concentração de areia, que diminuiu com a profundidade do solo. Os **Locais 3 e 6** apresentaram menor percentual de argila na composição do solo, diferença de aproximadamente 13% em relação aos **Locais 1, 2, 4 e 5**.

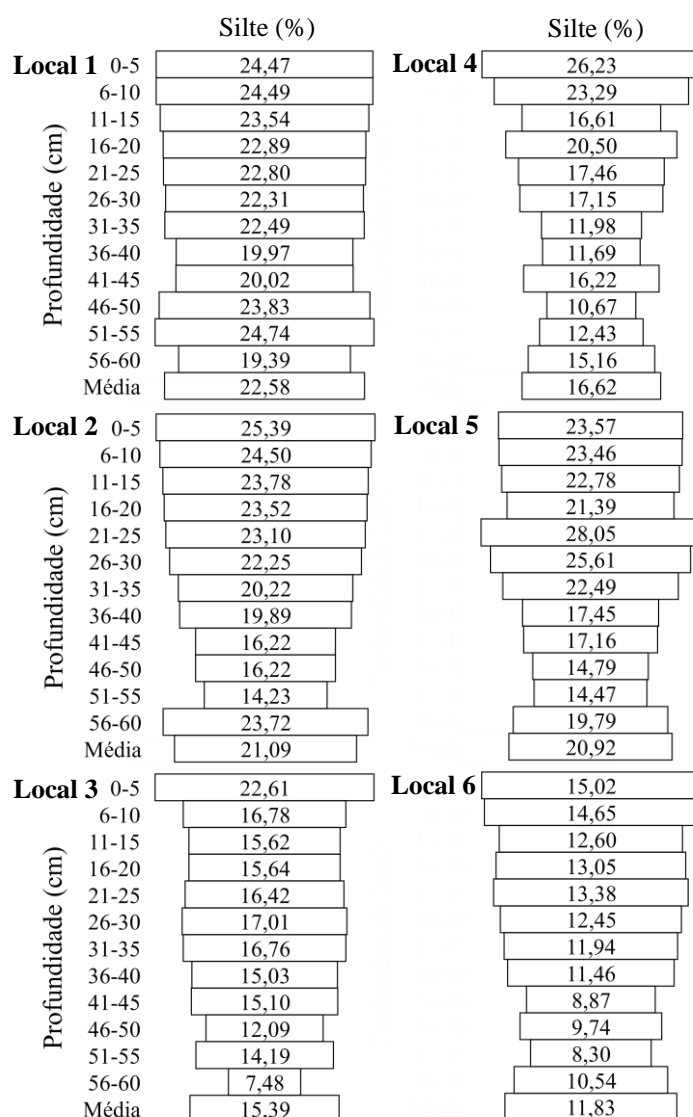
Figura 12 – Areia e argila do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



Fonte: Dados do autor.

Em relação ao silte nos solos, os **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6** apresentaram em média de todo o perfil avaliado 22, 21, 15, 16, 20 e 11% (Figura 13). Vale destacar que a diferença no percentual de silte dos **Locais 3 e 6** para os **Locais 1, 2, e 5**, foi aproximadamente 7% menor. A média do **Local 4** ficou entre a média dos demais locais.

Figura 13 – Silte do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.

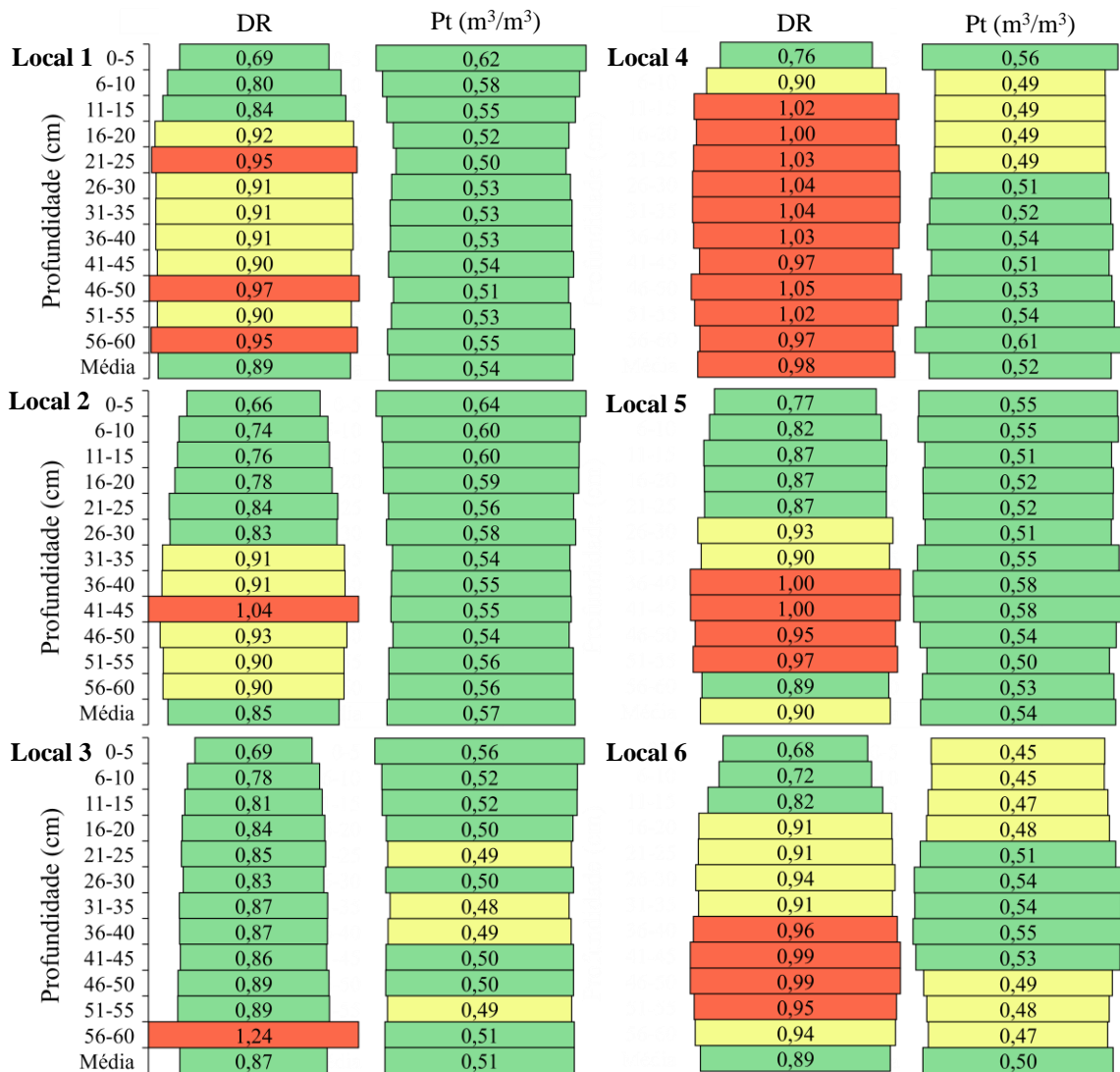


Fonte: Dados do autor.

A maior média de DR do solo entre os locais, foi no **Local 4** com 0,98, em seguida, o **Local 5** com média de 0,90, **Locais 1 e 6** com média de 0,89, **Local 3** com média de 0,87

e **Local 2** com média de 0,85 (Figura 14). Destaque para o **Local 4**, que apresentou valores de DR que limitam o crescimento radicial a partir de 6 cm de profundidade e para o **Local 3**, que apresentou apenas uma profundidade com DR que limita o crescimento radicial.

Figura 14 – Densidade relativa (DR) e porosidade total (Pt) do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



Cor verde: valores adequados (DR <0,89; Pt >0,50); Cor amarela: valores intermediários (DR de 0,90 a 0,94; Pt de 0,45 a 0,50); Cor vermelha: valores inadequados (DR >0,95; Pt <0,45). Adaptado de Kiehl (1979), Klein (2014), Reynolds et al. (2002) e Broch e Klein (2017).

Fonte: Dados do autor.

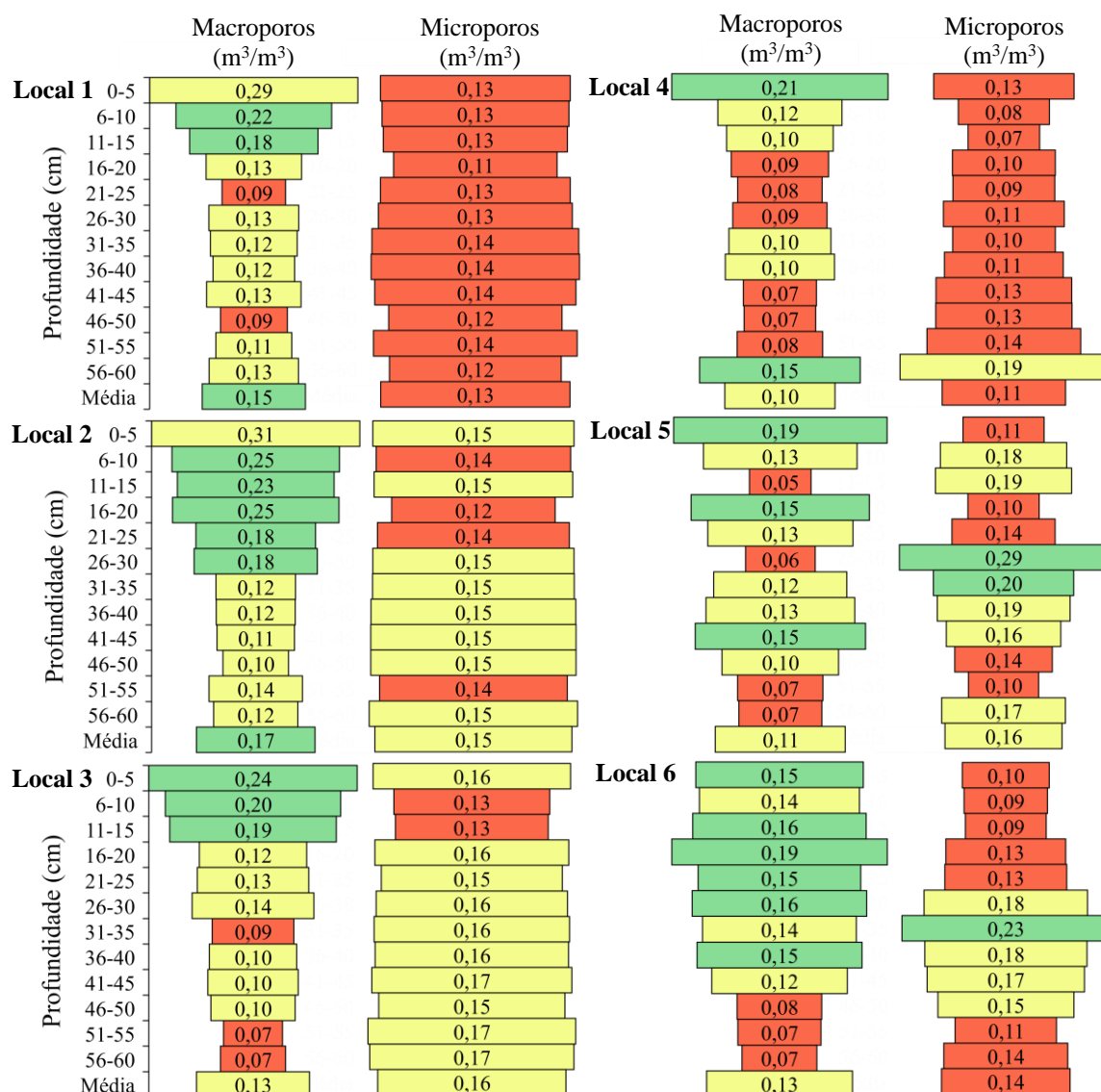
Houve incremento da DR do solo nas camadas mais profundas, em relação as camadas superficiais (Figura 14). No **Local 1** a partir dos 16 cm de profundidade, observa-se valores maiores que a média das profundidades, no **Local 2** a partir dos 31 cm, no **Local 3** a partir dos 46 cm, no **Local 4** a partir dos 11 cm, no **Local 5** a partir dos 26 cm e no **Local 6** a partir dos 16 cm de profundidade.

A Pt do solo apresentou menor média no **Local 6** ($0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e maior média no **Local 2** ($0,57 \text{ m}^3/\text{m}^3$) (Figura 14). No geral, os solos apresentaram um volume de poros próximo ao desejado que é $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$, sendo que a menor média das profundidades entre os locais foi exatamente $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Os macroporos estão presentes em maior volume nas camadas superiores em todos os locais, em comparação a maior profundidade do solo (Figura 15). As médias foram de 0,15, 0,17, 0,13, 0,10, 0,11 e $0,13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para os **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6**, respectivamente. O **Local 2** apresentou a maior média de macroporos entre os locais, sendo 41,2% maior que o **Local 4**, 35,3% maior que o **Local 5**, 23,5% maior que os **Locais 3 e 6** e 11,8% maior que o **Local 1**.

Os microporos apresentaram maior uniformidade de distribuição entre as camadas nos **Locais 1, 2 e 3**, em comparação aos demais locais (Figura 15). No **Local 4** o maior volume de microporos foi encontrado de 56 a 60 cm de profundidade, no **Local 5** de 26 a 30 cm de profundidade e no **Local 6** de 31 a 35 cm de profundidade. As médias de microporos foram aproximadamente 2 vezes inferiores aos valores considerados adequados.

Figura 15 – Macroporos (>0,05 mm) e microporos (0,05 - 0,0002 mm) do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.

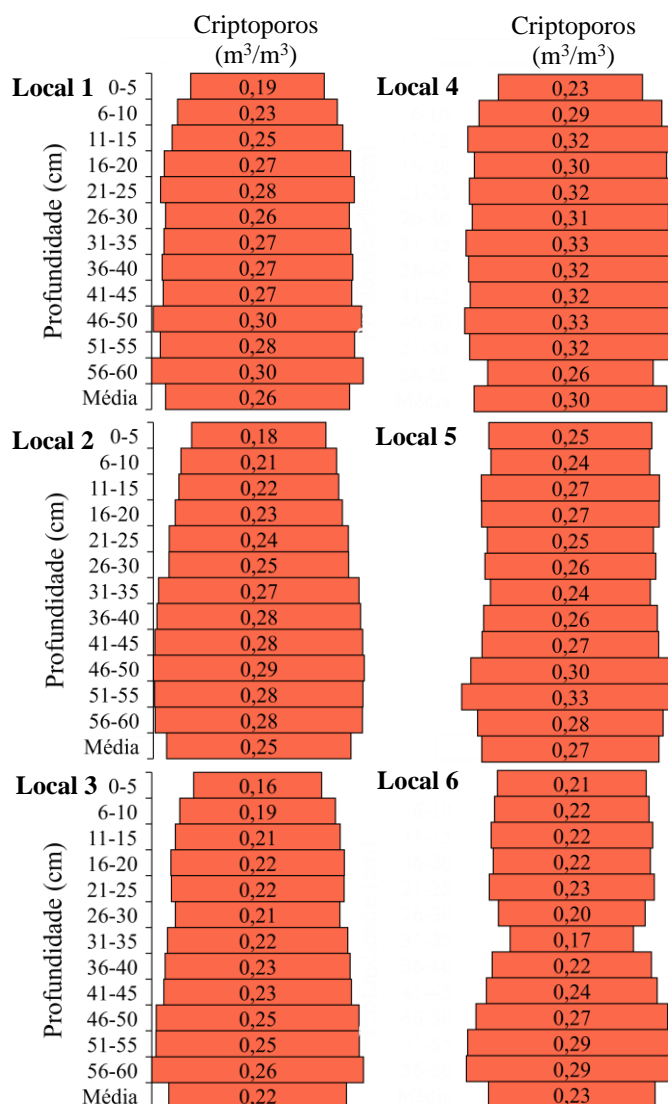


Cor verde: valores adequados (Macroporos de 0,15 a 0,25; Microporos de 0,20 a 0,30); Cor amarela: (Macroporos de 0,10 a 0,14 e >0,26; Microporos de 0,15 a 0,19 e >0,30); Cor vermelha: valores inadequados (Macroporos <0,10; Microporos <0,15). Adaptado de Reynolds et al. (2002) e Reynolds et al. (2009).

Fonte: Dados do autor.

O volume de criptoporos foi maior no **Local 4** em relação aos demais locais e os menores volumes de criptoporos estão nas camadas superiores do solo (Figura 16). As médias de criptoporos em todos os locais foram superiores aos valores de macroporos e microporos (Figuras 15 e 16).

Figura 16 – Criptoporos (<0,0002 mm) do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.

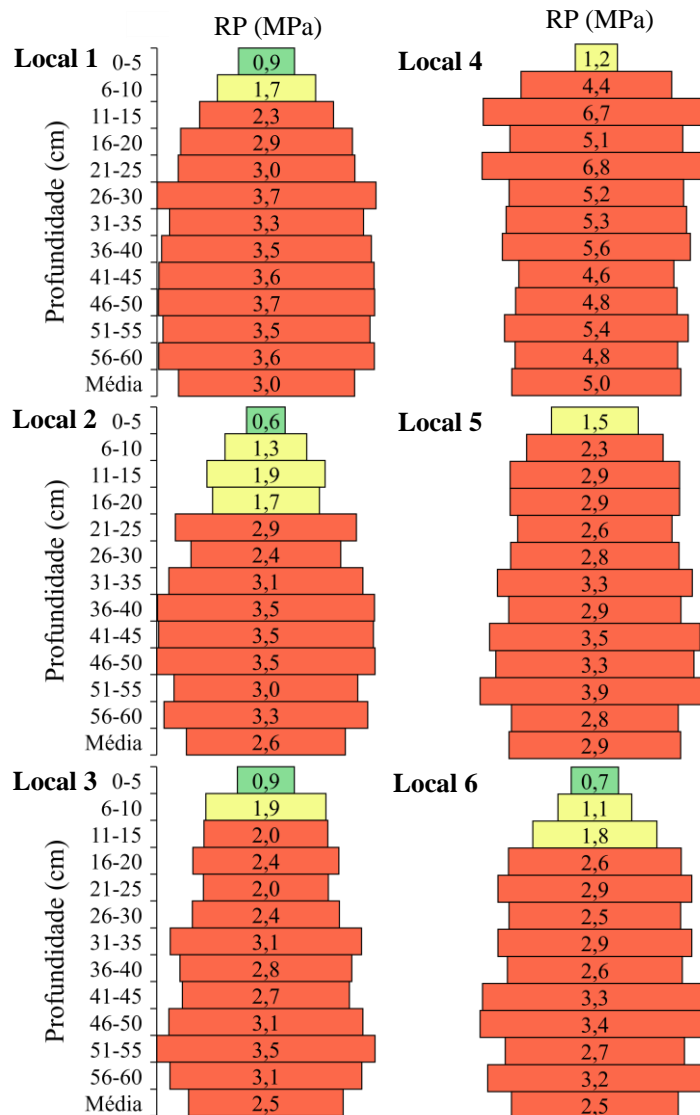


Cor verde: valores adequados (Criptoporos <0,10); Cor amarela: (Criptoporos 0,10 a 0,15); Cor vermelha: valores inadequados (Criptoporos >0,15). Adaptado de Reynolds et al. (2002) e Reynolds et al. (2009).

Fonte: Dados do autor.

A RP nos **Locais 1, 2, 3, 5 e 6** apresentou variação de 0,51 MPa entre o maior e menor média encontrada nesses locais (Figura 17). O **Local 4** apresentou diferença superior de 2,01, 2,41, 2,5, 2,1 e 2,52 MPa dos **Locais 1, 2, 3, 5 e 6**, respectivamente. Todos os locais apresentaram resistência à penetração das raízes a partir dos primeiros centímetros de profundidade do solo.

Figura 17 – Resistência à penetração (RP) do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.

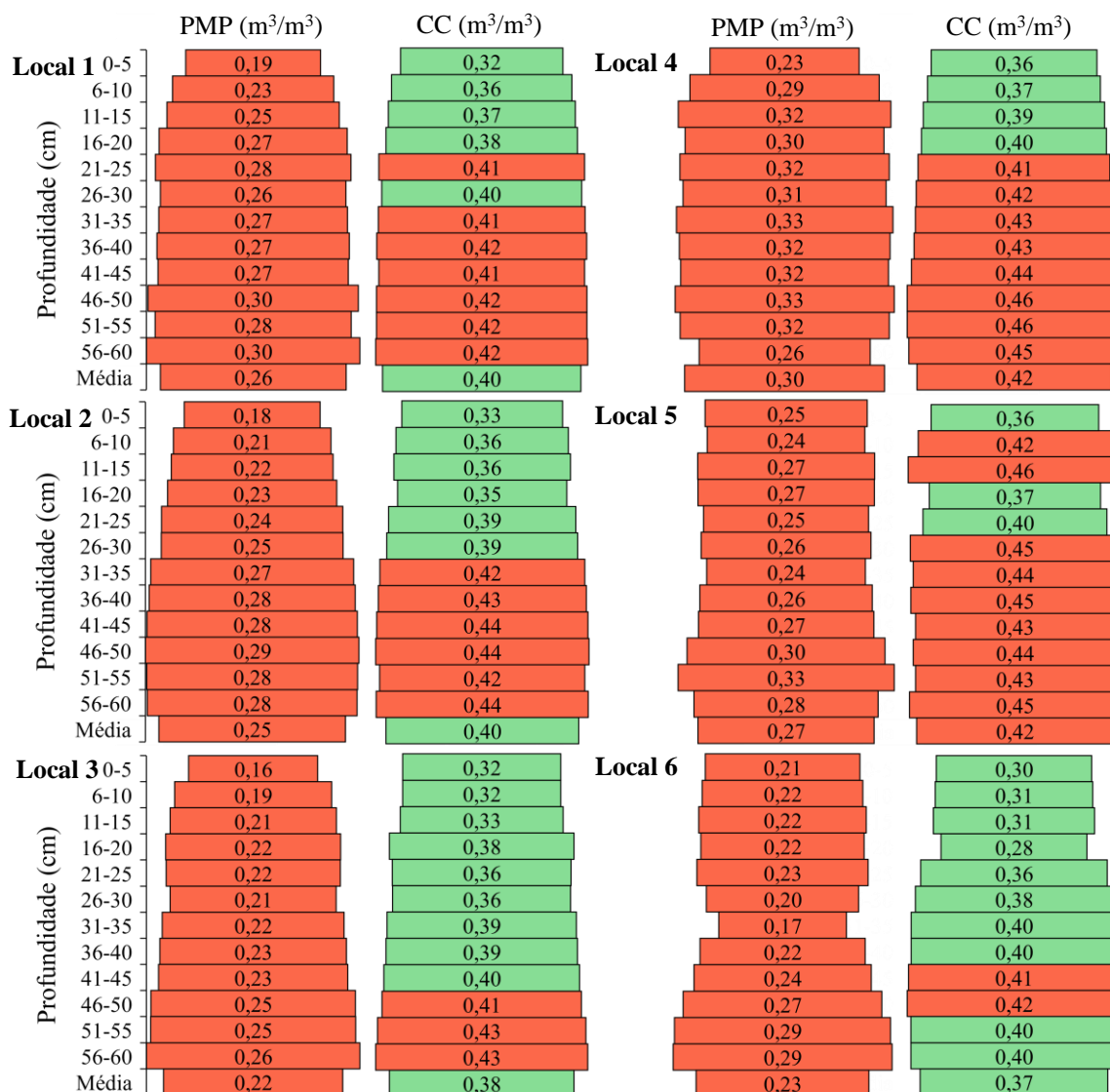


Cor verde: valores adequados (RP < 1,0); Cor amarela: valores intermediários (RP de 1,0 a 1,9); Cor vermelha: valores inadequados (RP > 1,9). Adaptado de Busscher, Frederick e Bauer, (2000) e Klein (2014).

Fonte: Dados do autor.

A maior média de PMP foi observado no **Local 4** ($0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$), enquanto a menor média foi no **Local 3** ($0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$) em comparação aos demais locais, sendo a diferença entre elas de $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Figura 18). Todas as profundidades de todos os locais apresentaram valores elevados de PMP.

Figura 18 – Ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de campo (CC) do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



Cor verde: valores adequados (PMP $\leq 0,10$; CC de 0,25 a 0,40); Cor vermelha: valores inadequados (PMP $\geq 0,10$; CC $< 0,25$ ou $> 0,40$). Adaptado de Reynolds et al. (2002) e Reynolds et al. (2009).

Fonte: Dados do autor.

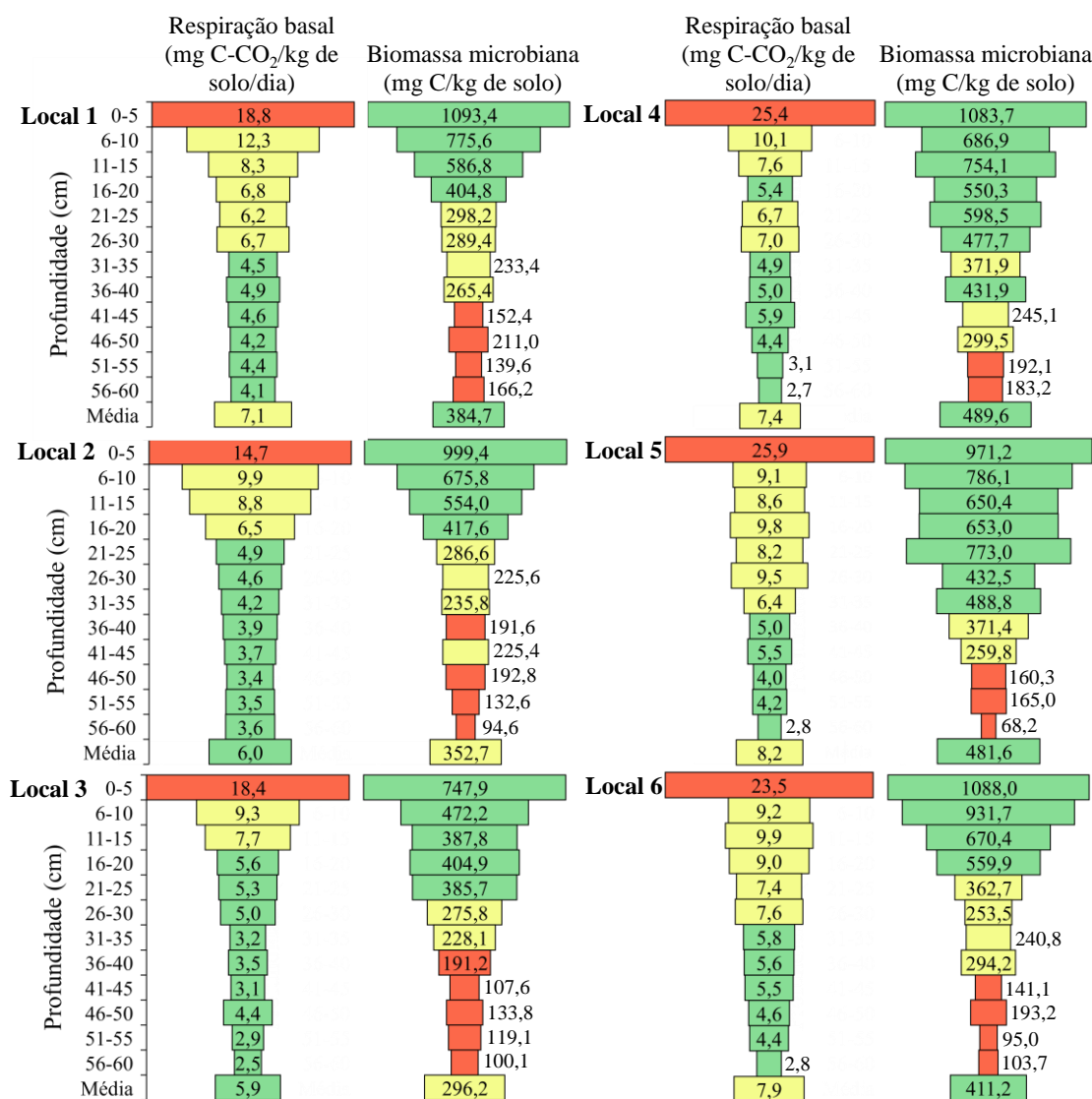
A maior média da CC foi nos **Locais 4 e 5** ($0,42 \text{ m}^3/\text{m}^3$) em seguida **Local 1 e 2** ($0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$), **Local 3** ($0,38 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e a menor média no **Local 6** ($0,37 \text{ m}^3/\text{m}^3$) (Figura 18). Observa-se que a CC apresentou valores maiores que os considerados adequados, sendo os **Locais 3 e 6** que apresentaram mais profundidades dentro do limite considerado adequado.

4.3 Atributos biológicos do solo

A respiração basal apresentou maiores valores em todos os locais até os 5 cm de profundidade, sendo 2,48, 4,56, 3,08, 3,45, 5,05 e 3,26 vezes maior, que a média das profundidades para os **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6**, respectivamente (Figura 19). Quando comparada a respiração basal na profundidade de 6 a 10 cm, a diferença foi de 1,19, 1,54, 1,56, 1,37, 1,07 e 1,40 vezes superior que a média das profundidades, para os **Locais 1, 2, 3, 4, 5 e 6**, respectivamente. Dessa forma, observa-se que a quantidade de C-CO₂ liberado próximo a superfície do solo está acima do adequado.

A biomassa microbiana no **Local 1**, apresentou variação máxima entre as profundidades de 953,8 mg C/kg de solo com média de 384,7 mg C/kg de solo, no **Local 2** essa variação foi de 904,8 mg C/kg de solo com média de 352,7 mg C/kg de solo, no **Local 3** foi de 647,8 mg C/kg de solo com média de 296,2 mg/kg de solo, no **Local 4** foi de 900,5 mg C/kg de solo com média de 489,6 mg/kg de solo, no **Local 5** foi de 903,0 mg C/kg de solo com média de 481,6 mg C/kg de solo e no **Local 6** apresentou variação máxima entre profundidades de 993,0 mg C/kg de solo com média de 411,2 mg/kg de solo (Figura 19). Dessa forma, a diferença de biomassa microbiana entre as profundidades foi aproximadamente duas vezes maior que a média das profundidades em todos os locais, sendo observado os maiores valores próximos a superfície do solo.

Figura 19 – Respiração basal e biomassa microbiana do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.

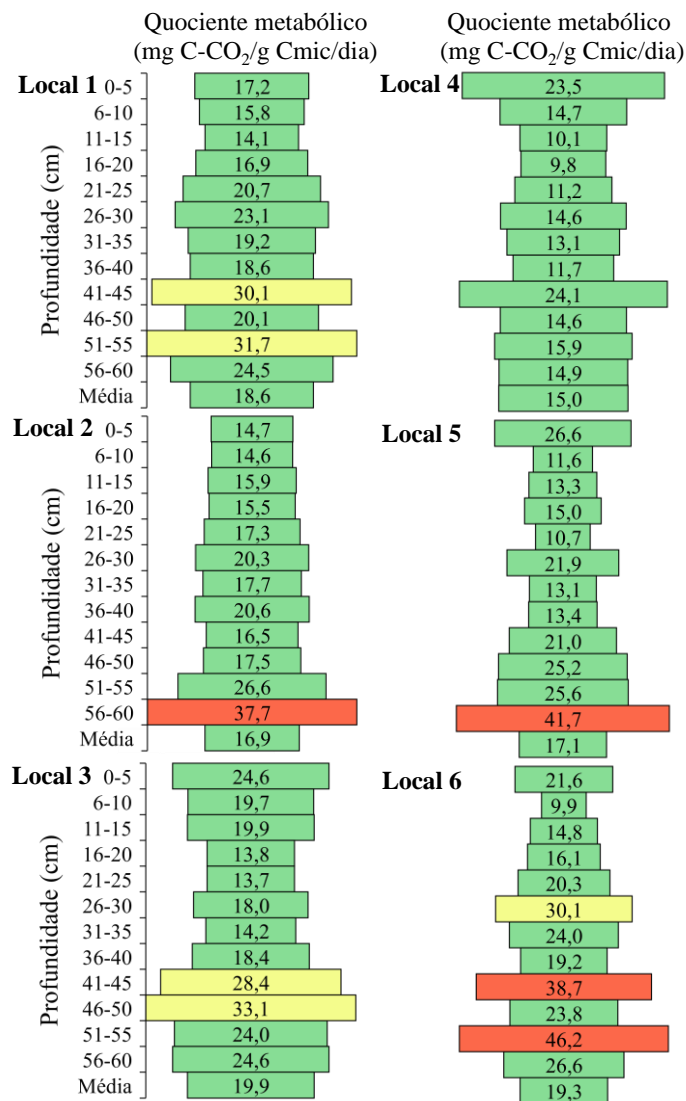


Cor verde: valores adequados (Respiração $\leq 6,0$; Biomassa > 375); Cor amarela: valores intermediários (Respiração de 6,1 a 13,0; Biomassa de 215,1 a 375,0); Cor vermelha: valores inadequados (Respiração $> 13,0$; Biomassa $\leq 215,0$). Adaptado de Lopes et al. (2013).

Fonte: Dados do autor.

O quociente metabólico em quase todas as profundidades, está dentro da faixa considerada adequada, no entanto, percebe-se que há um incremento dos valores com o aumento da profundidade do solo (Figura 20).

Figura 20 – Quociente metabólico do solo nos seis locais e em diferentes profundidades do solo.



Cmic = Carbono da biomassa microbiana. Cor verde: valores adequados (Quociente $\leq 28,0$); Cor amarela: valores intermediários (Quociente de 28,1 a 35,0); Cor vermelha: valores inadequados (Quociente $> 35,0$).

Adaptado de Lopes et al. (2013).

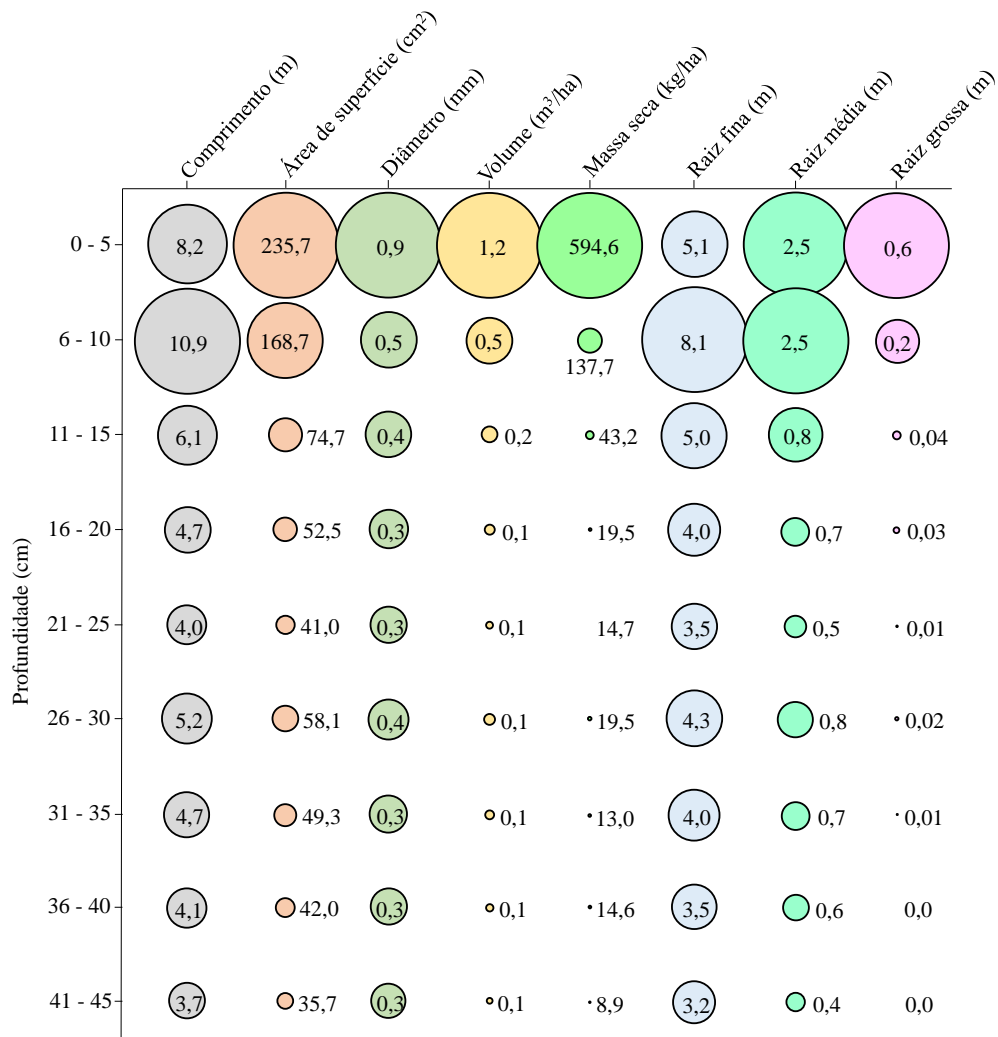
Fonte: Dados do autor.

4.4 Crescimento de raiz

No **Local 1** o volume de raiz até os 10 cm de profundidade foi 2,12 vezes maior que a soma das demais profundidades, o que representa aproximadamente 68% do total do

volume das raízes até 10 cm de profundidade (Figura 21). Nessa mesma linha de raciocínio, o comprimento de raiz apresentou aproximadamente 37% do total até 10 cm de profundidade, a área de superfície 53%, o diâmetro 35%, a massa seca 85%, raiz fina 32%, raiz média 53% e raiz grossa 88%.

Figura 21 – Atributos de crescimento radicial em soja no **Local 1** e em diferentes profundidades do solo.

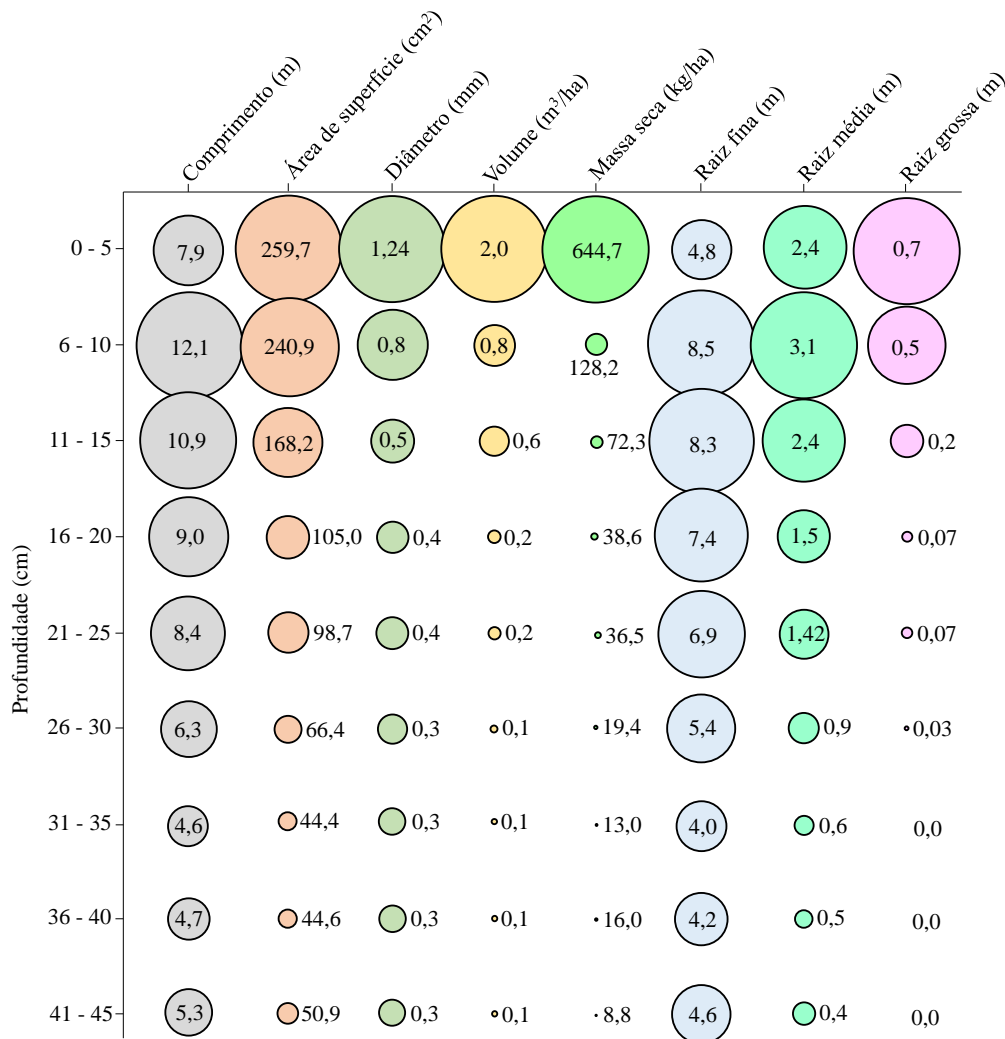


Fonte: Dados do autor.

A média das profundidades no **Local 1** foi de 5,73 m de comprimento, 84,19 cm² de área de superfície, 0,44 mm de diâmetro, 0,28 m³/ha de volume, 96,19 kg/ha de massa seca, 4,52 m de raiz fina, 1,05 m de raiz média e 0,10 m de raiz grossa (Figura 21).

No **Local 2** foi observado até os 10 cm de profundidade aproximadamente 29% do total de comprimento de raiz, 46% da área de superfície, 45% do diâmetro, 67% do volume, 79% da massa seca e 25% de raiz fina, 42% da raiz média e 75% da raiz grossa (Figura 22).

Figura 22 – Atributos de crescimento radicial em soja no **Local 2** e em diferentes profundidades do solo.

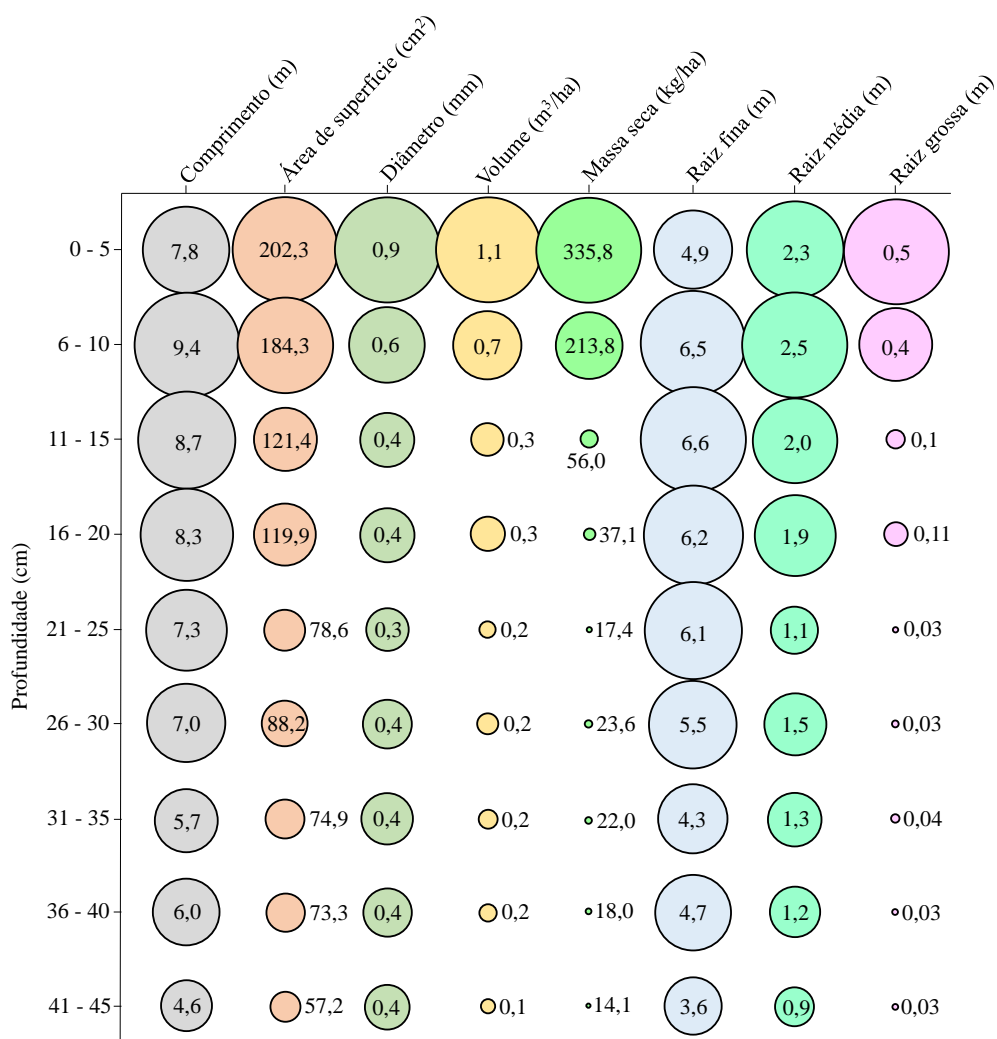


Fonte: Dados do autor.

A média das profundidades no **Local 2** foi de 7,69 m de comprimento, 119,87 cm² de área de superfície, 0,50 mm de diâmetro, 0,46 m³/ha de volume, 108,61 kg/ha de massa seca, 6,01 m de raiz fina, 1,47 m de raiz média e 0,18 m de raiz grossa (Figura 22).

No **Local 3** foi observado até os 10 cm de profundidade aproximadamente 26% do comprimento, 39% da área de superfície, 36% do diâmetro, 51% do volume, 74% da massa seca e 23% de raiz fina, 33% da raiz média e 71% da raiz grossa (Figura 23).

Figura 23 – Atributos de crescimento radicial em soja no **Local 3** e em diferentes profundidades do solo.

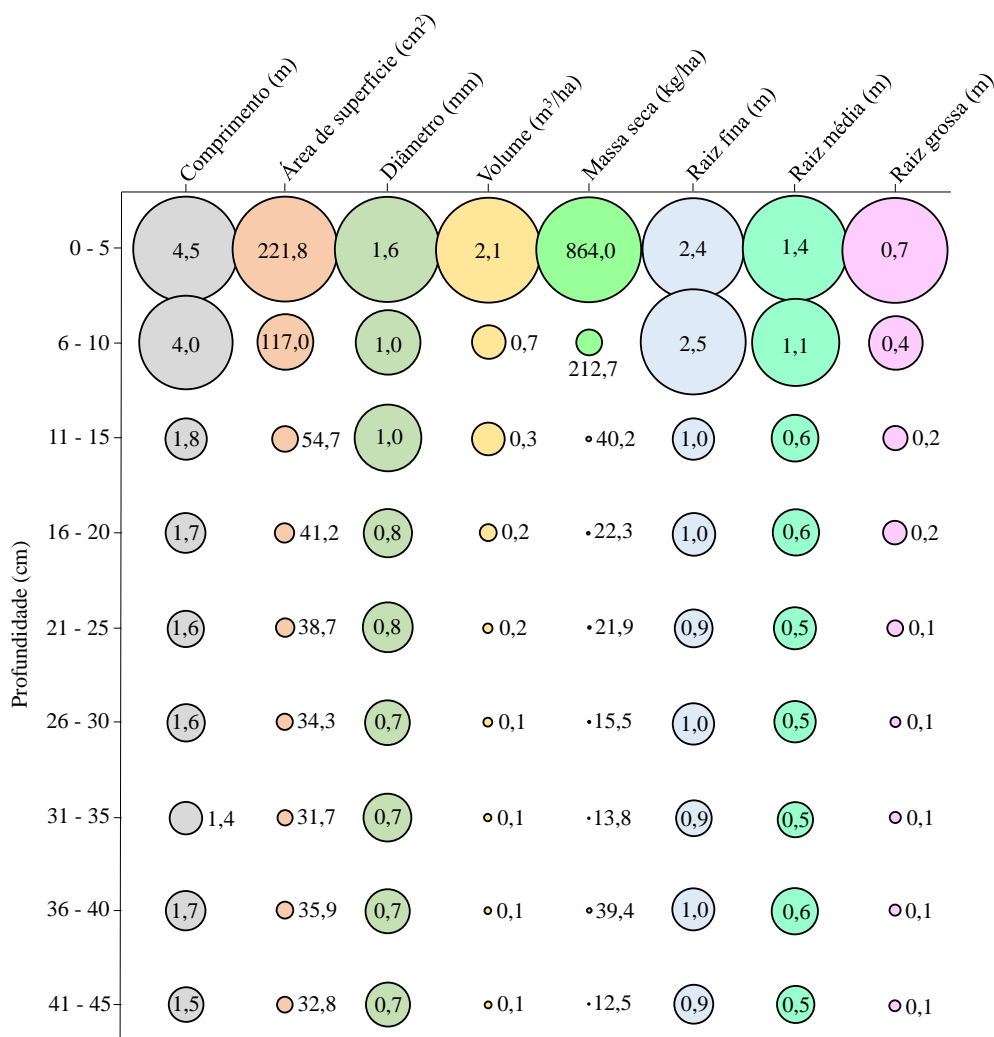


Fonte: Dados do autor.

A média das profundidades no **Local 3** foi de 7,20 m de comprimento, 111,09 cm² de área de superfície, 0,47 mm de diâmetro, 0,39 m³/ha de volume, 81,98 kg/ha de massa seca, 5,38 m de raiz fina, 1,63 m de raiz média e 0,14 m de raiz grossa (Figura 23).

No **Local 4** foi observado até os 10 cm de profundidade aproximadamente 43% do comprimento, 56% da área de superfície, 32% do diâmetro, 72% do volume, 88% da massa seca e 42% de raiz fina, 40% da raiz média e 55% da raiz grossa (Figura 24).

Figura 24 – Atributos de crescimento radicial em soja no **Local 4** e em diferentes profundidades do solo.

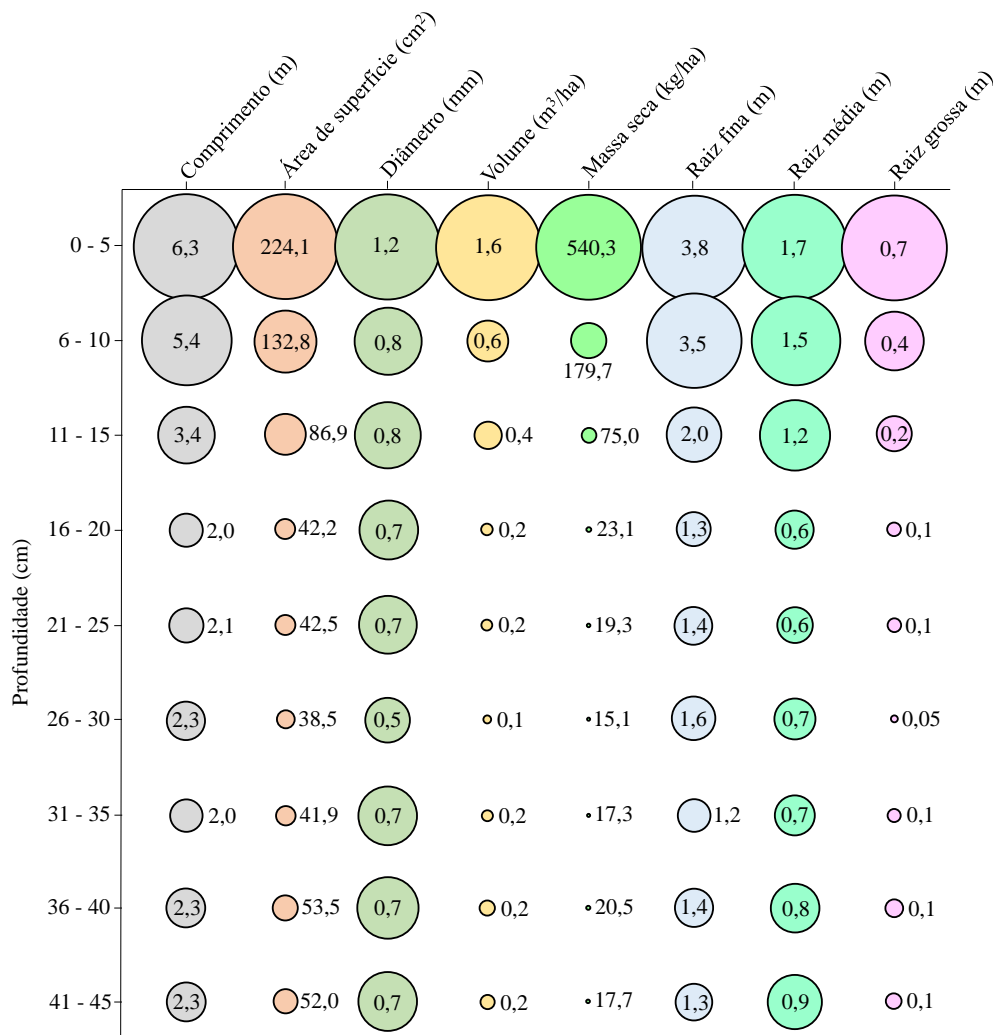


Fonte: Dados do autor.

A média das profundidades no **Local 4** foi de 2,20 m de comprimento, 67,56 cm² de área de superfície, 0,88 mm de diâmetro, 0,43 m³/ha de volume, 135,81 kg/ha de massa seca, 1,29 m de raiz fina, 0,7 m de raiz média e 0,22 m de raiz grossa (Figura 24).

No **Local 5** foi observado até os 10 cm de profundidade aproximadamente 41% do comprimento, 50% da área de superfície, 29% do diâmetro, 59% do volume, 81% da massa seca e 41% de raiz fina, 37% da raiz média e 59% da raiz grossa (Figura 25).

Figura 25 – Atributos de crescimento radicial em soja no **Local 5** e em diferentes profundidades do solo.

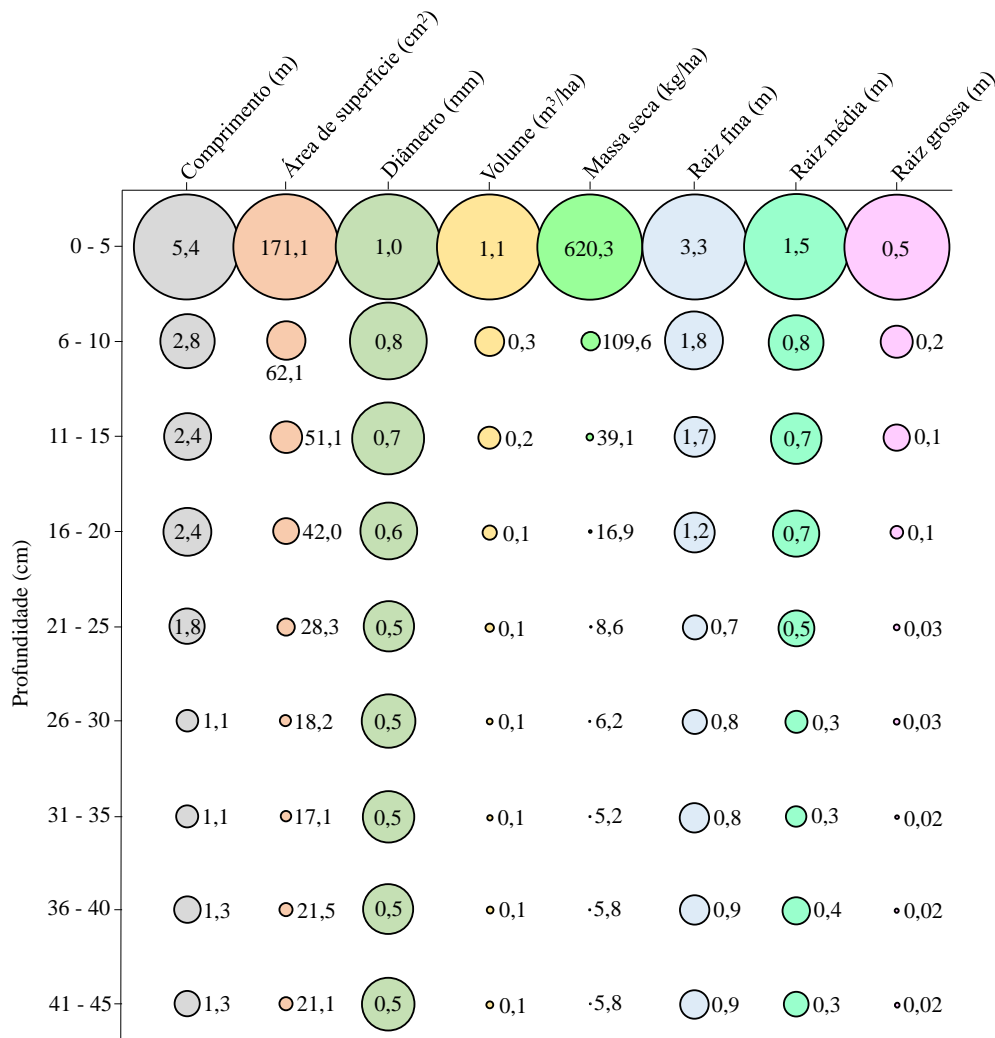


Fonte: Dados do autor.

A média das profundidades no **Local 5** foi de 3,15 m de comprimento, 46,37 cm² de área de superfície, 0,75 mm de diâmetro, 0,41 m³/ha de volume, 98,88 kg/ha de massa seca, 1,94 m de raiz fina, 0,96 m de raiz média e 0,20 m de raiz grossa (Figura 25).

No **Local 6** foi observado até os 10 cm de profundidade aproximadamente 42% do comprimento, 54% da área de superfície, 32% do diâmetro, 64% do volume, 89% da massa seca e 42% de raiz fina, 42% da raiz média e 69% da raiz grossa (Figura 26).

Figura 26 – Atributos de crescimento radicial em soja no **Local 6** e em diferentes profundidades do solo.



Fonte: Dados do autor.

A média das profundidades no **Local 6** foi de 2,18 m de comprimento, 48,05 cm² de área de superfície, 0,62 mm de diâmetro, 0,24 m³/ha de volume, 90,83 kg/ha de massa seca, 1,34 m de raiz fina, 0,61 m de raiz média e 0,11 m de raiz grossa (Figura 26).

4.5 Correlações entre os atributos do solo e o crescimento de raízes

Todos os atributos químicos avaliados influenciaram em uma ou mais variável de crescimento das raízes (Tabela 3). Algumas variáveis apresentaram correlações mais fortes, sendo elas, o comprimento de raiz com o Mn e B, o diâmetro com o P e Ca, a área de superfície, volume e massa seca com o P e Zn, as raízes finas com o Mn, as raízes médias com o B e as raízes grossas com o P e Zn, essas correlações entre as variáveis foram todas positivas.

As correlações mais fortes que foram negativas entre as variáveis foram o comprimento de raiz, área de superfície, volume, massa seca e o comprimento de raiz média com o atributo químico do solo Mg/K (Tabela 3). As raízes finas apresentaram correlação negativa com o pH do solo e as raízes grossas com o Al. O diâmetro de raiz apresentou correlação negativa mais forte com teor de alumínio no solo (Al e Sat/Al).

Tabela 3 – Correlações entre os atributos químicos do solo e atributos de crescimento radicial da soja, de seis locais e até 45 cm de profundidade do solo.

Variáveis	Comp. (m)	Área sup. (cm ²)	Diâmetro (mm)	Volume (m ³ /ha)	Massa seca (kg/ha)	Fina (m)	Média (m)	Grossa (m)
pH	-0,48	0,03	0,65	0,30	0,31	-0,59	-0,20	0,36
SMP	-0,35	0,04	0,52	0,28	0,30	-0,41	-0,21	0,31
P	0,35	0,77	0,70	0,81	0,79	0,19	0,59	0,85
K	0,38	0,68	0,48	0,66	0,67	0,25	0,59	0,68
MO	0,38	0,71	0,59	0,76	0,75	0,26	0,49	0,78
Al	0,04	-0,28	-0,51	-0,38	-0,38	0,13	-0,10	-0,46
Ca	0,12	0,61	0,77	0,76	0,74	-0,02	0,34	0,79
Mg	-0,48	-0,06	0,46	0,20	0,30	-0,56	-0,28	0,23
Al+H	0,24	-0,07	-0,43	-0,23	-0,25	0,29	0,14	-0,29
CTC	0,36	0,43	0,15	0,37	0,35	0,29	0,44	0,34
Sat/bases	-0,19	0,29	0,68	0,50	0,51	-0,30	0,02	0,55
Sat/Al	0,04	-0,28	-0,51	-0,37	-0,37	0,12	-0,11	-0,45
Ca/Mg	0,48	0,71	0,51	0,65	0,56	0,37	0,59	0,71
Ca/K	-0,51	-0,42	0,07	-0,27	-0,27	-0,49	-0,47	-0,23
Mg/K	-0,58	-0,56	-0,08	-0,41	-0,39	-0,53	-0,58	-0,40
S	-0,20	-0,37	-0,24	-0,36	-0,38	-0,13	-0,33	-0,37
Zn	0,39	0,77	0,67	0,77	0,80	0,24	0,60	0,84
Cu	0,15	-0,03	-0,19	-0,10	-0,13	0,22	-0,04	-0,11
B	0,63	0,69	0,23	0,52	0,47	0,54	0,71	0,53
Mn	0,73	0,42	-0,25	0,12	0,06	0,76	0,54	0,13

Valores em negrito são significativos a 5% de probabilidade de erro pelo coeficiente de correlação de Pearson. Comp. – Comprimento total de raiz, Área sup. – Área de superfície da raiz, Fina – Raízes finas (<0,5 mm), Média – Raízes médias (0,5 – 2 mm), Grossa – Raízes grossas (>2,0 mm), pH – Potencial hidrogeniônico, SMP – Poder tampão do solo (pH-SMP), P – Fósforo (mg/dm³), K – Potássio (mg/dm³), MO – Matéria orgânica (%), Al – Alumínio (cmol_d/dm³), Ca – Cálcio (cmol_d/dm³), Mg – Magnésio (cmol_d/dm³), Al+H – Alumínio + Hidrogênio (cmol_d/dm³), CTC – Capacidade de troca de cátions (cmol_d/dm³), Sat/bases – Saturação por bases (%), Sat/Al – Saturação por alumínio (%), Ca/Mg – Relação cálcio por magnésio, Ca/K – Relação cálcio por potássio, Mg/K – Relação magnésio por potássio, S – Enxofre (mg/dm³), Zn – Zinco (mg/dm³), Cu – Cobre (mg/dm³), B – Boro (mg/dm³) e Mn – Manganês (mg/dm³).

Todos os atributos físicos influenciaram uma ou mais característica de crescimento das raízes (Tabela 4). As variáveis que apresentaram correlações mais fortes positivas foram os macroporos com todas as variáveis de crescimento radicial.

Tabela 4 – Correlações entre os atributos físicos do solo e atributos de crescimento radicial da soja de seis locais avaliados e em profundidades de 5 em 5 cm até 45 cm.

Variáveis	Comp. (m)	Área sup. (cm ²)	Diâmetro (mm)	Volume (m ³)	Massa seca (kg/ha)	Fina (m)	Média (m)	Grossa (m)
Areia	0,03	0,03	-0,06	-0,01	0,06	0,01	0,11	0,01
Argila	-0,26	-0,30	-0,04	-0,22	-0,25	-0,21	-0,34	-0,22
Silte	0,44	0,49	0,21	0,42	0,35	0,41	0,41	0,41
Porosidade	0,44	0,47	0,11	0,38	0,29	0,40	0,45	0,35
Macro	0,63	0,71	0,27	0,58	0,53	0,55	0,69	0,57
Micro	-0,01	-0,09	-0,25	-0,12	-0,15	0,01	-0,02	-0,15
Cripto	-0,50	-0,51	-0,04	-0,37	-0,37	-0,43	-0,56	-0,36
RP	-0,58	-0,63	-0,12	-0,51	-0,51	-0,52	-0,61	-0,49
PMP	-0,50	-0,51	-0,04	-0,37	-0,37	-0,44	-0,56	-0,36
CC	-0,43	-0,52	-0,25	-0,43	-0,44	-0,36	-0,50	-0,44
DR	-0,69	-0,80	-0,30	-0,65	-0,64	-0,60	-0,76	-0,66

Valores em negrito são significativos a 5% de probabilidade de erro pelo coeficiente de correlação de Pearson. Comp. – Comprimento total de raiz, Área sup. – Área de superfície da raiz, Fina – Raízes finas (<0,5 mm), Média – Raízes médias (0,5 – 2 mm), Grossa – Raízes grossas (>2,0 mm), Areia (%), Argila (%), Silte (%), Porosidade (m³/m³), Macro – Macroporos (m³/m³), Micro – Microporos (m³/m³), Cripto – Criptoporos (m³/m³), RP – Resistência à penetração (MPa), PMP – Ponto de murcha permanente (m³/m³), CC – Capacidade de campo (m³/m³) e DR – Densidade relativa.

O comprimento, área de superfície, volume, massa seca e raízes finas, médias e grossas apresentaram correlações forte e negativa com a DR e RP. O diâmetro de raiz apresentou correlação negativa apenas com a DR do solo, sendo a variável de crescimento radicial que apresentou menor correlações com os atributos físicos do solo (Tabela 4).

Os atributos biológicos não apresentaram correlação com comprimento de raízes finas (Tabela 5). A Respiração basal apresentou correlações mais fortes com o crescimento de raízes que a biomassa de carbono, no entanto, ambas mostraram influenciar o crescimento radicial. O quociente metabólico não apresentou correlação com nenhuma variável de crescimento radicial da soja.

Tabela 5 – Correlações entre os atributos biológicos do solo e atributos de crescimento radicial da soja de seis locais avaliados e em profundidades de 5 em 5 cm até 45 cm.

Variáveis	Comp. (m)	Área sup. (cm ²)	Diâmetro (mm)	Volume (m ³)	Massa seca (kg/ha)	Fina (m)	Média (m)	Grossa (m)
RB	0,28	0,76	0,75	0,88	0,90	0,14	0,48	0,87
BC	-0,09	0,33	0,71	0,54	0,57	-0,19	0,08	0,54
qCO ₂	-0,06	-0,3	-0,12	0,04	0,11	-0,5	-0,11	-0,02

Valores em negrito são significativos a 5% de probabilidade de erro pelo coeficiente de correlação de Pearson.

Comp. – Comprimento total de raiz, Área sup. – Área de superfície da raiz, Fina – Raízes finas (<0,5 mm), Média – Raízes médias (0,5 – 2 mm), Grossa – Raízes grossas (>2,0 mm), RB – Respiração Basal (mg/kg de solo), BC – Biomassa de carbono (mg/kg de solo) e qCO₂ – Quociente metabólico (mg C-CO₂/g Cmic/dia).

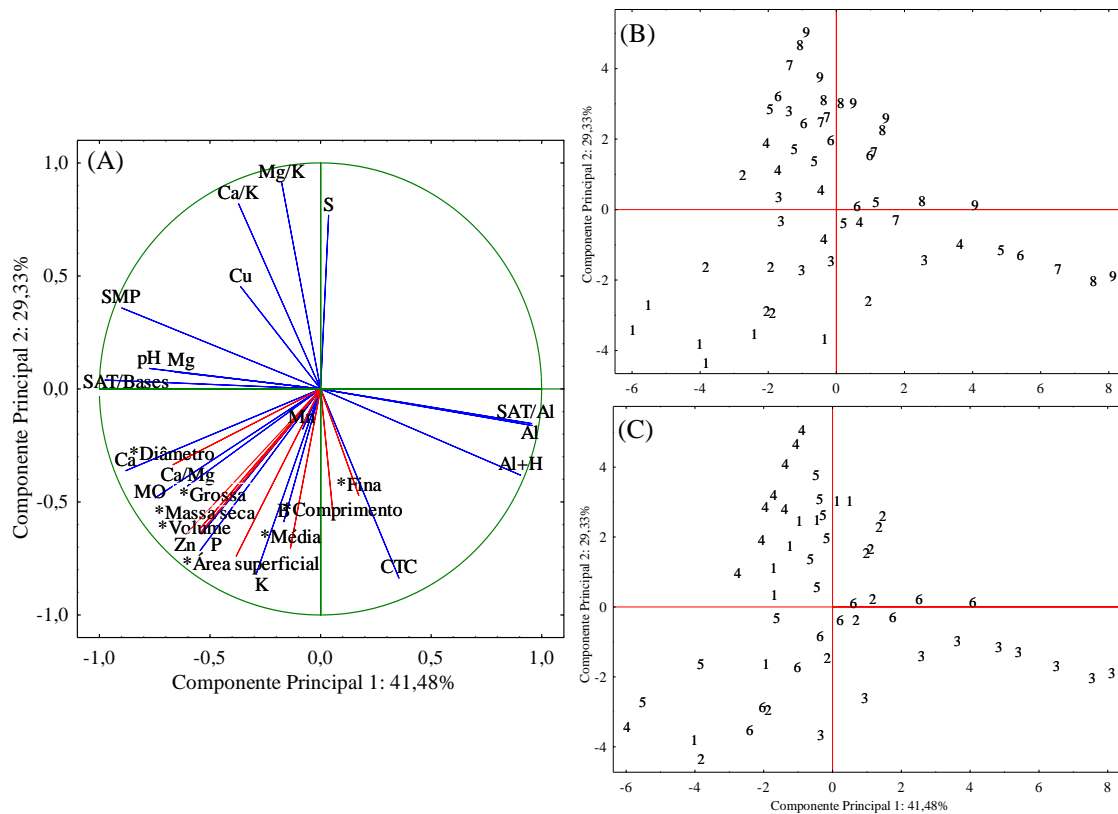
4.6 Relação do crescimento de raízes com os atributos do solo pela análise de componentes principais

A variação explicada por dois componentes principais foi de 70,81%, quando avaliado os atributos químicos do solo (Figura 29-A). A componente principal 1 é responsável por explicar 41,48% da variância total e as variáveis que mais contribuíram no foram: pH, SMP, MO, Al, Ca, Al+H, Sat/Bases e Sat/Al. O fator 2 apresentou explicação de 29,33% e as variáveis que mais contribuíram no fator 2 foram: P, K, CTC, Ca/K, Mg/K e S.

Algumas variáveis estão sobrepostas umas às outras, isso mostra que essas possuem a mesma representatividade no gráfico e algumas variáveis estão bem próximas ao círculo unitário, o que representa que estas possuem uma maior contribuição, em relação às variáveis que estão mais afastadas (Figura 27-A). O Ca, relação Ca/Mg e a MO apresentaram maior influência no diâmetro de raiz, enquanto o P e o Zn nas raízes grossas, massa seca e volume de raiz, o K e B nas raízes médias e na área superficial de raiz e a CTC do solo apresentou maior influência nas raízes finas, no entanto todas essas variáveis químicas apresentaram influência positiva com todas as variáveis de crescimento das raízes de soja. O S e as relações Ca/K e Mg/K estão opostas às variáveis de crescimento radicial na projeção, mostrando que existe uma correlação negativa entre essas variáveis (Figura 27-A). Os eixos da Sat/Al e Al+H formaram angulação próxima ou maior que 90° com as variáveis de crescimento

radicial, mostrando haver uma correlação negativa entre elas quando angulação maior que 90° ou não influenciar quando próximo a 90°.

Figura 27 – Projeção espacial dos vetores de atributos químicos do solo e crescimento radicial em diferentes locais e profundidades do solo.



(A) – Gráfico de distribuição da nuvem de variáveis de crescimento radicial e atributos químicos do solo, * - Variáveis suplementares (crescimento radicial – linhas vermelhas). (B) – Gráfico de distribuição das profundidades (1 = 0 a 5 cm, 2 = 6 a 10 cm, 3 = 11 a 15 cm, 4 = 16 a 20 cm, 5 = 21 a 25 cm, 6 = 26 a 30 cm, 7 = 31 a 35 cm, 8 = 36 a 40 cm e 9 = 41 a 45 cm). (C) - Gráfico de distribuição dos locais (1 = **Local 1**, 2 = **Local 2**, 3 = **Local 3**, 4 = **Local 4**, 5 = **Local 5**, 6 = **Local 6**). Fina – Raízes finas (<0,5 mm), Média – Raízes médias (0,5 – 2 mm), Grossa – Raízes grossas (>2,0 mm), pH – Potencial hidrogeniônico, SMP – Poder tampão do solo (pH-SMP), P – Fósforo (mg/dm³), K – Potássio (mg/dm³), MO – Matéria orgânica (%), Al – Alumínio (cmol/dm³), Ca – Cálcio (cmol/dm³), Mg – Magnésio (cmol/dm³), Al+H – Alumínio + Hidrogênio (cmol/dm³), CTC – Capacidade de troca de cátions (cmol/dm³), Sat/bases – Saturação por bases (%), Sat/Al – Saturação por alumínio (%), Ca/Mg – Relação cálcio por magnésio, Ca/K – Relação cálcio por potássio, Mg/K – Relação magnésio por potássio, S – Enxofre (mg/dm³), Zn – Zinco (mg/dm³), Cu – Cobre (mg/dm³), B – Boro (mg/dm³) e Mn – Manganês (mg/dm³).

Fonte: Dados do autor.

Ao comparar a distribuição das profundidades (Figura 27-B) com a distribuição da nuvem de variáveis de crescimento radicial e atributos químicos do solo (Figura 27-A), pode-se observar que as primeiras camadas de solo apresentaram atributos químicos que favorecem o crescimento radicial de soja, ao contrário das camadas mais profundas (Figura 27-B).

Observa-se que as maiores profundidades do **Local 3** apresentaram teores de Al e os **Locais 5 e 6** apresentaram as maiores profundidades com atributos químicos que favorecem o crescimento radicial em relação aos demais locais (Figura 27-C).

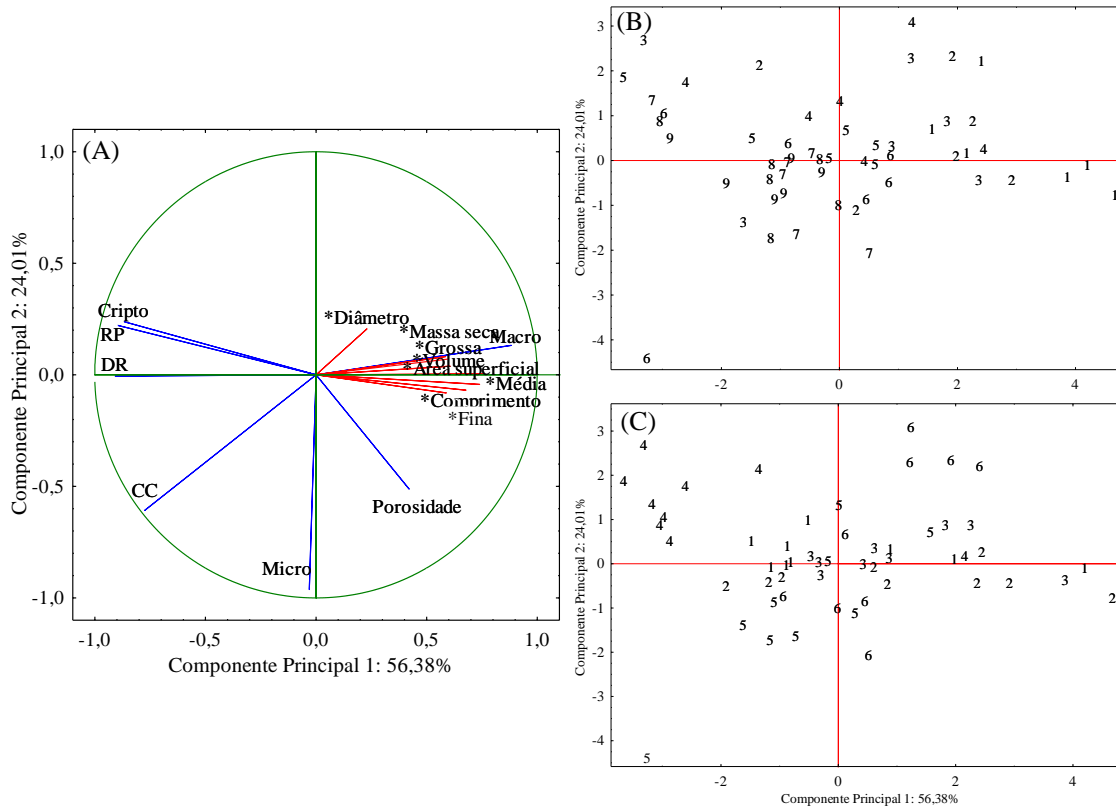
Para os atributos físicos do solo, a componente principal 1 foi responsável por explicar 56,38% da variância total dos dados e as variáveis que mais contribuíram no fator 1 foram: Macroporos, criptoporos, RP, CC e DR. A componente principal 2 explicou 24,01% da variância total e a variável que mais contribuiu no fator 2 foram os microporos (Figura 28-A).

Os macroporos apresentaram correlação positiva com o crescimento radicial, por apresentar um pequeno ângulo com essas variáveis (Figura 28-A). Os microporos que apresentou um ângulo próximo a 90° não apresentou correlação com as variáveis de crescimento radicial. Os criptoporos, resistência à penetração, densidade relativa e a capacidade de campo apresentaram ângulos maiores que 90° com as variáveis de crescimento radicial, indicando uma correlação negativa entre essas variáveis (Figura 28-A).

As camadas superficiais do solo apresentaram maior quantidade de macroporos que estão relacionados positivamente com o crescimento radicial (Figura 28-B). As profundidades indicam apresentar maior quantidade de criptoporos, resistência à penetração e densidade relativa do solo.

Observa-se que todos os locais apresentaram ao menos uma profundidade no quadrante em que se relaciona positivamente com o crescimento radicial (Figura 28-C). O **Local 4** a partir dos 6 cm de profundidade apresentou todas as demais camadas no quadrante que é oposto ao crescimento das raízes de soja.

Figura 28 – Projeção espacial dos vetores de atributos físicos do solo e crescimento radicial em diferentes locais e profundidades do solo.



(A) – Gráfico de distribuição da nuvem de variáveis de crescimento radicial e atributos físicos do solo, * - Variáveis suplementares (crescimento radicial – linhas vermelhas). (B) – Gráfico de distribuição das profundidades (1 = 0 a 5 cm, 2 = 6 a 10 cm, 3 = 11 a 15 cm, 4 = 16 a 20 cm, 5 = 21 a 25 cm, 6 = 26 a 30 cm, 7 = 31 a 35 cm, 8 = 36 a 40 cm e 9 = 41 a 45 cm). (C) – Gráfico de distribuição dos locais (1 = **Local 1**, 2 = **Local 2**, 3 = **Local 3**, 4 = **Local 4**, 5 = **Local 5**, 6 = **Local 6**). No gráfico (A) as linhas vermelhas representam os componentes de crescimento radicial. Fina – Raízes finas (<0,5 mm), Média – Raízes médias (0,5 – 2 mm), Grossa – Raízes grossas (>2,0 mm), Porosidade (m^3/m^3), Macro – Macroporos (m^3/m^3), Micro – Microporos (m^3/m^3), Cripto – Criptoporos (m^3/m^3), RP – Resistência à penetração (MPa), CC – Capacidade de campo (m^3/m^3) e DR – Densidade relativa.

Fonte: Dados do autor.

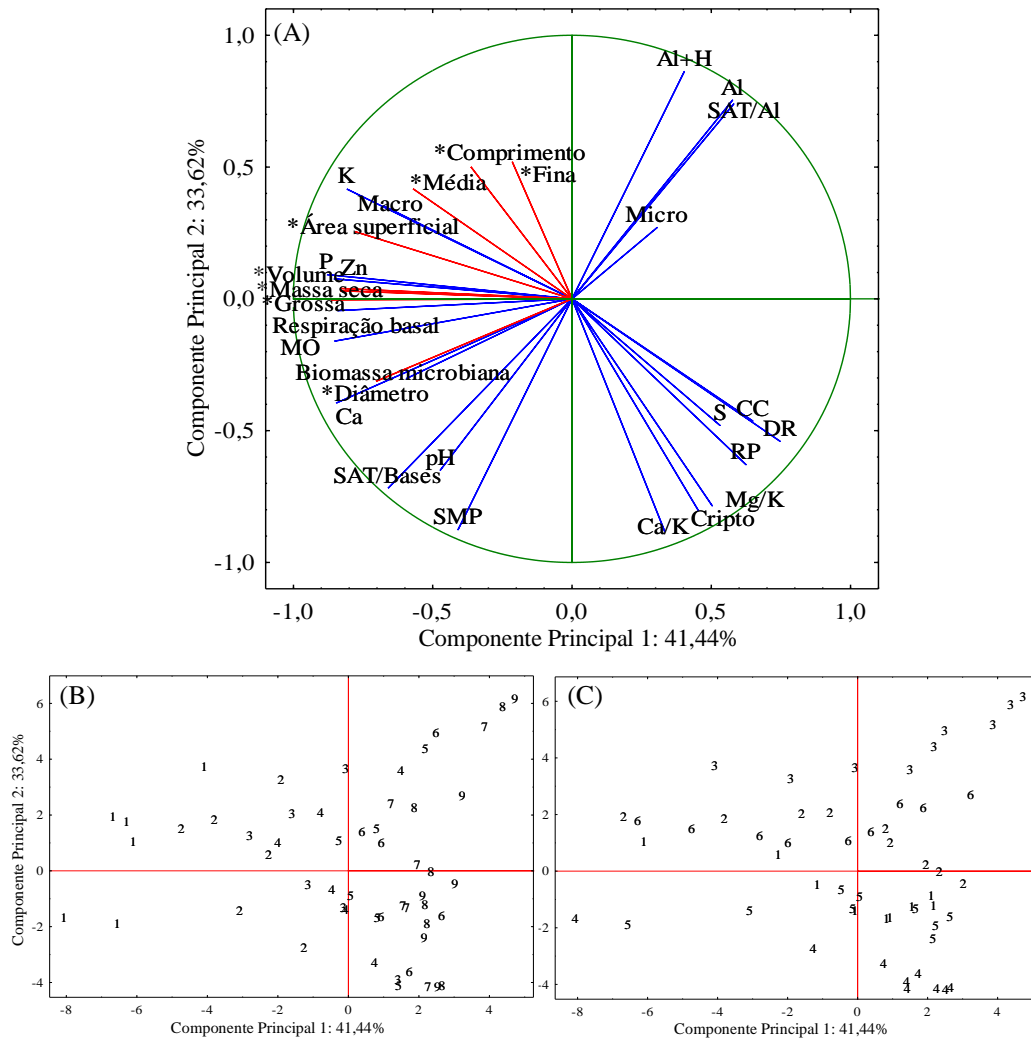
A variância explicada pelas duas componentes principais foi de 75,06%, quando os atributos químicos, físicos e biológicos do solo foram analisados em conjunto (Figura 29-A). A componente principal 1 foi responsável por explicar 41,44% da variância total e as variáveis que mais contribuíram no fator 1 foram: P, K, MO, Ca, DR, Respiração basal e Zn. A componente principal 2 apresentou explicação de 33,62% e as variáveis que mais contribuíram para o fator 2 foram: SMP, Al, Al+H, Sat/Bases, Sat/Al, Ca/K, Mg/K e criptoporos.

As variáveis próximas umas às outras como o Al e Sat/Al, CC e DR, Ca e biomassa microbiana, P e Zn, e K e macroporos possuem a mesma representatividade no gráfico e as variáveis que estão bem próximas ao círculo unitário que são as variáveis que compõem o fator 1 e 2 possuem uma maior contribuição na variância encontrado nos solos, em relação às variáveis que estão mais afastadas (Figura 29-A).

As profundidades de solo de 1 a 4 que correspondem de 0 a 20 cm de profundidade se concentraram nos quadrantes que representam o crescimento radicial, ou seja, apresentaram características químicas, físicas e biológicas do solo que favoreceram o crescimento radicial das plantas de soja (Figura 29-B, C). Todas as demais profundidades apresentaram atributos do solo que desfavoreceu o crescimento radicial.

O **Local 3** apresentou as profundidades de 21 a 45 cm no quadrante que é oposto ao crescimento radicial que apresenta alto teor de Al (Figura 29-B, C). O **Local 4** a partir dos 16 cm de profundidade estão situados no quadrante de maior concentração de criptoporos e maiores relações de Ca/K e Mg/K, que estão correlacionados negativamente com o crescimento radicial. Os **Locais 1, 2 e 5** apresentaram as profundidades de 0 a 20 cm nos quadrantes que representam o crescimento radicial, os **Locais 3 e 4** apresentaram até a profundidade de 15 cm e o **Local 6** apresentou até os 25 cm de profundidade, sendo o **Local 6** que mais apresentou camadas com atributos químicos, físicos e biológicos que favorecem o crescimento radicial.

Figura 29 – Projeção espacial dos vetores de atributos químicos, físicos e biológicos do solo e crescimento radicial em diferentes locais e profundidades do solo.



(A) – Gráfico de distribuição da nuvem de variáveis de crescimento radicial e atributos químicos, físicos e biológicos do solo, * – Variáveis suplementares (crescimento radicial – linhas vermelhas). (B) – Gráfico de distribuição das profundidades. (C) - Gráfico de distribuição dos locais. Fina – Raízes finas (<0,5 mm), Média – Raízes médias (0,5 – 2 mm), Grossa – Raízes grossas (>2,0 mm), pH – Potencial hidrogeniônico, SMP – Poder tampão do solo (pH-SMP), P – Fósforo (mg/dm³), K – Potássio (mg/dm³), MO – Matéria orgânica (%), Al³⁺– Alumínio (cmol_c/dm³), Ca – Cálcio (cmol_c/dm³), Al+H – Alumínio + Hidrogênio (cmol_c/dm³), Sat/bases – Saturação por bases (%), Sat/Al – Saturação por alumínio (%), Mg/K – Relação magnésio por potássio, S – Enxofre (mg/dm³), Zn – Zinco (mg/dm³), Porosidade (m³/m³), Macro – Macroporos (m³/m³), Micro – Microporos (m³/m³), CC – Capacidade de campo (m³/m³) e DR – Densidade relativa. Respiração Basal (mg/kg de solo) e Biomassa microbiana (mg/kg de solo).

Fonte: Dados do autor.

5 DISCUSSÃO

O pH de todos os locais e profundidades apresentam valores inferiores de pH 6,0, que é a faixa crítica para a cultura da soja. Ainda, observa-se a dificuldade de manter uniforme o pH no perfil do solo, com valores menores nas camadas mais profundas em comparação às camadas superficiais e isso ocorreu independente do teor de matéria orgânica e argila no solo. No entanto a alta acidez do solo na camada subsuperficial, pode restringir o crescimento radicial e conseqüentemente afetar a captação de água e nutrientes (DALLA NORA; AMADO, 2013; ZANDONÁ et al., 2015). Uma das conseqüências de pH baixo do solo é a presença de alumínio trocável, que reaparece em solos com pH menor de 5,5 (CQFS, 2016). Dessa forma, há presença de alumínio nos seis locais, principalmente nos **Locais 3 e 6**, os quais também apresentam as menores médias de cálcio e magnésio. A toxidez por alumínio reduz o crescimento da raiz e normalmente as raízes são curtas, grossas e quebradiças, apresentam poucas ramificações finas, tornando-se pouco eficientes na absorção de água e de nutrientes do subsolo (FERTILIDADE E BIOLOGIA DO SOLO, 2017).

A maior concentração de matéria orgânica foi nos primeiros centímetros de profundidade do solo, no entanto nenhuma profundidade atingiu valor da faixa crítica de 5%. O baixo percentual de matéria orgânica no solo afeta negativamente o crescimento radicial, pois a mesma, apresenta influência direta nos pilares químico, físico e biológico do solo. A matéria orgânica tem funções na ciclagem e retenção de nutrientes, forma agregados no solo e é fonte de energia para a atividade biológica (GMACH et al., 2020; ZHOU et al., 2020).

Os macronutrientes fósforo, potássio e cálcio, apresentam funções determinantes no crescimento radicial das plantas, tais como energia, ativação enzimática e estruturação da parede vegetal (FAGERIA; MOREIRA, 2011). No entanto, são nutrientes de difícil manejo

no perfil do solo, apresentando altas concentrações nos primeiros centímetros de profundidade, assim como os micronutrientes zinco, boro e manganês. A distribuição dos nutrientes fósforo e potássio no perfil do solo apresentaram ser um problema nos seis locais, pois a concentração exigida pela soja, ocorreu apenas nos primeiros centímetros de profundidade dos solos. De forma generalizada, pode-se considerar que esses dois nutrientes estão em teores adequados apenas até 10 cm de profundidade. O cálcio, em profundidade, nos **Locais 1, 2, 4 e 5**, apresentam teores médios no solo, enquanto nos **Locais 3 e 6**, o cálcio pode ter sido um limitante no crescimento radicial pela baixa concentração, principalmente no **Local 6**. Pensando no efeito do cálcio e magnésio para a correção do pH, o **Local 3** foi o único local que apresentou teores baixos de magnésio em profundidade no solo e obteve a menor média de pH. O enxofre é um elemento com alto potencial de lixiviação devido sua baixa retenção no solo (PIAS et al., 2019), dessa forma, em todos os locais a presença de enxofre foi maior em profundidade, enquanto na superfície, onde efetivamente as raízes se concentram, a presença de enxofre é baixa.

Entre os micronutrientes, apenas o cobre não apresentou limitações de concentração nos seis locais. O manganês apresentou concentração considerada média em profundidade, nos **Locais 4 e 6**. O manganês é um cofator essencial no processo de oxidação da água no fotossistema II e eliminação de espécies reativas de oxigênio (ROS), podendo a deficiência desse nutriente afetar o crescimento das raízes pela baixa disponibilidade de fotoassimilados (ALEJANDRO et al., 2020). O boro no **Local 3** não apresentou limitações, no entanto, para os demais locais apresentou limitações em profundidade e inclusive no **Local 6**, a concentração foi média em todas as profundidades. A deficiência de boro inibe o crescimento das raízes por diminuir a atividade do ácido indolacético (AIA) (LI et al., 2016), sendo que o AIA atua na iniciação e emergência de raízes laterais e na mitose das células (ALARCÓN; SALGUERO; LLORET, 2019). Desta forma, destaca-se também a importância do micronutriente zinco, que atua na síntese de triptofano, que é um precursor requerido pela síntese do AIA (ALMEIDA; RODRIGUES, 2016) e que apresentou teores médios em todos os locais e em quase todas as profundidades.

Diante do comportamento dos nutrientes no solo, deve-se repensar a forma de coleta de solo para análise química. A indicação para coleta de solo no sistema plantio direto consolidado é de 0 a 10 cm e se houver restrição química ao crescimento vegetal de 11 a 20 cm de profundidade (CQFS, 2016). Ao fazer uma coleta de 0 a 10 cm de profundidade, será obtida a média do nutriente na camada avaliada e assim pode encontrar um valor considerado adequado do nutriente, mas por exemplo, a concentração a partir de 5 cm de profundidade pode ser inferior a faixa crítica para o pleno desenvolvimento da cultura. Dessa forma, a coleta do solo para análise química deve ser estratificada, para ter o conhecimento da composição química no perfil do solo e a partir disso planejar o manejo mais adequado para cada situação. Ao pensar em altas produtividades e pelas características dos perfis de solo deste trabalho, nota-se a necessidade de avaliar o solo em maior profundidade. Dessa forma, segure-se que sejam realizadas coletas de solo para análise química de 0 a 5 cm, 6 a 10 cm, 11 a 20 cm e 21 a 40 cm, em que de 0 a 20 cm é importante avaliar a condição química geral, principalmente se há um gradiente de fósforo, cálcio e potássio e de 20 a 40 cm é interessante para avaliar principalmente se há presença de alumínio, cátions e enxofre. A aplicação de gesso proporcionou incremento nas concentrações de cálcio e enxofre em profundidade no solo, lixiviou magnésio e não lixiviou o potássio e sob restrição hídrica, favoreceu a produtividade do milho, trigo e soja, pelas alterações no sistema radicial das plantas (PAULETTI et al., 2014).

Foi estimada a densidade relativa do solo porque ela considera a textura do solo, pois solos arenosos apresentam densidade superior aos solos argilosos, enquanto a densidade dos solos siltosos fica entre arenosos e argilosos (LIBARDI, 2005). Assim, pode a densidade do solo (g/cm^3) não condizer com a real restrição que o solo apresenta ao crescimento radicial. Nota-se, que as densidades dos solos em profundidade, apresentaram restrição ao crescimento radicial, mas a porosidade total do solo não condiz com isso, pois os valores encontrados de porosidade total foram altos. A explicação para essa densidade relativa maior em profundidade, está no volume de macroporos, microporos e criptoporos.

A porosidade total do solo desejada é próxima a 50%, sendo aproximadamente 33% de macroporos e 66% de microporos (REYNOLDS et al., 2002). O que se observa nos seis

locais, é que essa proporção de tamanho de poros não está adequada. O volume de macroporos foi adequado em algumas profundidades do solo, mas em geral está abaixo do desejado. O volume de microporos é praticamente a metade do desejado e os criptoporos que nem aparecem na classificação de Reynolds et al. (2002), são os poros com maior volume nos solos. Mesmo com o volume de poros totais adequado, em profundidade, os macroporos diminuem e aumentam os microporos e em maior proporção os criptoporos, tornando o solo mais denso. Em solos com diferentes texturas e manejos, foram alcançados valores considerados adequados para a capacidade de água disponível para plantas de $\geq 0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e para macroporos de $\geq 0,07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (REYNOLDS et al., 2009).

O baixo volume de macroporos, pode resultar em solo deficiente em oxigênio para uso das raízes e microrganismos do solo. O valor de macroporos desejado é $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e considerando que o ar do solo tem concentração de 21% de oxigênio, pode-se considerar que 4,2% de oxigênio por m^3 de solo é um valor adequado. A concentração de 10% de oxigênio no ar começa a comprometer o crescimento das plantas e o desenvolvimento de alguns microrganismos (KUZMA et al., 1999; TORRES; SARAIVA; GALERANI, 1993). Desta forma, pode-se considerar o limite crítico para o desenvolvimento das plantas de 2,0% de oxigênio por m^3 de solo ($0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3 \times 10\%$ de concentração de oxigênio). Então, podemos considerar, o limite inferior de macroporos para armazenamento de oxigênio suficiente às plantas de aproximadamente $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$, no entanto, deve ser lembrado que as raízes não ocupam todo o espaço do solo, conseqüentemente não entram em contato com todo esse oxigênio do solo. Neste trabalho, consideramos como valor adequado de $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de macroporos. Inicialmente, imagina-se que quanto mais macroporos melhor, no entanto, o volume alto de macroporos limita o volume de microporos e torna a capacidade de campo do solo menor e o contrário também é verdadeiro, sendo ideal uma determinada proporção no volume de cada tamanho de poro.

Em geral, os microporos apresentaram valores abaixo do desejado ($0,20$ a $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Assim, o que fica comprometido nos seis locais é a quantidade de água disponível às plantas, pela baixa capacidade de armazená-la. O volume de água disponível às plantas, que os solos apresentaram capacidade de armazenar na média das profundidades, variou de

0,11 a 0,16 m³/m³. Dessa forma, os solos têm capacidade de armazenar em média 66 a 96 mm de água disponível às plantas, até 60 cm de profundidade. Se considerarmos que o crescimento radicial se dá principalmente até os 20 cm de profundidade do solo e o volume médio de microporos entre os locais até essa profundidade variou de 0,095 a 0,145 m³/m³, a capacidade do solo em armazenar água disponível às plantas passa a ser de 19 a 29 mm. A necessidade de água aumenta durante o desenvolvimento da soja, atingindo o pico máximo no período de floração/enchimento de grãos, onde necessita de 7 a 8 mm/dia (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Dessa forma, considerando que o volume de água disponível no solo até 60 cm de profundidade será todo absorvido pelas plantas e o consumo é de 8 mm/dia, as plantas se manteriam de 8 a 12 dias sem restrição hídrica e até 20 cm de profundidade se manteriam sem restrição hídrica de 2 a 4 dias. Desta forma, neste estudo foi considerado adequado o valor de 0,20 a 0,30 m³/m³ de microporos.

Observa-se que os locais apresentaram capacidade de armazenar água disponível às plantas na média das profundidades de 37 a 42% por m³ de solo (CC), mas apresentaram capacidade de armazenar água que é indisponível às plantas de 22 a 30% por m³ de solo (PMP). Mesmo tratando-se de locais diferentes, com manejos distintos entre eles, observa-se que os problemas no volume de poros são similares. Em todos os locais, o volume de macroporos e microporos são baixos, enquanto o volume de criptoporos é aproximadamente a soma de macroporos e microporos.

A resistência à penetração do solo apresentou em geral um aumento com o incremento da profundidade, o que está relacionado diretamente com o volume de poros e com a textura do solo, sendo possível observarmos que o percentual de argila aumenta com a profundidade e o contrário ocorre com a areia. Em geral, tem-se adotado o valor de RP de 2,0 MPa como crítico ao crescimento radicial (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). No entanto, foi observado em Latossolo Vermelho distrófico, que a resistência à penetração de 0,85 MPa resultou em decréscimo de 18% na densidade de raízes e ocorreu redução na produtividade da soja (BEULTER; CENTURION, 2004). Neste trabalho, valores iguais ou acima de 2,0 MPa foram considerados limitantes ao crescimento radicial.

Os microrganismos do solo, podem ser considerados bioindicadores do sistema. No momento que o solo apresenta condições para o desenvolvimento e crescimento populacional de microrganismos, significa que o solo é bem estruturado quimicamente e fisicamente e possivelmente a restrição ao crescimento radicial é baixa. A presença da fauna edáfica e suas atividades no ecossistema são influenciadas pelo solo e práticas culturais, podendo a simplificação dos ecossistemas e a degradação do solo diminuir a densidade e diversidade da biota do solo (FERTILIDADE E BIOLOGIA DO SOLO, 2017). A maior biomassa nos primeiros centímetros de profundidade no perfil dos solos, pode se dar pelas condições favoráveis, como maior quantidade de oxigênio (macroporos), menor densidade relativa do solo, maior presença de nutrientes e matéria orgânica, pH mais elevado e menor concentração de alumínio. Isso se justifica, ao observar que o quociente metabólico foi superior em profundidade, mostrando um consumo superior de C-CO₂ por unidade de biomassa microbiana. Os valores considerados adequados e inadequados do quociente respiratório foram calculados a partir dos dados de respiração basal e biomassa microbiana, determinados por Lopes et al. (2013). O quociente metabólico superior nos **Locais 3 e 6** em comparação aos demais locais, pode ser justificado pela menor porosidade total, pH, matéria orgânica e biomassa microbiana e maior teor de alumínio em profundidade.

Afim de determinar se adequado ou não a quantidade de respiração basal, biomassa microbiana e quociente respiratório, foram utilizados valores de um trabalho conduzido no Cerrado brasileiro, com solo classificado como Latossolo vermelho distrófico, precipitação média anual de 1500 mm, seca de maio a setembro e chuvas de outubro a abril e as temperaturas médias anuais máxima e mínima são 26,4 e 15,9 °C (LOPES et al., 2013). Ou seja, as condições climáticas são distintas da região de Passo Fundo, onde foram realizados os experimentos, podendo esses limites serem diferentes para a região deste trabalho. O que deve ser observado é que a biomassa microbiana diminui em profundidade e o quociente metabólico aumenta, tornando o sistema menos sustentável pela menor fixação de carbono no sistema devido a condições estressantes aos microrganismos.

Observa-se crescimento radicial até os 45 cm de profundidade em todos os locais, no entanto a quantidade de raiz diminui com o aumento da profundidade. É esperado que plantas

anuais apresentam elevada concentração de raízes nos primeiros centímetros de profundidade do solo, no entanto é observado pouca quantidade de raízes a partir de 11 cm de profundidade. Todos os locais estudados, apresentaram correlações positivas entre o crescimento radicial e variáveis químicas, físicas e biológicas do solo, que apresentam alta concentração nos primeiros centímetros de profundidade do solo, enquanto os atributos do solo que apresentaram correlação negativa com o crescimento radicial, aumentam com o incremento da profundidade do solo.

De forma geral, o pH do solo, alumínio, matéria orgânica, resistência à penetração e o volume de microporos e criptoporos não foram adequados no perfil do solo nos seis locais estudados. Além desses problemas, o **Local 1** apresentou valores não considerados adequados de potássio (a partir de 6 cm de profundidade), zinco (a partir de 11 cm), fósforo, macroporos e densidade relativa (a partir de 16 cm), boro (a partir de 26 cm), biomassa de carbono (a partir de 31 cm) e cálcio (a partir de 36 cm). O **local 2** apresentou valores não considerados adequados de fósforo (a partir de 11 cm), potássio (a partir de 16 cm), zinco e biomassa de carbono (a partir de 21 cm), boro (a partir de 26 cm) e cálcio, macroporos e densidade relativa (a partir de 31 cm). O **local 3** apresentou valores não considerados adequados de fósforo, potássio e zinco (a partir de 11 cm), macroporos (a partir de 16 cm), magnésio (a partir de 21 cm), biomassa de carbono (a partir de 26 cm) e cálcio (a partir de 31 cm). O **local 4** apresentou valores não considerados adequados de potássio, macroporos e densidade relativa (a partir de 6 cm), boro (a partir de 11 cm), fósforo e zinco (a partir de 16 cm), cálcio (a partir de 31 cm) e biomassa de carbono (a partir de 41 cm). O **local 5** apresentou valores não considerados adequados de macroporos e potássio (a partir de 6 cm), fósforo (a partir de 11 cm), cálcio (a partir de 21 cm), zinco e densidade relativa (a partir de 26 cm) e boro e biomassa de carbono (a partir de 41 cm). O **local 6** apresentou valores não considerados adequados de boro (todo perfil), cálcio (a partir de 6 cm), fósforo, zinco e densidade relativa (a partir de 16 cm), biomassa de carbono (a partir de 21 cm), manganês (a partir de 26 cm) e potássio e macroporos (a partir de 31 cm).

Os **Locais 3 e 6** apresentaram mais alumínio tóxico e menos cálcio que os demais locais. Ao comparar o crescimento radicial, o **Local 3** não apresentou diferença expressiva

com os **Locais 1 e 2**, enquanto o **Local 6** apresentou diferença expressiva com os **Locais 4 e 5**. Na média dos locais, na safra de 2018/2019 (**Locais 4, 5 e 6**) o volume pluvial foi superior em 286,65 mm da safra de 2017/2018 (**Locais 1, 2 e 3**). Vale ressaltar que no ano em que o volume de chuvas foi menor, o solo que apresentou alto teor de alumínio (**Local 3**) também apresentou o sistema radicial próximo aos locais com menor teor de alumínio no solo (**Locais 1 e 2**), enquanto no ano com volume maior de precipitação pluvial, o solo com maior teor de alumínio (**Local 6**), apresentou crescimento radicial inferior em relação aos solos com menor teor de alumínio (**Locais 4 e 5**). No ano que houve menor volume de chuvas a soja apresentou mais raízes finas em profundidade, em comparação ao ano de maior volume de chuvas. Nos **Locais 4 e 5** ocorreram 11 dias sem chuvas e no **Local 6** foram 13 dias sem chuvas (início 27 dias após a semeadura). Nos **Locais 1 e 2** ocorreu 15 dias sem chuvas (início 18 dias após a semeadura) e 49 dias com volume de 22 mm, (início 30 dias após a semeadura). No **Local 3**, foram 27 dias com 30 mm (início 23 dias após semeadura) e 11 dias com 3,8 mm (início 60 dias após semeadura). Dessa forma, observa-se que durante os estádios fenológicos do vegetativo dos **Locais 1, 2 e 3**, as plantas estavam constantemente sob restrição hídrica, então mesmo plantas que cresciam em solo com alumínio, apresentaram crescimento radicial próximo aos locais com teor baixo de alumínio. O estresse hídrico desencadeia a síntese de ácido abscísico nas raízes, induzindo o fechamento dos estômatos e redução na fotossíntese, porém, estimula o crescimento das raízes e a formação de raízes laterais, por meio da divisão e alongamento celular (HARRIS, 2015).

A componente principal 1 dos atributos químicos do solo, é composta por variáveis que estão relacionadas com o pH do solo, ou seja, em torno de 40% da variação que existe nos solos dos seis locais, é referente as variáveis correlacionadas com o pH do solo. A componente principal 2 é formada basicamente pelos macronutrientes e capacidade de troca de cátions do solo. O cálcio, matéria orgânica, zinco, fósforo, potássio e capacidade de troca de cátions influenciam diretamente o crescimento radicial da soja. As menores profundidades do solo, estão no mesmo quadrante do crescimento radicial e as maiores profundidades estão relacionadas com a presença de alumínio no solo e/ou alta relação entre Ca/K e Mg/K, que estão no quadrante oposto ao crescimento radicial. Os **Locais 3 e 6** se concentram no quadrante de solos mais ácidos e com presença de alumínio.

Os macroporos do solo estão diretamente relacionados e favorecem o crescimento radicial. Os macroporos tendem a diminuir a densidade do solo e conseqüentemente a resistência à penetração do solo e o contrário ocorre com os criptoporos. A componente principal 1 da análise dos atributos físicos do solo, é representada por variáveis que estão ligadas a densidade do solo, que representam em torno de 56% da variação encontrada entre os locais e profundidades estudadas. Os microporos que compõem a componente principal 2, não apresentaram relação com o crescimento radicial da soja, pois formam uma angulação próxima a 90° entre si.

A análise multivariada é um conjunto de técnicas estatísticas que permite a análise e interpretação de conjuntos de dados, de natureza quantitativa, com grande número de variáveis e de forma simplificada (NEISSE; HONGYU, 2016). Dessa forma, não foi possível realizar a análise de componentes principais com os atributos biológicos do solo, pois a respiração basal, biomassa microbiana e quociente metabólico não são suficientes para a análise. No entanto, na representação gráfica em que estão todos os atributos do solo, a respiração basal faz parte da componente principal 1 e juntamente com a biomassa microbiana estão no quadrante de crescimento radicial.

Por meio dos dados obtidos, podemos definir alguns atributos do solo que explicam a maior variância dos solos e relacioná-los com o crescimento das raízes de soja. Os macronutrientes, juntamente com a densidade relativa, respiração basal e teor de zinco no solo, representam em torno de 41% da variância do solo e ao juntar variáveis de pH e alumínio do solo, teremos mais 34% dessa variabilidade. Ou seja, pode-se estudar essas variáveis para entender o comportamento das raízes, pois são elas que representam a maior variância presente entre os locais e profundidades dos solos.

As maiores profundidades do solo estão localizadas nos quadrantes opostos ao crescimento radicial, que no geral, apresentam problemas químicos e físicos no solo, enquanto as menores profundidades estão dispostas nos quadrantes que favorecem o crescimento radicial da soja. Os locais apresentaram dois grupos, sendo o **Local 3** localizado no quadrante que apresenta alumínio e o **Local 4** localizado no quadrante que apresenta

problemas físicos no solo. Os demais locais apresentaram as profundidades em todos os quadrantes, não formando grupos.

O **Local 4** apresentou a menor média de macroporos e microporos e maior média de criptoporos, densidade relativa e resistência à penetração entre todos os locais. Quando o **Local 4** é comparado com o **Local 6** que apresentou problemas químicos (menor pH, Ca, S e maior Al), observa-se que o crescimento radicial foi menor no solo com problemas químicos em relação ao solo com problemas físicos. Evidenciando que nas condições ambientais da safra de 2018/2019 (mais chuvas), problemas químicos no solo impediram o crescimento radicial da soja mais que os problemas físicos do solo. Talvez isso ocorreu porque os solos compactados apresentam fissuras e assim as raízes conseguiram ultrapassar barreiras físicas do solo, apresentando raízes de maior diâmetro. Nas condições ambientais da safra 2017/2018 (menos chuvas), observa-se que o solo com restrição física (**Local 1**) apresentou menor crescimento radicial em profundidade, em relação ao solo com problemas químicos (**Local 3**).

Todos os locais apresentaram condições favoráveis ao crescimento das raízes na superfície do solo. Quando o crescimento radicial é concentrado nos primeiros centímetros de profundidade do solo, existe o problema que em pequenos períodos sem chuva, a água disponível às plantas será insuficiente ao seu pleno desenvolvimento, resultando em perda no potencial produtivo da soja. Isso torna-se mais grave ao analisarmos os dados pluviométricos, que é comum durante o desenvolvimento da cultura da soja períodos com restrição hídrica. Ter maior crescimento de raízes em profundidade, não garante que a planta não perderá potencial produtivo em períodos sem chuva, mas garante que essa perda seja amenizada.

6 CONCLUSÕES

O potássio, fósforo, cálcio, zinco, matéria orgânica, macroporos, respiração basal e biomassa microbiana são os atributos do solo que estão positivamente correlacionados positivamente com o crescimento radicial da soja e a presença de alumínio e alta densidade relativa do solo limitam o crescimento radicial da soja.

A amostragem estratificada do solo é necessária para a definição de um diagnóstico e geração de um manejo assertivo para o crescimento radicial da soja.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao estudar as raízes é necessário considerar os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, pois todos apresentam correlações com o crescimento de raiz.

O ideal é analisar o solo de forma estratificada, dividindo-o em mais camadas para ter a certeza de como está o gradiente químico. Ao analisar camadas maiores, pode-se ocultar informações importantes que limitam o crescimento radicial e resultam em tomadas de decisões precipitadas.

Os seis locais apresentaram características similares na composição dos solos, com acúmulo de nutrientes e vida na superfície do solo e elemento tóxico e compactação em profundidade. Dessa forma, estudos que avaliam o comportamento do solo perante diferentes manejos se mostram necessários, para assim adequar os tratamentos culturais de acordo com o que o solo necessita e beneficiar o crescimento radicial das culturas.

REFERÊNCIAS

ADAMCZYK, B.; SIETIÖ, O-M.; STRAKOVÁ, P.; PROMMER, J.; WILD, B.; HAGNER, M.; PIHLATIE, M.; FRITZE, H.; RICHTER, A.; HEINONSALO, J. Plant roots increase both decomposition and stable organic matter formation in boreal forest soil. **Nature Communications**, v.10, article 3982, 2019.

ALARCÓN, M. V.; SALGUERO, J.; LLORET, P. G. Auxin modulated initiation of lateral roots is linked to pericycle cell length in maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, article 11, 2019.

ALEJANDRO, S.; HÖLLER, S.; MEIER, B.; PEITER, E. Manganese in Plants: from acquisition to subcellular allocation. **Frontiers Plant Science**, v. 11, article 300, 2020.

ALI, M. L.; LUETCHENS, J.; SINGH, A.; SHAVER, T. M.; KRUGER, G. R.; LORENZ, A. J. Greenhouse screening of maize genotypes for deep root mass and related root traits and their association with grain yield under water-deficit conditions in the field. **Euphytica**, v. 207, p. 79-94, 2016.

ALMEIDA, G. M.; RODRIGUES, J. G. L. Desenvolvimento de plantas através da interferência de auxinas, citocininas, etileno e giberelinas. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 9, p. 111-117, 2016.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 10, p. 215-221, 1978.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environment conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, p. 393-395, 1993.

ARVE, L. E.; TORRE, S.; OLSEN, J. E.; TANINO, K. K. **Stomatal responses to drought stress and air humidity**. In: *Abiotic Stress Plants - Mechanisms and*

Adaptations. SHANKER, A.; VENKATESWARLU, B. editors. London: InTechOpen, pp. 279-280, 2011.

BAIBAKOVA, E. V.; NEFEDJEVA, E. E.; SUSKA-MALAWSKA, M.; WILK, M.; SEVRIUKOVA, G. A.; ZHELTOBRIUKHOV, V.F. Modern fungicides: Mechanisms of action, fungal. **Resistance and Phytotoxic Effects**, v. 32, p. 1-16, 2019.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; ELRASHIDI, M. Toxicity and nutrient constraints on root growth. **HortScience**, v. 33, p. 960-965, 1998.

BALZERGUE, C.; DARTEVELLE, T.; GODON, C.; LAUGIER, E.; MEISRIMLER, C.; TEULON, J. M.; CREFF, A.; BISSLER, M.; BROUCHOUD, C.; HAGÈGE, A.; MÜLLER, J.; CHIARENZA, S.; JAVOT, H.; BECUWE-LINKA, N.; DAVID, P.; PÉRET, B.; DELANNOY, E.; THIBAUD, M. C.; ARMENGAUD, J.; ABEL, S.; PELLEQUER, J. L.; NUSSAUME, L.; DESNOS, T. Low phosphate activates STOP1-ALMT1 to rapidly inhibit root cell elongation. **Nature Communications**, v. 8, article 15300, 2017.

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**, v. 48, p. 75-92, 2002.

BARTLETT, R. J.; ROSS, D. N. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of American Journal**, v. 52, p. 1191-1192, 1988.

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

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 581-588, 2004.

BLATT, M. R.; CHAUMONT, F.; FARQUHAR, G. Focus on water. **Plant Physiology**, v. 164, p. 1553-1555, 2014.

BLOEM, E.; HANEKLAUS, S.; SCHNUG, E. Milestones in plant sulfur research on sulfur-induced-resistance (SIR) in Europe. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, article 779, 2015.

BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; MEDINA, C. de C.; SANTOS, J. C. F. dos; TORRES, E.; URQUIAGA, S. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em

plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1785-1792, 2008.

BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content. **Ciência Rural**, v. 47, art. e20160762, 2017.

BROWN, L. K.; GEORGE, T. S.; DUPUY, L. X.; WHITE, P. J. A conceptual model of root hair ideotypes for future agricultural environments: what combination of traits should be targeted to cope with limited P availability? **Annals of Botany**, v. 112, p. 317-330, 2013.

BUSSCHER, W. J.; FREDERICK, J. R.; BAUER, P. J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 999-1003, 2000.

CARMO, D. L.; LIMA, L. B.; SILVA, C. A. Soil fertility and electrical conductivity affected by organic waste rates and nutrient inputs. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0150152, 2016.

COMAS, L. H.; BECKER, S. R.; CRUZ, V. M. V.; BYRNE, P. F.; AND DIERIG, D. A. Root traits contributing to plant productivity under drought. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, article 442, 2013.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, p. 292-305, 2009.

CORREA, J.; POSTMA, J.; WATT, M.; WOJCIECHOWSKI, T. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, p. 6019-6034, 2019.

CQFS. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**, p. 376, 2016.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, v. 105, p. 1393-403, 2013.

DRIGO, B.; PIJL, A. S.; DUYTS, H.; KIELAK, A. M.; GAMPER, H. A.; HOUTEKAMER, M. J.; BOSCHKER, H. T. S.; BODELIER, P. L. E.; WHITELEY, A. S.; VEEN, J. A. V.; KOWALCHUK, G. A. Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO₂. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, p. 10938-10942, 2010.

DUNCAN, R. R.; BALIGAR, V. C. **Genetic and physiological basis of nutrient uptake and use efficiency: an overview**. In: Crops as enhancers of nutrient use. BALIGAR, V. C; DUNCAN, R. R. (eds.). Academic Press. San Diego. p. 3-38, 1991.

EISENACH, C.; ANGELI, A. D. Ion transport at the vacuole during stomatal movements. **Plant Physiology**, v. 174, p. 520-530, 2017.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1997.

EMBRAPA TRIGO. **Informações meteorológicas**. 2020. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/app/principal/agromet.php>>. Acesso em: 27 maio de 2020.

FAGERIA, N. K. Micronutrients influence on root growth of upland rice, common bean, corn, wheat, and soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 25, p. 613-622, 2002.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. **Advances in Agronomy**, v. 110, p. 251-331, 2011.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Physical, chemical, and biological changes in the rhizosphere and nutrient availability. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, p. 1327-1356, 2006.

FAGUNDES, E. A. A.; SILVA, T. J. A. da.; BONFIM-SILVA, E. M. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 188-193, 2014.

FAN, J.; McCONKEY, B.; WANG, H.; JANZEN, H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. **Field Crops Research**, v. 189, p. 68-74, 2016.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.E.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10p (Embrapa Soja. Circular Técnica, 48).

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977, 12 p. (Special Report, 80).

FENTA, B. A.; BEEBE, S. E.; KUNERT, K. J.; BURRIDGE, J. D.; BARLOW, K.; LYNCH, P. J.; FOYER, C. Field phenotyping of soybean roots for drought stress tolerance. **Agronomy**, v. 4, p. 418-435, 2014.

FERNANDES, M. S. **Nutrição Mineral de Plantas**. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006.

FERTILIDADE E BIOLOGIA DO SOLO. **Fertilidade e biologia do solo: integração e tecnologia para todos**. v. 2. ed. 1, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 2017, 616p.

FOYER, C. H.; LAM, H. M.; NGUYEN, H. T.; SIDDIQUE, K. H. M.; VARSHNEY, R.; COLMER, T. D.; COWLING, W.; BRAMLEY, H.; MORI, T. A.; HODGSON, J. M.; COOPER, J. W.; MILLER, A. J.; KUNERT, K.; VORSTER, J.; CULLIS, C.; OZGA, J. A.; WAHLQVIST, M. L.; LIANG, Y.; SHOU, H.; SHI, K.; YU, J.; FODOR, N.; KAISER, B. N.; WONG, F. L.; VALLIYODAN, B.; CONSIDINE, M. J. Neglecting legumes has compromised global food and nutritional security. **Nature Plants**, v. 2, article 16112, 2016.

GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Aggregates in a Rhodic Ferralsol under no-tillage and crop rotation. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1489-1498, 2010.

GENTILI, R.; AMBROSINI, R.; MONTAGNANI, C.; CARONNI, S.; CITTERIO, S. Effect of soil ph on the growth, reproductive investment and pollen allergenicity of *Ambrosia artemisiifolia* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 20, art. 1335, 2018.

GERARDEAUX, E.; SAUR, E.; CONSTANTIN, J.; PORTÉ, A.; JORDAN-MEILLE, L. Effect of carbon assimilation on dry weight production and partitioning during vegetative growth. **Plant and Soil**, v. 324, p. 329-343, 2009.

GMACH, M. R.; CHERUBIN, M. R.; KAISER, K.; CERRI, C. E. P. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. **Scientia Agricola**, v. 77, e20180164, 2020.

GONÇALVES; V. D.; ROCHA, F.; MAEDA, W. Y. Alterações provocadas pela calagem na eletroquímica de um Plintossolo. **Uniciências**, v. 19, p. 125-131, 2015.

GOUGOULIAS, C.; CLARK, J. M.; SHAW, L. J. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. **Journal of the science of food and agriculture**, v. 94, p. 2362-2371, 2014.

GRIFFITHS, M.; LARRY, Y. M. Targeting root ion uptake kinetics to increase plant productivity and nutrient use efficiency. **Plant Physiology**, v. 182, p. 1854-1868, 2020.

HARRIS, J. M. Abscisic Acid: Hidden architect of root system structure. **Plants**, v. 11, p. 548-72, 2015.

HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, F. I. F.; BERTAN, I.; SILVA, J. A. G.; SCHMIDT, D. A. M.; VALÉRIO, I. P.; MAIA, L. C.; FONSECA, D. A. R.; REIS, C. E. S. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 28, p. 219-228, 2007.

HIRASAWA, T.; NAKAHARA, M; IZUMI, T.; IWAMOTO, Y.; ISHIHARA, K. Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under drought conditions during grain filling. **Plant Production Science**, v. 1, p. 8-17, 1998.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using soygro, pnutgro, and beangro: a review. **Transactions of the ASAE**, v. 35, p. 2043-2055, 1992.

HOSSAIN, M. A.; ASHRAFUZZAMAN, M.; HOSSAIN, A. K. M. Z.; ISMAIL, M. R.; KOYAMA, H. Role of accumulated calcium in alleviating aluminum injury in wheat plants. **The Scientific World Journal**, Article 457187, 2014.

HUCK, M. G.; ISHIHARA, K.; PETERSON, C. M.; USHIJIMA, T. Soybean adaptation to water stress at selected stages of growth. **Plant Physiology**, v. 73, p. 422-427, 1983.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 48p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 35/ Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 13).

HUNTER, M. C.; SMITH, R. G.; SCHIPANSKI, M. E.; ATWOOD, L. W.; MORTENSEN, D. A. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. **Bioscience**, v. 67, p. 386-391, 2017.

IBAÑEZ, T. B.; SANTOS, L. F. M.; LAPAZ, A. M.; RIBEIRO, I. V.; RIBEIRO, F. V.; REIS, A. R.; MOREIRA, A.; HEINRICHS, R. Sulfur modulates yield and storage proteins in soybean grains. **Scientia Agricola**, v. 78, e20190020, 2020.

KANAI, S.; MOGHAIEB, R. E.; EL-SHEMY, H. A.; PANIGRAHI, R.; MOHAPATRA, P. K.; ITO, J.; NGUYEN, N. T.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Potassium deficiency affects water status and photosynthetic rate of the vegetative sink in green house tomato prior to its effects on source activity. **Plant Science**, v. 180, p. 368-374, 2011.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979, 264 p.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3.ed. Passo Fundo. UPF Editora, 2014, 263 p.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1550-1556, 2010.

KUNERT, K. J.; VORSTER, B. J.; FENTA, B. A.; KIBIDO, T.; DIONISIO, G.; FOYER, C. H. Drought Stress Responses in Soybean Roots and Nodules. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, article 1015, 2016.

KUZMA, M. M.; WINTER, H.; STORER, P.; ORESNIK, I.; ATKINS, C. A.; LAYZELL, D. B. The site of oxygen limitation in Soybean nodules. **Plant Physiology**, v.119, p. 399-407, 1999.

LEITÃO, N.; DANGEVILLE, P.; CARTER, R.; CHARPENTIER, M. Nuclear calcium signatures are associated with root development. **Natural Communications**, v. 10, article 4865, 2019.

LI, Q.; LIU, Y.; PAN, Z.; XIE, S.; PENG, S-A. Boron deficiency alters root growth and development and interacts with auxin metabolism by influencing the expression of auxin synthesis and transport genes. **Biotechnology and Biotechnological Equipment**, v. 30, p. 661-668, 2016.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005, 335 p.

LIU, F.; JENSEN, C. R.; SHAHANZARI, A; ANDERSEN, M. N.; JACOBSEN, S-E. ABA regulated stomata control and photosynthetic water use efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.) during progressive soil drying. **Plant Science**, v. 168, p. 831-836, 2005.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. GOEDERT, W. J.; MENDES, I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 461-472, 2013.

LWIN, C. S.; SEO, B-H.; KIM, H-U.; OWENS, G.; KIM, K-R. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality - a critical review. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 64, p. 156-167, 2018.

LYNCH, J. P.; WOJCIECHOWSKI, T. Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, p. 2199-2210, 2015.

MADALOSSO, M. G.; BALARDIN, R.; FAVERA, D. D.; MARQUES, L.; DEBORTOLI, M. P. Contra a fitotoxicidade. **Revista Cultivar**, n. 179, p. 14-17, 2014.

MANAVALAN, L. P.; GUTTIKONDA, S. K.; TRAN, L. S. P.; NGUYEN, H. T. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, p. 1260-1276, 2009.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, p. 349-354, 2011.

MASSENSINI, A. M.; BONDUKI, V. H. A.; MELO, C. A. D.; TÓTOLA, M. R.; FERREIRA, F. A.; COSTA, M. D. Soil microorganisms and their role in the interactions between weeds and crops. **Planta Daninha**, v. 32, p. 873-884, 2014.

MENDES, I. C.; REIS JÚNIOR, F. B. **Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica**. Embrapa Cerrados, Planaltina - DF, 26p. 2003. (Documentos, 85).

MUKHERJEE, D. **Nutrient and its management: Prospect and challenges under the changing environment scenario**. In: Advances in plant physiology. HERMANTARANJAN, A. editor, v. 15. Scientific Publishers, Jodhpur, p. 413-442, 2014.

MÜLLER, M.; RAKOCEVIC, M.; CAVERZAN, A.; CHAVARRIA, G. Grain yield differences of soybean cultivars due to solar radiation interception. **American Journal of Plant Sciences**, v. 8, p. 2795-2810, 2017.

NASCENTE, A. S.; LI, Y.; CRUSCIOL, C. A. C. Soil aggregation, organic carbon concentration, and soil bulk density as affected by cover crop species in a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 871-879, 2015.

NEISSE, A. C.; HONGYU, K. Aplicação de componentes principais e análise fatorial a dados criminais de 26 estados dos EUA. **Engineering and Science**, v. 5, p. 105-115, 2016.

OSAKABE, Y.; OSAKABE, K.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L. S. Response of plants to water stress. **Frontiers in plant science**, v. 5, article 86, 2014.

PAN, F.; LIANG, Y.; WANG, K.; ZHANG, W. Responses of fine root functional traits to soil nutrient limitations in a karst ecosystem of Southwest China. **Forests**, v. 9, article 743, 2018.

PASK, A. J. D.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; JAMIESON, P. D.; FOULKES, M. J. Quantifying how winter wheat crops accumulate and use nitrogen reserves during growth. **Field Crops Research**, v. 126, p. 104-118, 2012.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495-505, 2014.

PEDERSON, M. **Method of reducing phytotoxicity on plants susceptible to triazole fungicides**. World intellectual property organization publication number WO/2007/028388, 2007.

PEREIRA, J. C. **Interações entre as populações de actinomicetos e outros organismos na rizosfera**. Embrapa Agrobiologia, Seropédica. 2000, 15 p. (Embrapa- CNPAD. Documentos, 118).

PETIT, N. A.; FONTAINE, F.; VATSA, P.; CLÉMENT, C.; VAILLANT-GAVEAU, N. Fungicide impacts on photosynthesis in crop plants. **Photosynthesis Research**, v. 111, p. 315-326, 2012.

PIAS, O. H. C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; MAZURANA, M.; BAYER, C. Crop yield responses to sulfur fertilization in Brazilian no-till soils: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180078, 2019.

POLANIA, J.; POSCHENRIEDER, C.; RAO, I.; BEEBE, S. Root traits and their potential links to plant ideotypes to improve drought resistance in common bean. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 29, p. 143-154, 2017.

POSTMA, J. A.; SCHURR, U.; FIORANI, F. Dynamic root growth and architecture responses to limiting nutrient availability: linking physiological models and experimentation. **Biotechnology Advances**, v. 32, p. 53-65, 2014.

PRADO, H. do. **Pedologia fácil: aplicações na agricultura**. 2. Ed. Piracicaba: H. do Prado, 2008.

PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GHOSH, B. N.; SINGH R. D.; GUPTA, H. S. Annual carbon input to soil through rainfed soybean (*Glycine max*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping sequence in mid-hills of Northwest Himalaya. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 72, p. 14-17, 2002.

RAHMAN, M. A.; LEE, S. H.; JI, H. C.; KABIR, A. H.; JONES, C. S.; LEE, K.W. Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils:

current status and opportunities. **International journal of molecular sciences**, v. 19, article 3073, 2018.

RAO, I. M.; MILES, J. W.; BEEBE, S. E.; HORST W. J. Root adaptations to soils with low fertility and aluminum toxicity. **Annals of Botany**, v. 118, p. 593-605, 2016.

READ, D. J.; BARTLETT, E. M. The physiology of drought resistance in soybean plant (*Glycine max*) I. The relationship between drought resistance and growth. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, p. 487-489, 1972.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, p. 131-146, 2002.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, p. 252-263, 2009.

RICHARDS, R. A. Defining selection criteria to improve yield under drought-stress. **Plant Growth Regulation**, v. 20, p.157-166, 1996.

ROSE, T. J.; PARIASCA-TANAKA, J.; ROSE, M. T.; FUKUTA, Y.; WISSUWA, M. Genotypic variation in grain phosphorus concentration, and opportunities to improve P-use efficiency in rice. **Field Crops Research** v. 119, p. 154-160, 2010.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.11-21, 2008.

SILBERBUSH, M.; BARBER, S. A. Phosphorus and potassium uptake of field grown soybeans predicted by a simulation model. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 592-596, 1984.

SILVA, A. A.; DELATORRE, C. A. Root architecture modification in response to phosphorus and nitrogen availability. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 8, p. 152-163, 2009.

SILVA-OLAYA, A.; PELLEGRINO, C.; CERRI, C. Comparação de métodos de amostragem para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrária**, v. 34, p. 7-16, 2017.

SINGH, S. K.; REDDY, V. R. Methods of mesophyll conductance estimation: its impact on key biochemical parameters and photosynthetic limitations in phosphorus stressed soybean across CO₂. **Physiologia Plantarum**, v. 157, p. 234-254, 2016.

SOUZA, R. P.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; OLIVEIRA, R. F.; SILVEIRA, J. A. G. Photosynthetic responses of Young cashew plants to varying environmental conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 735-744, 2005.

STRECK, E. V.; KAMPF, N. DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Sul, 2008.

TANAKA, N.; KATO, M.; TOMIOKA, R.; KURATA, R.; FUKAO, Y.; AOYAMA, T.; MAESHIMA, M. Characteristics of a root hair-less line of *Arabidopsis thaliana* under physiological stresses. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, p. 1497-1512, 2014.

THU, N. B. A.; NGUYEN, Q. T.; HOANG, X. L. T.; THAO, N. P.; TRAN, L. S. P. Evaluation of drought tolerance of the Vietnamese soybean cultivars provides potential resources for soybean production and genetic engineering. **BioMed research international**, v. 2014, article 809736, 2014.

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**, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GALERANI, P. R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. EMBRAPA-CNPSo, 1993. 71 p.

VADEZ, V. Root hydraulics: the forgotten side of roots in drought adaptation. **Field Crops Research**, v. 165, p. 15-24, 2014.

VALADÃO, F. C. A.; WEBER, O. L. S.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; SCAPINELLI, A.; DEINA, F. R.; BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 39, p. 243-255, 2015.

VALENTINE, T. A.; HALLETT, P. D.; BINNIE, K.; YOUNG, M. W.; SQUIRE, G. R.; HAWES, C.; BENGOUGH, A. G. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, v. 110, p. 259-270, 2012.

VENANCIO, W. S.; RODRIGUES, M. A. T.; BEGLIOMINI, E.; SOUZA, N. L. Physiological effects of strobilurin fungicides on plants. **Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias**, v. 3, p. 59-68, 2003.

VIALET-CHABRAND, S. R. M.; MATTHEWS, J. S. A.; MCAUSLAND, L.; BLATT, M. R.; GRIFFITHS, H.; LAWSON, T. Temporal dynamics of stomatal behavior: modeling and implications for photosynthesis and water use. **Plant Physiology**, v. 174, p. 603-613, 2017.

VICINI, L.; SOUZA, A. M.; MORALES, F. E. C.; SOUZA, F. M. **Técnicas Multivariadas Exploratórias: Teorias e Aplicações no Software Statistica**. Editora UFSM, 2018, 240 p.

WANG, L.; KATZENSTEINER, K.; SCHUME, H.; VAN LOO, M.; GODBOLD, D. L. Potassium fertilization affects the distribution of fine roots but does not change ectomycorrhizal Community structure. **Annals of Forest Science**, v. 73, p. 691-702, 2016.

WERADUWAGE, S. M.; CHEN, J.; ANOZIE, F. C.; MORALES, A.; WEISE, S. E.; SHARKEY, T. D. The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, article 167, 2015.

WHITE, R. G.; KIRKEGAARD, J. A. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil - implications for water uptake. **Plant, Cell and Environment**, v. 33, p. 133-148, 2010.

YAMAGUCHI, J. Measurement of root diameter in field-grown crops under a microscope without washing. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 48, p. 625-629, 2002.

YANG, P. M.; HUANG, Q. C.; QIN, G. Y.; ZHAO, S. P.; ZHOU, J. G. Different drought-stress responses in photosynthesis and reactive oxygen metabolism between autotetraploid and diploid rice. **Photosynthetica**, v. 52, p. 193-202, 2014.

ZANATTA, J. F.; PROCÓPIO, S. O.; MANICA, R.; PAULETTO, E. A.; CARGNELUTTI FILHO, A.; VARGAS, L.; SGANZERLA, D. C.; ROSENTHAL, M.D'. A.; PINTO, J. J. O. Teores de água no solo e eficácia do herbicida fomesafen no controle de *Amaranthus hybridus*. **Planta Daninha**, v. 26, p. 143-155, 2008.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C.F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 128-37, 2015.

ZANDONADI, D. B.; SANTOS, M. P.; MEDICI, L. O.; SILVA, J. Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças. **Horticultura Brasileira**, v. 32, p. 14-20, 2014.

ZHAO, Y.; XIAO, X.; BI, D.; HU, F. Effects of sulfur fertilization on soybean root and leaf traits, and soil microbial activity. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, p. 473-483, 2008.

ZHOU, M.; LIU, C.; WANG, J.; MENG, Q.; YUAN, Y.; MA, X.; LIU, X.; ZHU, Y.; DING, G.; ZHANG, J.; ZENG, X.; DU, W. Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. **Scientific Reports**, v. 10, article 265, 2020.

ZILLI, J. É.; CAMPO, R. J.; HUNGRIA, M. Eficácia da inoculação de *Bradyrhizobium* em pré-semeadura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 4, p. 335-337, 2010.

ZUNTINI, B.; ALVAREZ, R. C. F.; THEODORO, G. F.; ZUFFO, A. M. Effect of adding fungicide to mixtures of triazoles and strobilurins in the control of downy mildew and Asian soybean rust. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, e53688, 2019.



PPGAgro

Programa de Pós-Graduação em Agronomia

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAMV