

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Daniel Boeno

**PRODUTIVIDADE DA SOJA E DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES EM
SOLOS COM VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS EM SAFRA COM ESTIAGEM**

Santa Maria, RS
2023

Daniel Boeno

**PRODUTIVIDADE DA SOJA E DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES EM SOLOS COM
VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS EM SAFRA COM
ESTIAGEM**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em CIÊNCIA DO SOLO**.

Orientador: Prof. Paulo Ivonir Gubiani

Coorientador: Prof. Rodrigo Pivoto Mulazzani

Santa Maria, RS
2023

Daniel Boeno

**PRODUTIVIDADE DA SOJA E DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES EM SOLOS COM
VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS EM SAFRA COM
ESTIAGEM**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em CIÊNCIA DO SOLO.**

Aprovado em 8 de setembro de 2023:

Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Rodrigo Pivoto Mulazzani, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Cleudson José Michelin, Dr. (IFFAR)

Ezequiel Koppe, Dr. (IFSC)

Fábio Joel Kochem Mallmann, Dr. (UFSM)

Marta Sandra Drescher, Dra. (UERGS)

Santa Maria, RS
2023

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, Helena Boscaini Boeno e Deolindo Boeno, que acreditaram, batalharam e nunca deixaram de sonhar que eu poderia chegar exatamente onde estou hoje

AGRADECIMENTOS

À vida por tantas coisas boas que tenho recebido nos últimos anos.

À minha família, em especial meu filho, Bento, por me proporcionar a sensação mais incrível que já senti na vida.

Aos meus orientadores, Paulo e Rodrigo, por tantos ensinamentos, conselhos e pela compreensão de minhas decisões, mesmo nos momentos em que não pude dedicar-me integralmente ao Doutorado.

Aos tão lembrados amigos que pude fazer em Santa Maria por tantos momentos de apoio, trabalho, descontração e conselhos. Lembro diariamente de muitos momentos vividos com essas pessoas e serei eternamente grato a elas por terem passado pela minha vida e deixado a sua marca.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), instituição que admiro e respeito cada vez mais a cada dia que passa. Foi muito gratificante poder estudar e, praticamente, viver nessa Universidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e ao Departamento de Solos, por me proporcionarem toda a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela oportunidade de cursar algumas disciplinas durante o período de pandemia. Lembro saudosamente da excelente recepção, troca de conhecimentos e dos frutos colhidos durante esse período.

À CAPES pela concessão da bolsa que me permitiu a dedicação a minha formação profissional.

RESUMO

PRODUTIVIDADE DA SOJA E DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES EM SOLOS COM VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS EM SAFRA COM ESTIAGEM

AUTOR: Daniel Boeno

Orientador: Paulo Ivonir Gubiani

Coorientador: Rodrigo Pivoto Mulazzani

A existência de camadas no solo com limitações de natureza física e/ou química no solo são comuns em lavouras do Rio Grande do Sul. Essas condições prejudicam o crescimento de raízes da cultura da soja em camadas mais profundas. A distribuição das raízes no perfil do solo exerce influência direta sobre a produtividade de grãos e é modulada pelos padrões de chuvas ao longo do ciclo da cultura. A concentração de raízes em camadas superficiais tem pouco impacto na produtividade em anos com chuvas bem distribuídas, mas pode causar perdas significativas em anos de chuvas irregulares, especialmente quando há escassez de chuva nos estádios reprodutivos. Contudo, a relação entre tolerância da soja ao déficit hídrico e perfil de distribuição de raízes ainda não é bem compreendida. Neste trabalho, diferentes perfis de distribuição de raízes da cultura da soja foram avaliados em dois estudos. No primeiro (artigo I), foi testada a eficácia da mobilização eventual do solo sob plantio direto e correção química em profundidade como estratégia para aumentar o aprofundamento de raízes e, assim, mitigar o impacto do déficit hídrico na produtividade da soja. Para isso, foram testados três tratamentos: aplicação de calcário, P e K em superfície: AQtup, escarificação seguida de AQtup = ESC_AQtup, escarificação seguida de AQtup e de aração = ESC_AQtup_ARA. A mobilização eventual do solo resultou em maior concentração de raízes na camada mobilizada. Nessa camada, houve redução da disponibilidade de água, em decorrência da menor capacidade de retenção do solo resultado da mobilização. Isso limitou a produtividade da soja pela menor oferta de água na camada na camada onde havia maior concentração de raízes. O uso de corretivos químicos melhorou as condições químicas em profundidade, mas não foi preponderante no aprofundamento radicular. No segundo estudo (artigo II), foi realizado um diagnóstico da distribuição de raízes da soja em diferentes solos do estado do Rio Grande do Sul. Foram coletadas amostras de solo e de raízes em diferentes profundidades de 10 locais do estado. Além disso, os dados de precipitação foram medidos nas lavouras de Barra do Ribeiro, Bossoroca, Cacequi, Marau e Tuparendi e, obtidos de estações meteorológicas mais próximas às lavouras de Cachoeira do Sul, Cruz Alta, Ibirubá e São Pedro do Sul devido à falta de medições nas respectivas áreas cultivadas. Os resultados deste estudo indicam que praticamente todas as lavouras possuem limitações, seja de natureza física ou química, e, em alguns casos, de ambas, que restringem o aprofundamento de raízes. Nos locais com chuvas bem distribuídas, as plantas conseguiram suprir sua demanda por água mesmo com as raízes concentradas nas camadas mais próximas à superfície do solo. Contudo, essa configuração limitou severamente a produtividade da soja quando houve escassez de chuvas. Percebe-se, portanto, que a melhoria das condições químicas no solo em profundidade é necessária na maioria dos solos do estado e pode melhorar o aprofundamento de raízes desde que as condições físicas não sejam limitantes. Em termo de manejo físico, a descompactação mecânica pode ser prejudicial ao aprofundamento de raízes e deve ser evitada.

Palavras-chave: Crescimento de raízes. Perfil de solo. Déficit hídrico. Intervenção mecânica.

AGRADECIMENTOS

ABSTRACT

SOYBEAN YIELD AND ROOT DISTRIBUTION IN SOILS WITH VARIABILITY OF PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES DURING A SEASON DROUGHT

AUTHOR: Daniel Boeno

ADVISOR: Paulo Ivonir Gubiani

CO-ADVISOR: Rodrigo Pivoto Mulazzani

The existence of soil layers with physical and/or chemical limitations at depth in the soil are common in Rio Grande do Sul's crops. These conditions hinder the root growth of soybean crops in deeper layers. The distribution of roots within the soil profile has a direct influence on soybean yield and is modulated by rainfall patterns throughout the crop cycle. Root concentration in surface layers has minimal impact on yield during well-distributed rainfall years, but can cause significant losses during irregular rainfall years, especially in reproductive stages with water scarcity. However, the relationship between soybean's drought tolerance and root distribution profile is not yet well understood. In this study, different soybean root distribution profiles were evaluated in two studies. In the first study (Article I), the effectiveness of occasional soil mobilization under no-tillage system and deep chemical correction was tested as a strategy to increase root depth and mitigate the impact of water deficit on soybean yield. Three treatments were evaluated: surface application of limestone, P, and K = QAsup, chiseling followed by QAsup = CH_QAsup, chiseling followed by QAsup and plowing = CH_QAsup_PLO. Occasional soil mobilization resulted in a higher concentration of roots in the mobilized layer. In this layer, there was a reduction in water availability due to the lower soil retention capacity resulting from mobilization. This limited soybean productivity due to lower supply in the layer with a higher concentration of roots. The use of chemical correctives improved chemical conditions in depth but did not prevail in root deepening. In the second study (Article II), a diagnosis of soybean root distribution was conducted in different soils in the state of Rio Grande do Sul. Soil and root samples were collected at various depths from 10 locations in the state. Additionally, precipitation data were measured in the Barra do Ribeiro, Bossoroca, Cacequi, Marau, and Tuparendi fields and obtained from meteorological stations closest to the fields in Cachoeira do Sul, Cruz Alta, Ibirubá, Pinhal Grande and São Pedro do Sul due to the lack of measurements in the respective cultivated areas. The results of this study indicate that almost all fields have limitations, either of a physical or chemical nature, and in some cases, both, which restrict root deepening. In locations with well-distributed rainfall, plants managed to meet their water demand even with roots concentrated in the layers close to the soil surface. However, this configuration severely limited soybean yield during periods of low rainfall. It is evident, therefore, that improving chemical conditions in the deep soil is necessary in most state soils and can enhance root deepening as long as physical conditions are not limiting. In terms of physical management, mechanical soil compaction can be detrimental to root deepening and should be avoided.

Keywords: Root growth. Soil profile. Water deficit. Mechanical intervention.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 ARTIGO I - Crescimento de raízes e produtividade de soja e milho em Neossolo submetido à descompactação e correção química	13
INTRODUÇÃO	14
MATERIAIS E MÉTODOS	15
Descrição do experimento	15
Avaliação do desempenho da cultura da soja e do milho	19
Avaliação da condição física e química do solo	20
Análises estatísticas	22
RESULTADOS	22
Efeito da mobilização na infiltração de água no solo e resistência à penetração	22
Fração de água disponível	24
Propriedades químicas do solo	27
Produtividade de grãos e crescimento de raízes	28
DISCUSSÃO	30
CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS	34
Artigo II - Evaluation of soybean root distribution in southern Brazil	38
1. Introduction	39
2. Material and methods	41
2.1 Description of soybean fields and sampling procedures	41
2.2 Root distribution measurements	44
2.3 Soil physical variables	45
2.4 Soil chemical variables	46
2.5 Soybean yield	47
2.6 Evaluation of soil-root relationship	47
3. Results	48
3.1 Root distribution	48
3.2 Field clustering using root distribution	49
3.3 Soil physical variables within each root distribution cluster	51
3.4 Soil chemical variables within each root distribution cluster	52
3.5 Soybean yield within each cluster of root distribution	54
4. Discussion	54
4.1 Root distribution of soybean in fields of RS	54
4.2 Management-related factors that affect root distribution	55
4.3 Soil-related factors that affect root distribution	57
4.4 Root distribution and soybean yield	60
5. Conclusion	61
6. References	68
4. CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural essencial para a produção de alimentos. No âmbito da agricultura, de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture* – USDA), um solo de qualidade é aquele capaz de desempenhar e preservar suas funções agrícolas para uso futuro (USDA, 2016). Já para a Sociedade Americana de Ciência do Solo (*Soil Science Society of America* – SSSA) (KARLEN et al., 1997), a qualidade do solo é definida em função e equilíbrio dos três componentes principais: preservação da atividade biológica, da qualidade do ambiente e da saúde dos animais e plantas. Para assegurar que a resposta de plantas – em termos de produtividade de grãos – seja adequada, a preservação das características físicas, químicas e biológicas do solo é fundamental (BERTOLLO et al., 2019).

A avaliação da qualidade do solo pode indicar o grau de degradação do mesmo e isso está associado ao uso inadequado dos recursos naturais. As principais causas para a degradação de solos agrícolas são o monocultivo, queimadas, práticas de manejo que pioram a estrutura do solo (aração e gradagem, por exemplo) e o excesso de carga sobre o solo, seja pelo tráfego de máquinas ou ingresso de animais em pastagens. A adoção de sistemas conservacionistas, como o sistema de plantio direto (SPD) reduz a probabilidade de degradação do solo.

Os benefícios do SPD se justificam pela melhoria da agregação (LIU et al., 2021), porosidade do solo (MONDAL et al., 2022), manutenção de resíduos em superfície (FURLANI et al., 2008; BIZARI et al., 2019), redução do escoamento superficial e das perdas de solo e aumento da concentração de carbono na camada de 0 - 10 cm (BLANCO-CANQUI & RUIS, 2018). No entanto, uma incorreta implantação do SPD pode acarretar em limitações químicas (BORTOLUZZI et al., 2014; BELLINASSO et al., 2021) e físicas do solo (FERREIRA et al., 2021; SUZUKI et al., 2022; WANG et al., 2022) em profundidade. Grande parte das lavouras brasileiras sofre com problemas dessas naturezas. São lavouras com solos ácidos, alto conteúdo de alumínio (CAIRES et al., 2008) e compactados (BEUTLER & CENTURION, 2004).

A análise dos indicadores de qualidade do solo permite diagnosticar a necessidade e avaliar o impacto de intervenções físicas e químicas do solo. No entanto, a avaliação apenas da relação entre indicadores de qualidade do solo com produtividade de plantas não permite gerar conclusões assertivas sobre essas intervenções. Isso porque existem estudos que apontam boa associação entre alguns indicadores do solo (por exemplo, de natureza física) com produtividade de plantas (GATHALA et al., 2011; SILVA et al., 2015; SILVA et al., 2017; SILVA et al., 2019), e outros que não observaram associação (GUBIANI et al., 2013a;

GUBIANI et al., 2013b; VAN LIER & GUBIANI, 2015; CECAGNO et al., 2016; KAZEMI et al., 2020). Em razão disso, os indicadores apenas expressam o efeito de alguma intervenção nas propriedades do solo e não consideram a dinâmica do crescimento de plantas e mudanças de condições meteorológicas que ocorrem em uma perspectiva mais ampla no sistema solo-planta-atmosfera.

O que se sabe é que as limitações de natureza física do solo, como a compactação (MORAES et al., 2019) e químicas, como o alto conteúdo de alumínio (RAO et al., 2016) afetam a produtividade de grãos por limitar o aprofundamento de raízes. Nessa situação, as plantas se tornam mais suscetíveis a perdas por déficit hídrico. Contudo, para que isso ocorra, é necessária uma redução na disponibilidade de água ocasionada por mudanças de condições meteorológicas (precipitação). Se a ocorrência de chuvas irregulares, com volumes abaixo da média, coincide com o período de maior demanda das plantas (estádios reprodutivos), maiores são as perdas de produtividade da cultura. Do contrário, em anos com chuvas bem distribuídas, as plantas podem produzir satisfatoriamente bem.

Limitações físicas e/ou químicas em profundidade são de ocorrência comum em solos cultivados com soja no Brasil (BORTOLUZZI et al., 2014; BOTTA et al., 2010). Há evidências de que em parte desses solos as raízes da soja estão concentradas em até 30 cm (BATTISTI et al., 2017a) e, na maioria delas, a profundidade máxima é limitada a 60 cm (PIVETTA et al., 2011). Em condições como essas, o impacto da estiagem na produtividade de grãos é potencializado (BATTISTI et al., 2017a; BATTISTI & SENTELHAS, 2017b). Portanto, o efeito das limitações do solo é percebido, principalmente, se a disposição do sistema radicular em profundidade for alterada por essas limitações e isso perdurar em anos de déficit hídrico. Por isso, avaliar como o perfil de distribuição de raízes afeta a produtividade de grãos em anos de chuvas irregulares permite conhecer os riscos de perdas de produtividade a partir dessa associação. Além disso, permite entender quais são as limitações de solo (físicas e/ou químicas) que mais afetam o perfil de distribuição de raízes. Para a cultura da soja, esse tipo de avaliação é de suma relevância.

A soja representa uma das principais culturas implantadas no Brasil, já que ocupa cerca de 44.062,6 milhões de hectares segundo estimativas na Conab (2023). No contexto do Brasil, seu cultivo é comum em solos compactados, resultado do tráfego intenso de maquinário agrícola, monocultivo e baixa cobertura de palha e, também, naquelas cujas limitações pode ser de natureza química, como é o caso do alto conteúdo de alumínio em profundidade. Além desses desafios, as áreas não irrigadas têm sofrido com déficit hídrico, o qual é responsável por uma redução média de 42% na produtividade da soja, particularmente nos Estados do Sul (SENTELHAS et al., 2015).

Um exemplo é o Estado do Rio Grande do Sul, que possui a terceira maior área cultivada com soja no Brasil (CONAB, 2023). Nesse estado, as variações irregulares na distribuição das

chuvas ao longo do ciclo de crescimento da cultura resultam em uma lacuna de produtividade devido ao déficit hídrico. Estimativas para a região de Cruz Alta indicam uma redução na produtividade que varia entre 2.050 e 2.600 kg por hectare devido a esse fator (SENTELHAS et al., 2015). Portanto, avaliar os impactos dos padrões de distribuição de raízes nas plantações de soja em lavouras do Rio Grande do Sul ganha relevância, por proporcionar subsídios valiosos para a tomada de decisões em relação à adoção de práticas de manejo mais adequadas. Essas práticas podem contribuir significativamente para mitigar a lacuna de produtividade gerada pelo déficit hídrico, além de favorecer a sustentabilidade e a eficiência da produção agrícola.

O principal propósito deste trabalho consistiu em avaliar os fatores de solo que mais impactam a distribuição de raízes da cultura da soja em profundidade e investigar o efeito de distintos padrões de distribuição de raízes na produtividade de grãos durante safras sujeitas a estiagens no estado do Rio Grande do Sul. Essa proposta foi abordada em dois estudos. No primeiro (artigo I), o objetivo foi testar se a mobilização eventual do solo sob plantio direto associada a correção química em profundidade aumenta o aprofundamento de raízes e reduz o impacto do déficit hídrico na produtividade de grãos. A hipótese deste estudo está incluída no objetivo. No segundo estudo (Artigo II), o objetivo foi realizar um diagnóstico e estabelecer a relação entre a distribuição das raízes da soja e a produtividade de grãos em lavouras no Rio Grande do Sul. O segundo estudo fundamenta-se na hipótese de que lavouras com raízes mais bem distribuídas em profundidade tendem a obter as melhores produtividades em anos de déficit hídrico.

Esta tese busca proporcionar uma compreensão abrangente dos desafios enfrentados para o cultivo da soja no estado do Rio Grande do Sul, com destaque para as complexas interações entre fatores físicos e químicos do solo, padrões de distribuição de raízes e as variabilidades climáticas, particularmente de precipitação. Com os dois estudos, pretende-se não apenas identificar os fatores do solo que mais influenciam o aprofundamento radicular da soja, mas também avaliar se há relação entre diferentes padrões de distribuição de raízes com a produtividade de grãos. Espera-se contribuir para o desenvolvimento de práticas de manejo mais eficientes com a tomada de decisões que promovam maior resiliência da cultura diante de cenários de déficit hídrico no contexto específico do Rio Grande do Sul.

Crescimento de raízes e produtividade de soja e milho em Neossolo submetido à descompactação e correção química

(Artigo submetido à Revista Brasileira de Ciência do Solo)

DESTAQUES

- A mobilização do solo (MS) aumentou a concentração de raízes da soja em camadas superficiais.
- O efeito físico da MS pode ser preponderante no crescimento de raízes em camadas mais próximas a superfície de solos rasos.
- A incorporação de corretivos químicos associada à mobilização do solo pode não melhorar o perfil de distribuição de raízes.

RESUMO

A distribuição das raízes no perfil do solo exerce influência direta na produtividade de grãos da soja e é modulada pela distribuição de chuvas ao longo do ciclo da cultura. A concentração de raízes em camadas superficiais tem pouco impacto na produtividade de grãos em anos com chuvas bem distribuídas, mas pode causar perdas significativas em anos de chuvas irregulares, especialmente quando há escassez de chuva nos estádios reprodutivos. Contudo, a relação entre tolerância de cultivos ao déficit hídrico e perfil de distribuição de raízes ainda não é bem compreendida. Por isso, o objetivo deste estudo foi investigar se a mobilização eventual, associada à correção química em profundidade, em um solo raso previamente manejado sob plantio direto, favorece o aprofundamento de raízes e a produtividade de grãos em anos de déficit hídrico. Para isso, foram testados três tratamentos definidos de modo a combinar intervenção química e física no solo: AQsup - aplicação de calcário, P e K em superfície; ESC_AQsup - escarificação seguida de AQsup; ESC_AQsup_ARA - escarificação seguida de AQsup e de aração nos cultivos subsequentes de soja e milho. Esse estudo demonstrou que a redução da resistência mecânica do solo ocasionada pela mobilização resultou em maior concentração de raízes em camadas mais próximas à superfície do solo. Além disso, mostrou que esse efeito da mobilização no aprofundamento de raízes foi preponderante ao efeito da incorporação de corretivos químicos. Na camada alterada pela mobilização, houve grande redução da fração de água disponível. Em decorrência disso, a produtividade de grãos tanto da cultura da soja quanto do milho foi fortemente limitada. Esse estudo mostra que a mobilização eventual de um solo raso com plantio direto pode potencializar o efeito do déficit hídrico na produtividade de grãos da cultura da soja e do milho.

Palavras-chave: Escarificação, aração, água disponível, crescimento radicular, solos rasos.

INTRODUÇÃO

A compactação do solo é considerada um processo inerente e inevitável nos sistemas agrícolas (Bergamin et al., 2010; Valadão et al., 2015; Bertollo e Levien, 2019), resultante, principalmente, do intenso tráfego de máquinas (Keller et al., 2019), do monocultivo (Bertollo e Levien, 2019), pisoteio animal (Nascimento et al., 2017), associados ao pequeno aporte de biomassa vegetal (Keller et al., 2019; Kumar et al., 2018). Os danos ocasionados pela compactação são de longa duração e, em casos mais severos, podem até mesmo ser permanentes (FAO, 2015).

Um maior estado de compactação não necessariamente é mais limitante à produtividade de plantas se não afetar a distribuição de raízes no perfil de solo ou se a distribuição das chuvas ao longo do ciclo de cultivo for capaz de compensar limitações ao acesso à água do solo pela planta decorrente do confinamento de raízes em camadas superficiais. Em anos com abundância de chuva, é pouco provável que haja uma diferença significativa na produtividade de grãos entre lavouras com raízes mais concentradas próximo à superfície e aquelas com raízes mais bem distribuídas ao longo do perfil do solo (Battisti e Sentelhas, 2017). Nesses casos, não há necessidade de recomendar a descompactação do solo. Portanto, o efeito da distribuição de raízes na produtividade de grãos é mais evidente em anos de déficit hídrico (Mulazzani et al., 2022). Por isso, para recomendar a descompactação do solo é preciso considerar as variáveis de solo afetadas pela compactação (como a disponibilidade de água), além de variáveis de planta (crescimento de raízes) e meteorológicas (precipitação).

A disponibilidade de água no solo junto com o oxigênio, temperatura e a resistência mecânica são os principais fatores que afetam diretamente o crescimento radicular, desde que os fatores químicos não sejam limitantes (Letey, 1985). Isso sugere que se as condições químicas são adequadas, as condições estruturais do solo serão ser o fator preponderante no desenvolvimento radicular. Em situações em que as condições químicas forem limitantes, uma correção em profundidade poderia criar um ambiente mais favorável para o crescimento de raízes e, conseqüentemente, melhorar a produtividade das culturas em anos de estiagem moderada.

Solos cultivados em plantio direto sem correção química adequada são comumente afetados pela alta saturação por alumínio (Al) e deficiência de fósforo (P) em camadas subsuperficiais e isso tem impactado o rendimento de grãos (Bellinaso et al., 2021). Por isso, alguns estudos têm mostrado que a incorporação de corretivos químicos em Argissolos (Bellinaso et al., 2021) e Latossolos (Bortoluzzi et al., 2014; Peixoto et al., 2019) sob plantio direto e com limitação química em profundidade pode aumentar a produtividade da soja em mais de 30%. Contudo, o revolvimento

do solo para a incorporação de corretivos químicos pode diminuir a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água na porção superficial do perfil, que contém a maior parte das raízes, intensificando estresse hídrico em anos com escassez de chuva (De Moraes et al., 2019).

Estudos que procuram evidenciar a relação entre compactação do solo e produtividade de plantas necessitam determinar os padrões de distribuição de raízes em profundidade e associar tais padrões com a precipitação do período. Em anos de déficit hídrico, mudanças nas variáveis físicas do solo e nos padrões de crescimento de raízes são melhor percebidas no rendimento de grãos da soja. Já em anos com chuvas melhor distribuídas, esse efeito pode não ser percebido (Mulazzani et al., 2022). Isso permite gerar recomendações de manejo de descompactação mais assertivas a respeito dessa relação, especialmente em culturas de grande interesse agrícola, como é o caso da soja. A soja ocupa a maior área de cultivo no Brasil (Conab, 2020) e o déficit hídrico pode ocasionar até 42 % de perda de produtividade, especialmente nos Estados do Sul (Sentelhas et al., 2015).

As alterações nas propriedades físicas do solo ocasionadas pela compactação do solo geralmente ocorrem até a camada de 0-0.20 m (Reichert et al., 2021) e podem ser o principal fator limitante ao aprofundamento radicular em solos profundos, como é o caso dos Argissolos (Silva et al., 2020) e dos Latossolos (Piccin et al., 2020). Limitações como essas podem alterar o perfil de distribuição de raízes em profundidade e conseqüentemente alterar a tolerância das culturas a períodos de déficit hídrico. Contudo, a limitação de produtividade em anos de escassez hídrica por efeito da distribuição de raízes pode ser mais intensa em solos pouco profundos, como os Neossolos. Por isso, investigar se a descompactação mecânica associada a correção química em profundidade em solos rasos favorece o aprofundamento de raízes e a produtividade de plantas em anos de déficit hídrico pode revelar recomendações de manejo mais assertivas relacionadas à descompactação em solos com essas características.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do experimento

Um experimento em condição de lavoura (on-farm) e para ser de longa duração foi instalado em uma área historicamente manejada em plantio direto (Quadro 1) no município de Ivorá, Sul do Brasil (29° 30' 20.1" S, 53° 37' 34.6" W e 477 m de altitude). O solo da área experimental é um Typic Udorthent and Humic Dystrudept (Soil Survey Staff, 2014) que corresponde à classe dos Neossolos de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013). A profundidade efetiva do perfil é de aproximadamente 0.40 m. O clima da região é Cfa (subtropical

úmido sem estação seca e com verão quente) conforme a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013).

Previamente à instalação do experimento, realizou-se um diagnóstico de condições químicas e físicas do solo durante a cultivo de soja da safra 2020/2021. O diagnóstico revelou grande concentração de raízes até 0.10 m de profundidade, baixo consumo da água armazenada abaixo de 0.30 m e elevada resistência do solo à penetração. Em vários pontos dentro da área experimental, a RP entre 0.10 a 0.20 m no perfil de solo superava o valor crítico de 2 MPa (Blainski et al., 2008; Da Silva et al., 2015; Navarro et al., 2019) logo aos 0.10 m de profundidade. O diagnóstico de condições químicas (Tabela 1) mostrou a necessidade de correção química nas camadas de 10 – 20 e de 0.20 – 0.35 m no solo, de acordo com as recomendações técnicas (CQFS – RS/SC, 2016).

Diante do diagnóstico da presença em potencial de limitações químicas e físicas ao crescimento de raízes, três tratamentos foram definidos de modo a combinar intervenção química e física no solo: AQsup - aplicação de calcário, P e K em superfície; ESC_AQsup - escarificação seguida de AQsup; ESC_AQsup_ARA - escarificação seguida de AQsup e de aração. O tratamento AQsup representa o modo mais usual que os agricultores usam para aplicar corretivos no solo quando querem evitar o revolvimento do solo sob plantio direto; o tratamento ESC_AQsup representa o modo mais usual de os agricultores combinar ações visando a correção química e física do solo com perturbação moderada do solo sob plantio direto; e o tratamento ESC_AQsup_ARA representa um modo mais drástico de combinar ações visando a correção química e física do solo, com perturbação intensa do solo sob plantio direto. Outras ou todas as possíveis combinações não foram aplicadas porque tornaria o experimento complexo demais para ser conduzido em ambiente de lavoura. Pelo mesmo motivo, os tratamentos foram dispostos em faixas para facilitar as operações de semeadura, pulverizações e colheita. Cada tratamento foi repetido em três faixas, cada uma com 3x48 metros (144 m²), o que totalizou 1296 m² de área total cultivada.

Tabela 1 - Análise química do solo da área experimental em Ivorá, RS, antes da implantação do experimento com soja, no ano agrícola 2021/2022.

Prof. (m)	Argila (%)	CTC (pH 7)	Índice SMP	pH	Saturação (%)		P (mg/L)	K (mg/L)
					Al	Bases		
0-0.10	19,0	12,8	6,4	5,8	0	77	14,9	169
0.10-0.20	29,0	14,5	5,4	4,7	27	35	2,7	80
0.20-0.35	33,7	14,6	5,3	4,7	25	35	2,7	69

As principais operações e práticas de manejo estão descritas no (Quadro 1). A escarificação foi realizada em 14 de abril de 2021, com um escarificador com hastes espaçadas a 0.50 m e atuando até 0.30 a 0.40 m de profundidade conforme a variação da profundidade do perfil de solo permitia. O calcário dolomítico (6000 kg ha⁻¹, PRNT de 80%), o fosfato monoamônico - MAP (147 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e o cloreto de potássio (40 kg ha⁻¹ de K₂O) foram aplicados em superfície em toda a área experimental no dia 10 de maio de 2021. As doses de P₂O₅ e K₂O foram calculadas para elevar os teores de P e K até o nível crítico (CQFS – RS/SC, 2016). No mesmo dia, a aração foi realizada com um arado de discos, incorporando o calcário e os fertilizantes a uma profundidade de até 0.25 m. Imediatamente após a aração, a semeadura da aveia branca foi realizada em todo o experimento, seguida de leve incorporação promovida pelo arraste sobre o solo de uma esteira metálica.

Quadro 1 - Detalhamento da sequência de análises e/ou manejos realizados na área experimental desde o cultivo de inverno de 2020 até a colheita do cultivo de verão da safra 2022/2023.

Data	Análises/manejos	Informações complementares
-	Cultivo de trigo, safra de 2020.	Cultivo anterior à instalação do experimento
-	Cultivo de soja, safra de 2020/2021.	Cultivo anterior à instalação do experimento
14/04/2021	Demarcação das parcelas, coleta de solo para análise química e escarificação.	Início do experimento. Palhada de soja em início de decomposição
10/05/2021	Aplicação de calcário, P e K em área total, aração em três faixas e semeadura da aveia em todo o experimento.	Palhada de soja em plena decomposição
16/06/2021	Instalação dos sensores de umidade, temperatura, potencial matricial em uma faixa de cada tratamento. Instalação de um pluviômetro. Coleta de amostras de solo para caracterização da condição do solo após as intervenções mecânicas e para descrição morfológica.	Aveia em torno de 0.10 m de altura
22/06/2021	Medição da infiltração de água no solo pelo método do duplo anel concêntrico.	Aveia em torno de 0.15 m de altura
04/07/2021	Medição da resistência à penetração (RP) para caracterizar o efeito da escarificação e aração.	Aveia em torno de 0.20 m de altura

20/08/2021	Aplicação de fungicida.	Plantas de aveia com panículas
11/09/2021	Coleta de solo para determinação do carbono orgânico do solo, densidade do solo e crescimento de raízes da aveia.	Plantas de aveia em fase de grão leitoso
22/10/2021	Determinação de massa seca das plantas de aveia.	Média de 4,1; 4,3 e 5,3 toneladas por hectare de massa seca no ESC_AQsup_ARA, ESC_AQsup AQsup, respectivamente
02/11/2021	Semeadura da soja (cultivar Zeus) com semeadora de discos sulcadores.	Sem problemas de semeadura detectados
20/11/2021	Segunda medição de infiltração de água no solo pelo método do duplo anel concêntrico.	Logo após semeadura da soja (estádio VC)
29/01/2022	Coleta de amostras de solo para análises físicas e crescimento de raízes da soja.	Soja em estágio R5
06/04/2022	Determinação da produtividade da soja.	Soja em estágio R8-R9. Foi colhida uma área de 16 m ² em cada faixa
24/04/2022	Semeadura das plantas de cobertura (mix de aveia preta, ervilhaca, nabo e centeio).	A lanço
07/07/2022	Retirada dos sensores	Falha de funcionamento
25/09/2022	Determinação de massa seca do mix de cobertura	Média de 10,4; 9,3 e 9,1 toneladas por hectare de massa seca no ESC_AQsup_ARA, ESC_AQsup AQsup, respectivamente
18/11/2022	Semeadura do milho Pioneer P3565PWU com semeadora de discos sulcadores.	Quantidade exuberante de palha dificultou a semeadura
28/12/2022	1ª aplicação de ureia no milho (100 kg ha ⁻¹)	Milho em estágio V6
21/01/2023	2ª aplicação de ureia no milho (100 kg ha ⁻¹)	Milho em estágio Vt
17/05/2023	Colheita do milho	Foi colhida uma área de aproximadamente 16 m ² em cada faixa

O foco deste estudo concentra-se nos cultivos da soja e milho. Por isso, informações gerais sobre as plantas de cobertura foram descritas apenas no Quadro 1.

A cultura da soja (*Glycine max*) foi o primeiro cultivo de verão implantado na área experimental durante o ano safra 2021/2022. A semeadura ocorreu em 2 de novembro de 2021, com a utilização de uma semeadora adubadora com discos de corte e sulcadores, regulada para distribuir 222 mil sementes por hectare, em linhas espaçadas 0,45 m. Na operação de semeadura foi aplicado 250 kg da formulação 2-23-23 ha⁻¹ na linha de semeadura, o que corresponde aproximadamente à recomendação técnica para uma expectativa de produtividade de 4200 kg ha⁻¹ (CQFS – RS/SC, 2016). O milho foi cultivado na safra de verão subsequente (2022/2023), seguindo o plano de rotação estabelecido pelo produtor da área onde o experimento foi instalado. A semeadura também

foi realizada com uma semeadora adubadora com discos de corte e sulcadores, no dia 18 de novembro de 2022. A semeadora foi regulada para distribuir 60 mil sementes por hectare, em linhas espaçadas 0,9 m. Na operação de semeadura foi aplicado 400 kg ha⁻¹ da formulação 09-25-15 na linha de semeadura, o que corresponde aproximadamente à recomendação técnica para uma expectativa de produtividade de 6000 kg ha⁻¹ (CQFS – RS/SC, 2016). Além, da semeadura da soja e do milho, todos os tratos culturais para controle de plantas daninhas, pragas e doenças foram realizados pelo produtor e proprietário da área.

Avaliação do desempenho da cultura da soja e do milho

Análises detalhadas do solo foram efetuadas apenas no cultivo da soja, visto que as maiores diferenças nas propriedades químicas e físicas do solo em função dos tratamentos seriam detectadas no primeiro cultivo. No cultivo do milho, apenas a produtividade de grãos de milho foi avaliada, visto que ela é a variável resposta principal a ser monitorada ao longo dos anos de condução do experimento. Para a soja, avaliou-se a produtividade de grãos e a distribuição de raízes no solo.

Para avaliar a distribuição de raízes de soja no solo, uma amostragem de solo foi realizada quando as plantas estavam no estágio R5 (aproximadamente 85 dias após a semeadura). Para isso, blocos de solo com dimensões 0.074x0.45x0.10 m (largura, comprimento e profundidade, respectivamente) foram coletados no dia 29 de janeiro de 2022 (Quadro 1). A largura e o comprimento dos blocos foram orientados na direção e transversal à linha de semeadura, respectivamente, ficando a planta avaliada na posição central do bloco. Os blocos foram coletados nas camadas de 0-0.01, 0.10-0.20, 0.20-0.30 e 0.30-0.40 m. No laboratório, as raízes foram separadas do solo por lavagem com água em uma peneira de malha de 1 mm, conforme metodologia proposta por Böhm (1979).

Posteriormente, as raízes foram cortadas em frações de 0.01 m de comprimento, suspensas em lâmina de 0.05 m de água em uma bandeja acrílica transparente de 0.30 × 0.40 m e escaneadas em um scanner (EPSON Expression 11000 equipado com luz adicional TPU) na resolução de 600 dpi. Após o escaneamento, as raízes foram secas entre toalhas de papel, colocadas para secar durante 72h a 65 °C e pesadas para a obtenção da massa seca.

Com as imagens digitalizadas, as variáveis comprimento total de raízes (CTR, m), área superficial (AS, m²), diâmetro médio (DM, m), volume (V, m³) e comprimento por volume (CV, m⁻³) foram determinadas com o software WinRHIZO© Pro 2007 (Regent Instruments, Quebec, Canadá). A densidade de comprimento de raízes (DCR, cm cm⁻³) foi calculada com a Eq. 1:

$$DCR_i = \frac{CR_i}{c_i l_i h_i} \quad (1)$$

Em que DCR_i é a densidade de comprimento de raiz no bloco de solo i (cm cm^{-3}), CR_i é o comprimento acumulado de raiz em i (m), c_i , l_i e h_i são o comprimento, largura e altura do bloco de solo i (m).

A colheita da soja ocorreu aos 156 dias após a semeadura (6 de abril de 2022). Foram colhidas as plantas em quatro pontos com área de 4 m² dentro de cada faixa. Devido ao maior espaçamento entre linhas da cultura do milho, apenas as duas linhas centrais de cada faixa foram colhidas (3 metros de comprimento) em dois pontos de cada parcela. A colheita do milho ocorreu em 15 de maio de 2023. Em ambas as culturas, os grãos foram acondicionados em sacos de papel, submetidos à secagem e correção de umidade para 13%. A produtividade foi expressa em kg ha⁻¹.

Avaliação da condição física e química do solo

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas com anéis metálicos (aproximadamente 0.0001 m³) no centro das camadas de 0-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30 e 0.30-0.40 m aos 89 dias após a semeadura da soja (29 de janeiro de 2022) (Quadro 1). Essa amostragem foi realizada concomitantemente à amostragem de solo para análise de raízes da soja (descrita anteriormente). No laboratório, as amostras foram saturadas e submetidas às tensões de 6 e 10 kPa. A umidade na capacidade de campo foi definida com o valor obtido na tensão de 10 kPa em coluna de areia (Reinert e Reichert, 2006). A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SAT} , mm h⁻¹) foi determinada com um permeâmetro de carga constante (Donagema et al., 2011). A porosidade total (PT, m³ m⁻³), a macroporosidade (MA, m³ m⁻³), a microporosidade (MI, m³ m⁻³) e a densidade do solo (D_s , g cm⁻³) foram determinadas nas mesmas amostras. A PT foi considerada igual à umidade de saturação, a MI igual ao conteúdo de água na tensão de 6 kPa e a MA foi calculada pela diferença entre a PT e a MI. A densidade do solo (ρ g cm⁻³) foi calculada pela razão entre massa de solo seco (105°C por 48h) e volume do cilindro (Donagema et al., 2011).

Na mesma amostragem para as análises física e nas mesmas camadas, amostras deformadas foram coletadas para determinação da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} , m³ m⁻³), textura do solo e propriedades químicas. O θ_{PMP} determinado na tensão de 1.500 kPa com o uso de um potenciômetro de ponto de orvalho (modelo WP4-T, Decagon Devices, Inc., Pullman/WA, EUA), conforme procedimento descrito em Pereira et al. (2023). O restante das amostras deformadas foi cuidadosamente destorroado manualmente e passado em peneira de 20 mm para determinação dos calhaus e 2 mm para determinação do cascalho (Embrapa, 2011). Todo o material que passou pela peneira de 2 mm foi utilizado para a determinação da textura (fração fina do solo –

areia, silte e argila) pelo método da pipeta (Suzuki et al, 2015). Essas frações granulométricas foram imersas em solução de NaOH (1%) para dispersão de partículas minerais e orgânicas. A fração de terra fina também foi utilizada para determinação de propriedades químicas: o pH (água) foi determinado pela metodologia proposta por Raij et al. (2001); os teores de P (mg dm^{-3}) e K^+ (mg dm^{-3}) foram determinados pelo método de Mehlich (1965); MO (%) pelo método de Walkley-Black (Tedesco et al., 1995); Al^{3+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) pelo método com extrator KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ (Tedesco et al., 1995); acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$, $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), CTC pH 7 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), saturação de bases (%) e saturação por Al (%) calculados conforme CQFS-RS/SC (2016).

A umidade volumétrica do solo foi monitorada diariamente durante o cultivo da soja (safra 2021/2022) com a utilização de sensores de capacitância com calibração fornecida pelo fabricante (ECH20 10HS Large Volume Soil Moisture Sensors by Meter, Inc.). Os sensores foram instalados nas profundidades de 0,05, 0,20, 0,35 e 0,55 m. Os dados de umidade foram utilizados para o cálculo da fração de água disponível (FAD, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) que representa a razão $(\theta - \theta_{PMP}) / (\theta_{CC} - \theta_{PMP})$, em que θ é o conteúdo de água atual e θ_{CC} é o conteúdo de água na capacidade de campo, considerado igual ao conteúdo de água retido na tensão de 10 kPa (determinação descrita anteriormente). A precipitação foi monitorada com o pluviômetro SL 2021 P (Solar instrumentação, LTDA) tanto no cultivo da soja (2021/2022) quanto no cultivo do milho (2022/2023).

A resistência à penetração (RP) foi medida durante o cultivo da aveia anterior ao cultivo da soja (Quadro 1), aos 54 dias após a instalação do experimento. Um penetrômetro portátil com haste metálica e ponta cônica (ângulo de 60°) foi utilizado para medir a RP a uma velocidade de penetração de 2 m min^{-1} , com armazenamento de dados a cada 0,015 m de profundidade. Foram realizadas 9 medições por faixa, com profundidades variáveis de acordo com a profundidade do perfil de solo (entre 0,3 a 0,7 m).

Os testes de infiltração foram realizados com o duplo anel concêntrico - diâmetros interno e externo dos anéis de 0,20 m e 0,40 m, respectivamente. As 9 medições (uma para cada faixa) também foram realizadas durante o cultivo da aveia anterior ao cultivo da soja, nos dias 22 de junho e 20 de novembro de 2021 (Quadro 1). Os testes foram realizados de dois a quatro dias após a ocorrência de chuvas, supostamente quando o solo está em capacidade de campo. Inicialmente, os dois anéis foram inseridos na superfície do solo a uma profundidade de 0,10 m e a taxa de infiltração foi medida com uma lâmina de água constante de 0,05 m, conforme metodologia descrita por Reynolds (2002). A quantidade de água infiltrada foi registrada em intervalos de 5 minutos no início dos testes e, na medida em que o fluxo de infiltração diminuía, foram registrados em intervalos de tempo maiores.

Análises estatísticas

A estatística não-paramétrica de Kruskal-Wallis foi usada para avaliar o efeito dos tratamentos. A escolha deste teste se deve ao fato de que a maioria das variáveis de solo e planta não atenderam aos pressupostos de normalidade de dados e homogeneidade de variâncias, condições requeridas pela ANOVA. Somado a isso, por ser um experimento on-farm visando não dificultar as operações de campo realizadas pelo proprietário da área, os tratamentos não foram aleatorizados e o total de 9 faixas é um número baixo de repetições para uso de estatísticas mais rigorosas como a ANOVA. O valor de p do teste de Kruskal-Wallis foi utilizado para analisar a probabilidade de as diferenças nas médias das variáveis observadas nos diferentes tratamentos serem oriundas de efeitos aleatórios ou dos tratamentos. Tanto a estatística quanto a elaboração de gráficos foram realizadas com o software R (Rcore Team, 2020).

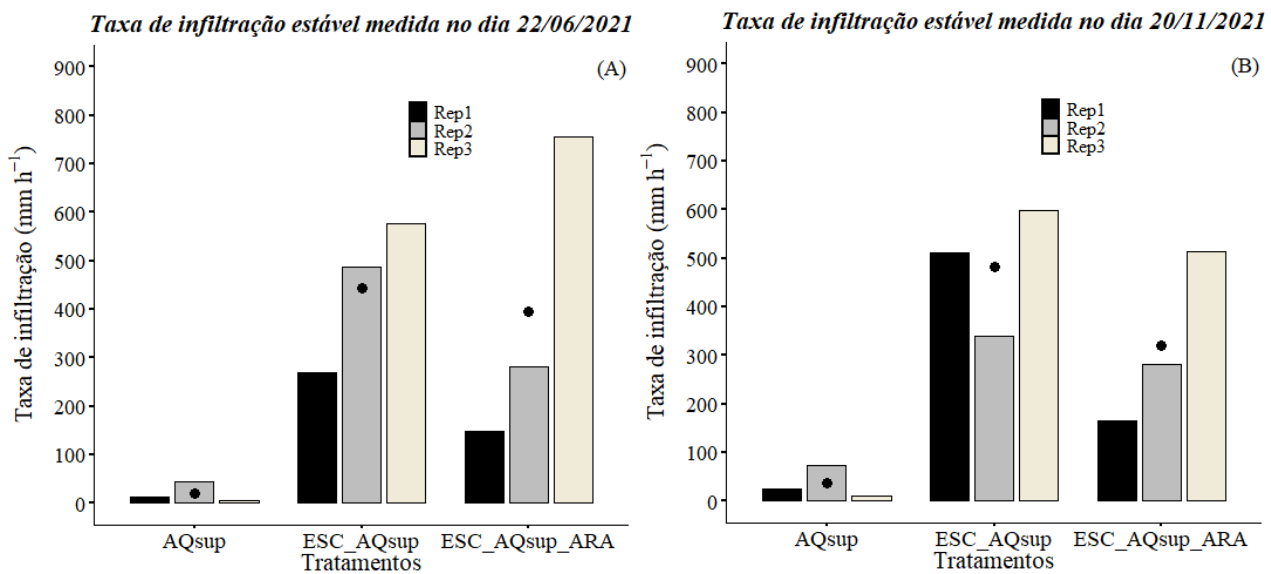
RESULTADOS

Efeito da mobilização na infiltração de água no solo e resistência à penetração

Houve aumento da taxa de infiltração estável água no solo (TIE) nos tratamentos ESC_AQsup e ESC_AQsup_ARA, comparados ao AQsup, o qual a infiltração de água foi severamente limitada (Figura 1a e 1b, respectivamente).

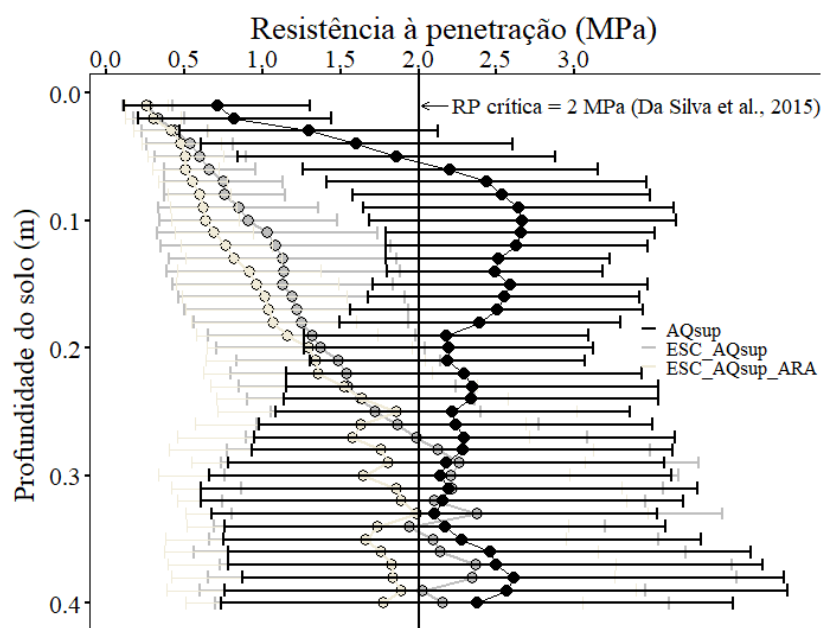
Na primeira avaliação, os tratamentos com intervenção mecânica aumentaram TIE em aproximadamente 25 vezes. Na segunda avaliação, esse efeito continuou presente, porém, em menor magnitude (15 vezes).

Figura 1. Taxa de infiltração estável (TIE) em um Neossolo sob plantio direto com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA).



A intervenção mecânica resultou em uma redução significativa da resistência à penetração (RP) na camada de 0 – 0.15 m aproximadamente no ESC_AQsup e ESC_AQsup_ARA (Figura 2). Os valores de RP no AQsup mostram a presença de uma camada mais restritiva fisicamente de 0.05 – 0.15 m de profundidade.

Figura 2. Resistência à penetração em um Neossolo sob plantio direto com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA).

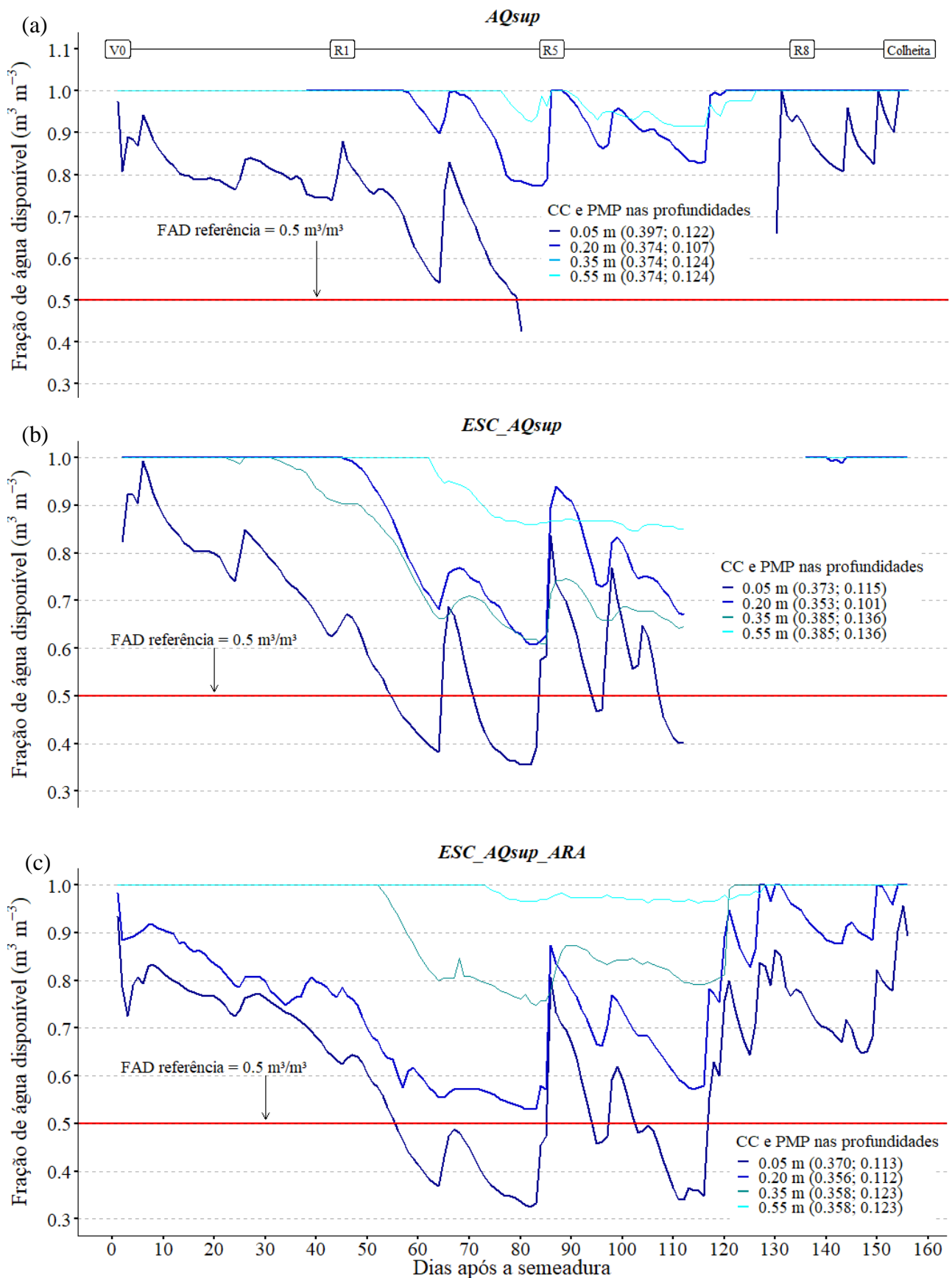


Fração de água disponível

A FAD foi consideravelmente afetada pelos manejos adotados (Figura 3). Havia mais água disponível no tratamento AQsup (Figura 3c) em comparação aos tratamentos ESC_AQsup (Figura 3a) e ESC_AQsup_ARA (Figura 3b) em todas as profundidades monitoradas (0.05, 0.20, 0.35 e 0.55 m). Somente após 80 dias desde a semeadura, a camada de 0-0.10 m do solo alcançou o valor de FAD estabelecido como referência ($0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), comumente adotada em cultivos irrigados para garantir a reposição adequada de água por meio da irrigação, sem que as plantas enfrentem déficits hídricos (FAO, 2006). Em contrapartida, os tratamentos ESC_AQsup e ESC_AQsup_ARA apresentaram disponibilidade de água inferior, ultrapassando com maior frequência e duração o limite de referência ao longo do ciclo de crescimento da soja.

Nestes dois tratamentos, a FAD na camada 0-0.10 m foi inferior a $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ partir dos 55 dias após a semeadura. Além da camada de 0-0.10 m, as FADs das camadas 0.10-0.20 m e 0.20-0.30 m também ficou próxima do valor de referência nesse período.

Figura 3. Fração de água disponível (FAD) durante o ciclo da soja na safra de 2021/2022 em um Neossolo com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA).



Ambas as safras (2021/2022 e 2022/2023) foram caracterizadas pela ocorrência de déficit hídrico. Na primeira, a precipitação acumulada ao longo do ciclo da soja foi de pouco mais de 600 mm (Figura 4). Na segunda, o acumulado foi próximo a 800 mm (Figura 5). Em ambos os casos as chuvas foram mal distribuídas ao longo do ciclo de cultivo e com os maiores volumes acumulados no período próximo à colheita.

Figura 4. Precipitação diária (colunas) e precipitação acumulada (linha) durante o ciclo da soja na safra 2021/2022 em um Neossolo com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA).

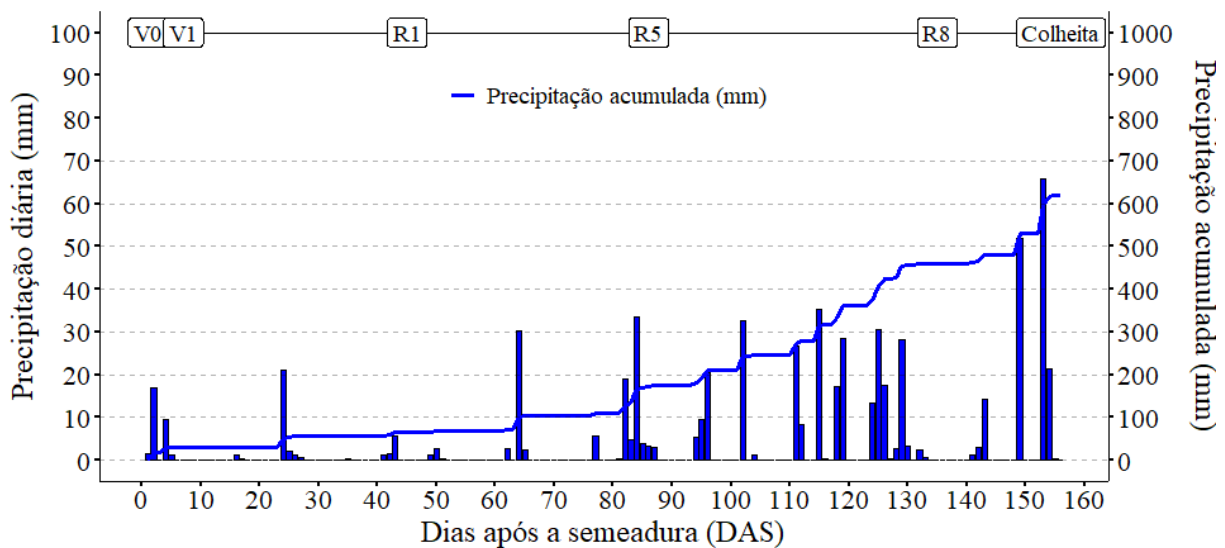
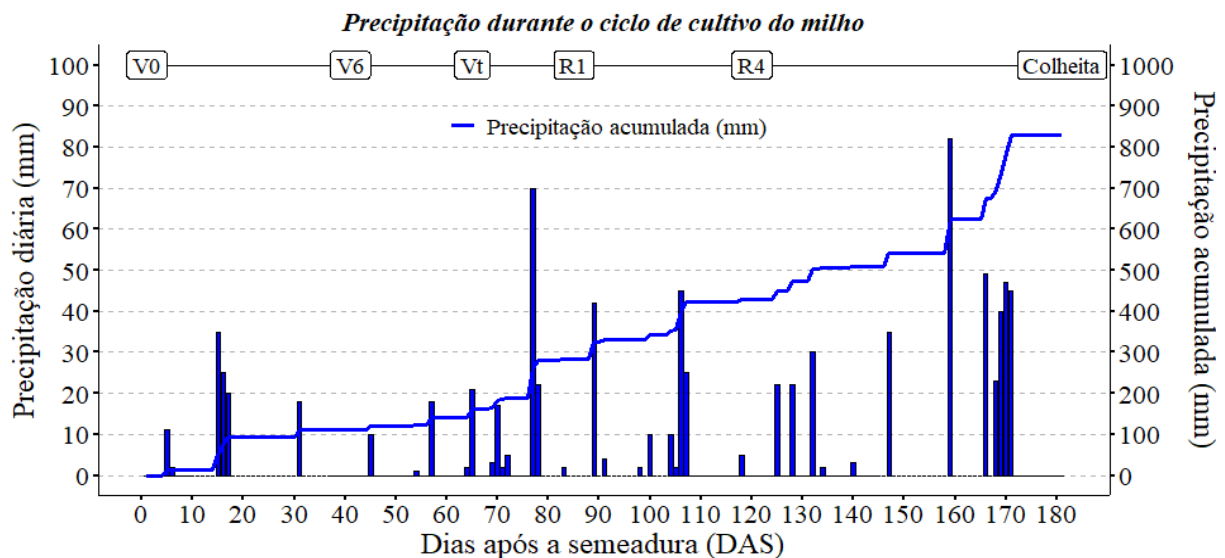


Figura 5. Precipitação diária (colunas) e precipitação acumulada (linha) durante o ciclo do milho na safra 2022/2023 em um Neossolo com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA).



Propriedades químicas do solo

A melhoria das propriedades químicas pela incorporação dos fertilizantes - calcário, P e K - foi detectada até a profundidade de 0.40 m, sendo que no tratamento ESC_AQsup_ARA houve aumento dos teores de Ca, Mg, Saturação por Bases e uma redução da Saturação por Alumínio (Figura 6 e 7). Na camada de 0.30-0.40 m, o teste de Kruskal-Wallis indicou que a diferença na saturação por Al tem 93% de probabilidade de ser oriunda do efeito dos tratamentos (Figura 6d). O efeito de manejo físico associado ao químico (ESC_AQsup_ARA) reduziu significativamente a saturação por Al. Mesmo assim, os valores de 22, 42,4 e 60,2% de saturação por AL no ESC_AQsup_ARA, AQsup e ESC_AQsup, respectivamente, ainda são considerados altos e potencialmente restritivos ao crescimento de raízes (CQFS, 2016). Também na camada de 0.30-0.40 m, o pH do tratamento ESC_AQsup_ARA foi maior do que o AQsup (48% de probabilidade de efeito de tratamento) e a saturação de bases - impulsionada pelo aumento dos teores de Ca, Mg e K foi, pelo menos, 2.4 vezes maior do que os outros tratamentos (83% de probabilidade de efeito de tratamento).

Figura 6. pH, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e Saturação por Alumínio nas camadas 0 – 0.10 m, 0.10 – 0.20 m, 0.20 – 0.30 m e 0.30 – 0.40 m de um Neossolo com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA). *p*: probabilidade das diferenças entre os tratamentos serem ao acaso.

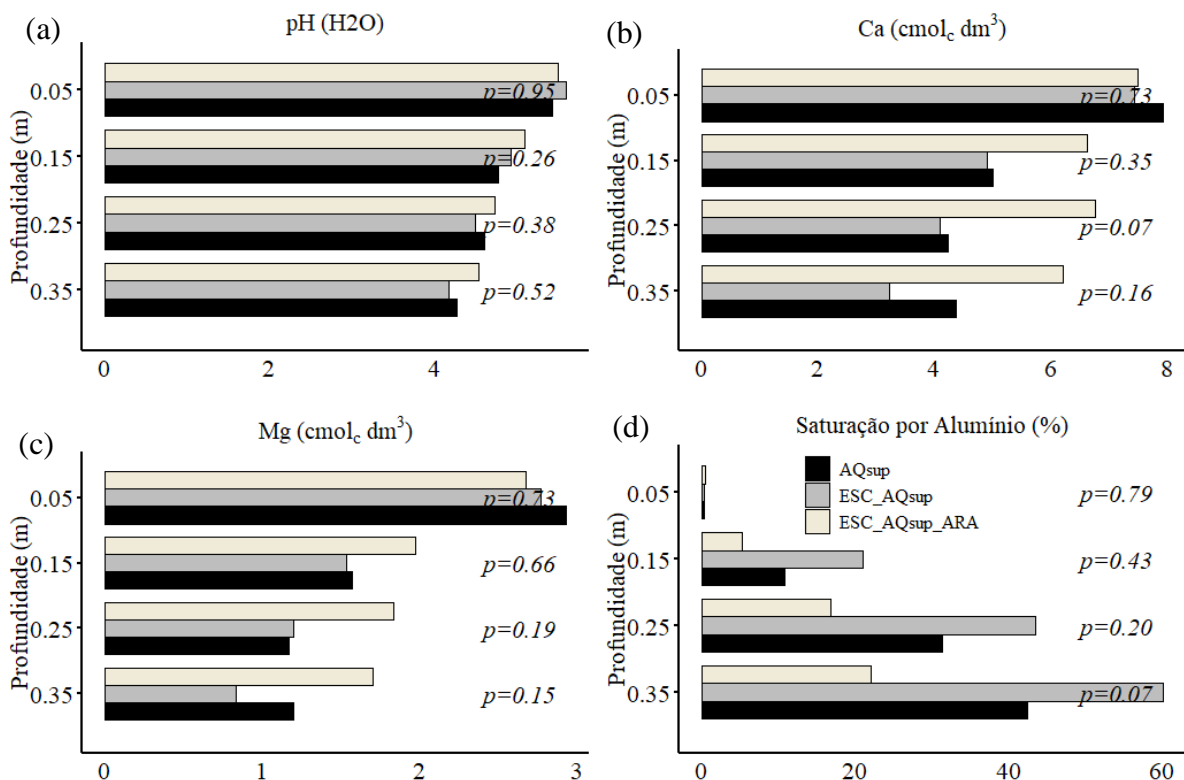
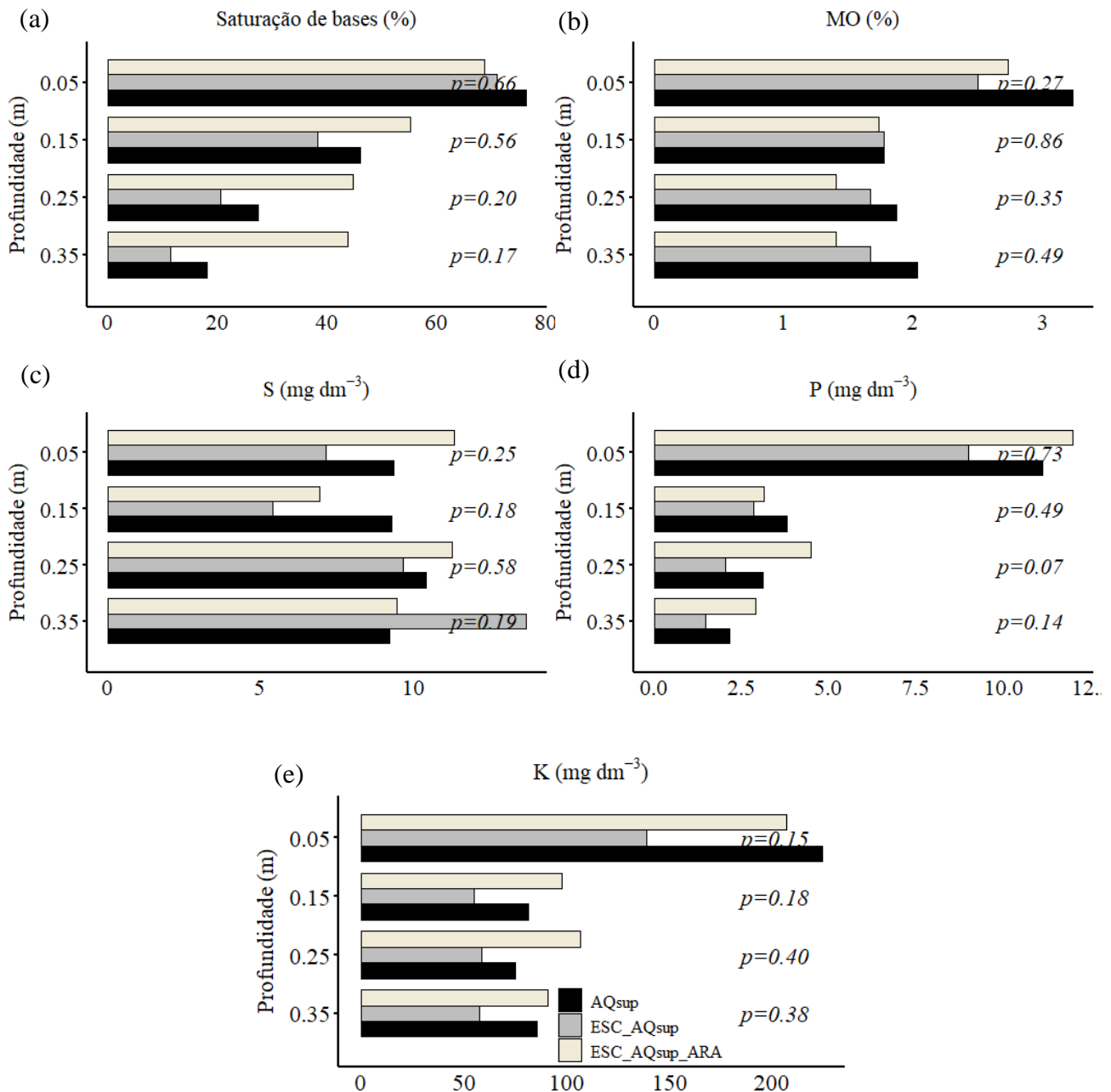


Figura 7. Saturação de bases, matéria orgânica (MO), enxofre (S), fósforo (P) e potássio (K) nas camadas 0 – 0.10 m, 0.10 – 0.20 m, 0.20 – 0.30 m e 0.30 – 0.40 m de um Neossolo com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA). *p*: probabilidade das diferenças entre os tratamentos serem ao acaso.

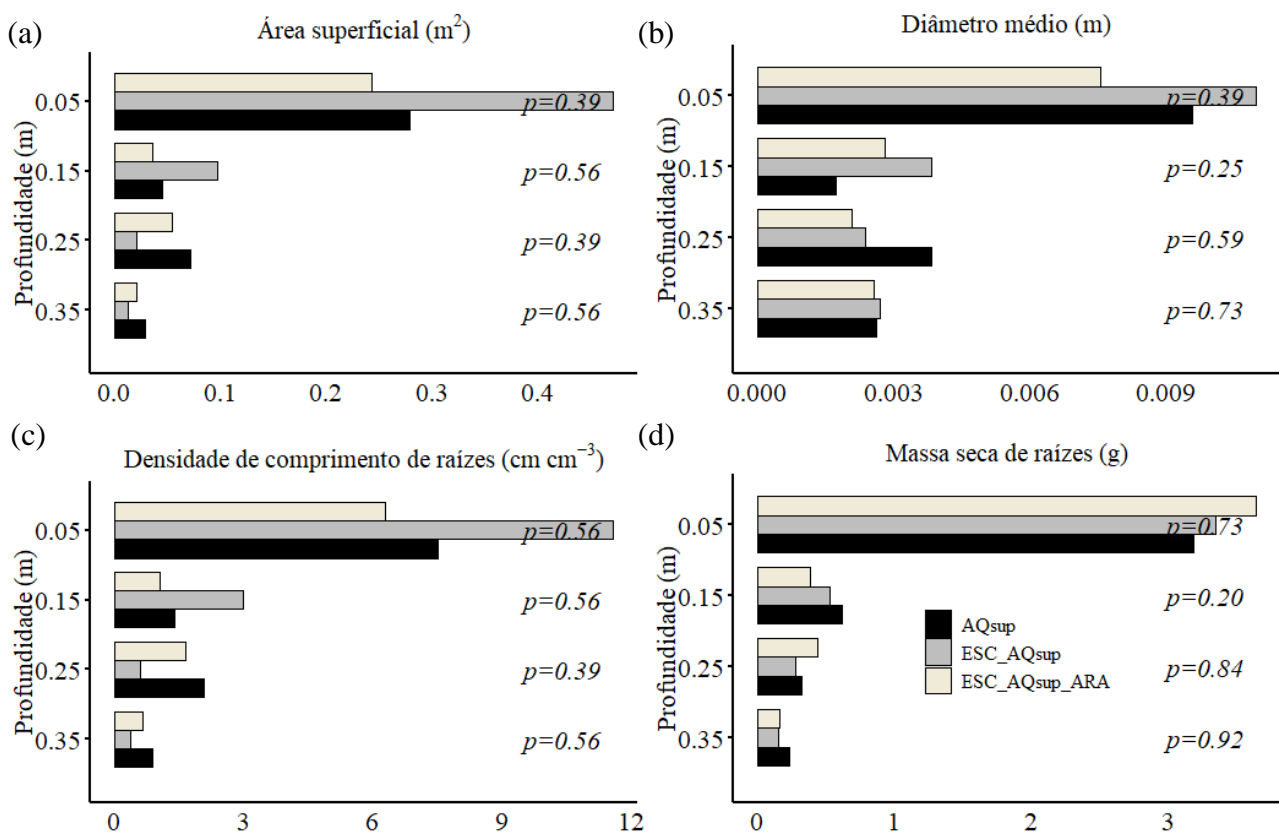


Produtividade de grãos e crescimento de raízes

A maior massa seca de raízes da soja (safra 2021/2022) foi observada na camada de 0-0.10 m do tratamento ESC_AQsup_ARA (Figura 8d), mas a maior DCR nessa camada ocorreu no

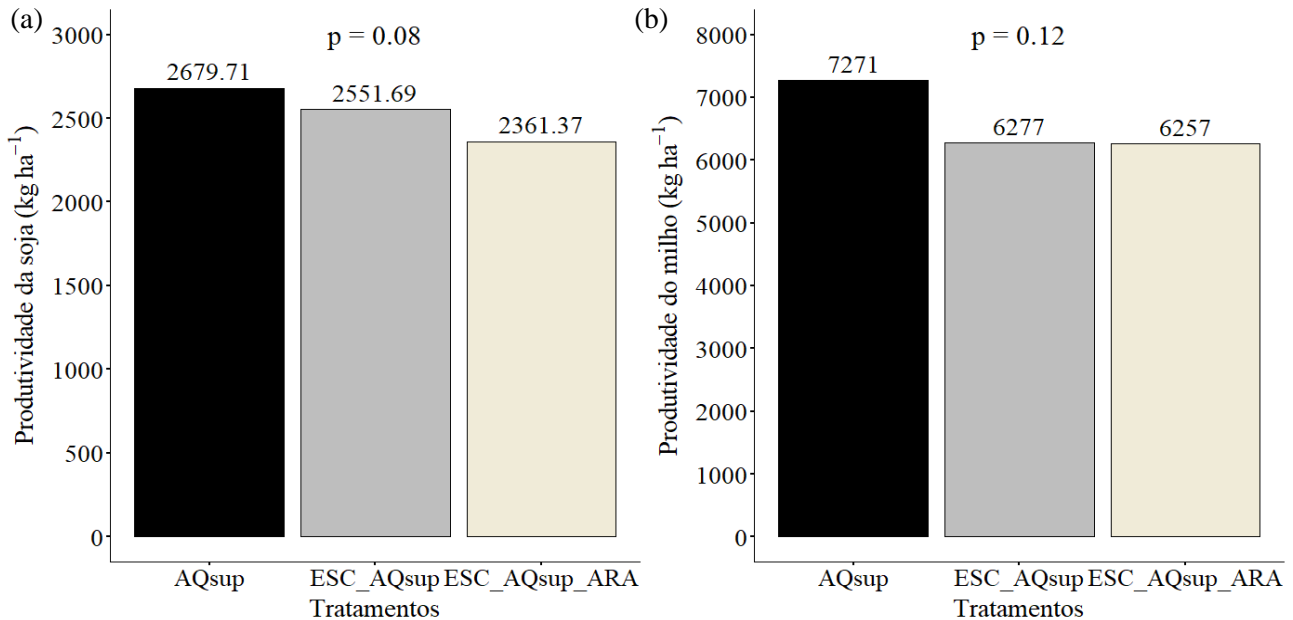
tratamento ESC_AQsup (Figura 8c). As raízes estiveram mais distribuídas em profundidade (0.20 a 0.40 m) no AQsup em comparação ao ESC_AQsup (Figura 8c). Nas camadas de 0.20-0.30 m e 0.30-0.40 m, a concentração de raízes foi menor no ESC_AQsup (Figura 8c). Nessas camadas, a probabilidade de a diferença entre as médias ter sido causada pelo efeito de tratamento foi de 61% e 44%, respectivamente.

Figura 8. Variáveis de crescimento de raízes de soja nas camadas 0 – 0.10 m, 0.10 – 0.20 m, 0.20 – 0.30 m e 0.30 – 0.40 m em um Neossolo com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA). *p*: probabilidade das diferenças entre os tratamentos serem ao acaso.



O teste de Kruskal-Wallis indicou que a diferença de produtividade da soja observada tem 8% de chance ($p = 0.08$) de ser de origem aleatória e 92% de chance de ter sido causada pelo efeito dos tratamentos (Figura 9a). A produtividade de grãos de soja obtido no tratamento AQ_{sup} foi de 2680 kg ha⁻¹, 128 kg ha⁻¹ a mais do que o tratamento ESC_AQ_{sup} (2551,69 kg ha⁻¹) e 318,34 kg ha⁻¹ a mais do que o tratamento ESC_AQ_{sup}_ARA (2361,37 kg ha⁻¹). O mesmo comportamento foi obtido na safra com o cultivo do milho (Figura 9b) com a produtividade de grãos no AQ_{sup} (7271 kg ha⁻¹) superando a produtividade do ESC_AQ_{sup} (6277 kg ha⁻¹) e do ESC_AQ_{sup}_ARA (6257 kg ha⁻¹) em 994 e 1014 kg ha⁻¹, respectivamente. O teste de Kruskal-Wallis indicou que a há 88% de probabilidade de a variação na produtividade ter sido causada pelos tratamentos.

Figura 9. Produtividade de grãos de soja (A) e milho (B) em um Neossolo sob plantio direto com aplicação de calcário, P e K em superfície (AQsup), escarificação seguida de AQsup (ESC_AQsup), escarificação seguida de AQsup e de aração (ESC_AQsup_ARA). *p*: probabilidade das diferenças entre os tratamentos serem ao acaso.



DISCUSSÃO

Do ponto de vista físico, o efeito dos tratamentos foi claramente percebido pelos testes de infiltração de água no solo e de resistência à penetração (RP). A maior infiltração de água no solo nos tratamentos ESC_AQsup e ESC_AQsup_ARA foi bastante nítida e muito superior ao AQsup. A infiltração de água no solo é um processo bastante sensível a variações da permeabilidade do solo (Boeno et al., 2021) que por sua vez pode ser bastante alterada por práticas de manejo que resultem em algum tipo de mobilização do solo, como a escarificação (Drescher et al., 2016).

A redução do fluxo de água em um solo não mobilizado, como é o caso do AQsup, é resultado do processo natural de acomodação do solo depois de alguma intervenção física que provavelmente resultou na obstrução de alguns poros. Outros autores já relataram esse efeito transitório da intervenção mecânica na infiltração de água no solo (Drescher et al., 2016) e em propriedades físicas do solo (Drescher et al., 2011) em solos profundos (Latosolos).

Os maiores valores de RP no AQsup na camada de 0.05 – 0.15 m de profundidade evidenciam a presença de uma camada mais compactada em profundidade nesse solo, o que é de ocorrência comum em solos manejados com sistema plantio direto (Drescher et al., 2011; Bonini et al., 2011). Os valores de RP dessa camada ultrapassam o limite crítico de 2 MPa (Blainski et al., 2008; Da Silva et al., 2015; Navarro et al., 2019). Diferentemente, onde houve intervenção

(ESC_AQsup e ESC_AQsup_ARA) em que os valores de RP ultrapassaram o limite crítico de 2 MPa somente na profundidade igual ou maior a 0.28 m, aproximadamente.

Mesmo com as restrições impostas pelo manejo com AQsup na infiltração de água e na RP, a fração de água disponível (FAD) foi beneficiada por esse tratamento nas camadas mais próximas à superfície, especialmente no período reprodutivo da soja (Figura 9a), quando a falta de água compromete severamente o desenvolvimento e a produtividade de grãos, o que foi intensificado nos tratamentos ESC_AQsup e ESC_AQsup_LAVR. Mesmo sem os dados de FAD, podemos atrelar a maior produtividade, também, do milho (Figura 9b) à melhor condição estrutural do solo no tratamento AQsup, por promover maior retenção de água e, conseqüentemente, melhor condição para o desenvolvimento da cultura. Portanto, na ausência de mobilização do solo, menor é o intervalo de tempo em que as plantas são submetidas a uma FAD considerada restritiva ao seu desenvolvimento (Figura 3).

A redução da disponibilidade de água no solo mobilizado é um efeito esperado. Isso ocorre porque há um intervalo específico de estados de compactação, acima e/ou abaixo dos quais a disponibilidade de água é comprometida (Silva et al., 2010). Este intervalo é intrinsecamente variável para cada tipo de solo. Neste estudo, a organização e espaçamento entre partículas de solo foram alterados pela mobilização com os tratamentos ESC_AQsup e ESC_AQsup_LAVR. Como resultado dessa modificação na estrutura do solo, percebeu-se uma redução notável na capacidade de retenção de água (Figura 3) que foi claramente percebida pelas plantas e traduzida em perdas na produtividade de grãos (Figura 3a e 3b).

O efeito da redução da FAD nas camadas superiores foi melhor percebido porque os tratamentos também afetaram a distribuição de raízes (Figura 8). O tratamento ESC_AQsup, por exemplo, concentrou mais raízes nas camadas mais próximas à superfície do solo (Figura 8c), onde a FAD foi mais restringida (Figura 3b). Algo parecido, porém, em menor magnitude, ocorreu no ESC_AQsup_LAVR. Nesses solos, o efeito na redução da resistência mecânica à penetração (Figura 2) na camada onde houve intervenção mecânica parece ter sido determinante para a maior concentração de raízes nessas camadas. Portanto, a menor resistência à penetração na camada mais próxima à superfície do solo condicionada faz com que aumente a concentração de raízes nesse local (Inagaki et al., 2021).

Embora a concentração de raízes do ESC_AQsup_ARA na camada de 0-0.10 m tenha sido menor do que o ESC_AQsup (Figura 8c), as raízes tanto dessa camada quanto da camada 2, foram submetidas a uma disponibilidade de água 20% menor em comparação ao AQsup e o ESC_AQsup (Figura 3). Fica claro, portanto, que a descompactação mecânica associada a incorporação de corretivos químicos no solo não beneficiou a distribuição de raízes em profundidade (Figura 8c), e

prejudicou a disponibilidade de água (Figura 3), o que impactou diretamente a produtividade de grãos (Figura 9). Por isso, a adoção da escarificação como prática de manejo para minimizar os efeitos do déficit hídrico pelo aprofundamento de raízes, parece não ser uma estratégia segura. Se fosse assim, o perfil de aprofundamento radicular do ESC_AQsup deveria ter concentrado uma maior quantidade de raízes em profundidade em comparação ao AQsup, o que não aconteceu (Figura 8c). Por esse motivo, escarificar um solo pode resultar em maiores prejuízos ao produtor. O alto custo de operação associado ao risco de reduzir a produtividade de grãos evidenciam isso

É possível que outras estratégias, como o uso de culturas de cobertura verde, possam criar melhores condições de solo para distribuição de raízes em profundidade (Rankoth et al., 2021; Acharya et al., 2019; Bertollo et al., 2021; Calonego et al., 2017), já que o aumento da porosidade e redução da densidade do solo em profundidades de até 0.40-0.60 m (Calonego et al., 2017) podem perdurar por um prazo de tempo maior do que o da descompactação mecânica. Contudo, é fundamental avaliar os resultados da escarificação a longo prazo e compará-los com outras abordagens antes de decidir se é uma estratégia viável ou não.

Mesmo com a melhoria das propriedades químicas com a incorporação de fertilizantes (ESC_AQsup_ARA), as variáveis químicas, especialmente a saturação por Al, ainda é considerada restritiva ao desenvolvimento de raízes. Isso porque o calcário aplicado superficialmente praticamente não tem efeito em camadas mais profundas do que 5 centímetros (Bellinaso et al. 2021). Percebe-se, portanto, que esse não foi o fator determinante na distribuição de raízes em profundidade (Figura 8c). Se fosse assim, no tratamento ESC_AQsup_ARA deveria haver maior proporção de raízes nas camadas 3 e 4 em comparação ao AQsup, o que não constatado nesse estudo. Embora esse efeito possa ser observado a longo prazo, o impacto do manejo físico do solo na RP e na FAD foi determinante na distribuição de raízes e no estresse hídrico experimentado por essas raízes durante o primeiro ano de cultivo e, provavelmente, no segundo também. Portanto, no déficit hídrico ocorrido durante os ciclos de cultivo, a redução da RP condicionada pela mobilização do solo pode resultar em perdas significativas de produtividade de grãos.

CONCLUSÕES

A mobilização eventual de um Neossolo manejado com plantio direto pode prejudicar o aprofundamento das raízes e aumentar os riscos de perdas na produtividade de grãos em safra com déficit hídrico. A causa mais aparente é a redução da retenção e disponibilidade de água na camada fisicamente alterada.

A duração do efeito da mobilização do solo na redução da disponibilidade de água é uma incerteza, o que proporciona uma lacuna para futuras investigações. Entretanto, é possível afirmar que uma estratégia de descompactação fundamentada na preservação da estrutura do solo pode proporcionar uma condição de solo mais favorável em termos de disponibilidade de água. Além disso, é importante destacar que a magnitude das perdas de produtividade de grãos observadas neste estudo, específico para a classe de solo Neossolo, pode variar caso as mesmas condições sejam aplicadas em outras classes de solo.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) do Brasil.

REFERÊNCIAS

- Acharya BS, Dodla S, Gaston LA, Darapuneni M, Wang JJ, Sepat S, Bohara H. Winter cover crops effect on soil moisture and soybean growth and yield under different tillage systems. *Soil Till Res.* 2019;195:104430. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104430>.
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JDM, Sparovek G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol Z.* 2013;22(6):711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Battisti R, Sentelhas PC. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. *Agron J.* 2017;109(4):1612-1622. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0023>.
- Bellinaso RJS, Tiecher T, de Vargas JPR, Rheinheimer DS, Bruun S. Crop yields in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in depth. *Soil Res.* 2021;60(1):33-49. <https://doi.org/10.1071/SR21021>.
- Bergamin AC, et al. Induced compaction of a rhodic Acrustox as related to maize root growth. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2010;34:681-691. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300009>.
- Bertollo AM, de Moraes MT, Franchini JC, Soltangheisi A, Junior AAB, Levien R, Debiasi H. Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. *Soil Till Res.* 2021;206:104820. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104820>.
- Bertollo AM, Levien R. Soil compaction in no-tillage system. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha.* 2019;25(3):208-218. <https://doi.org/10.36812/pag.2019253208-218>.
- Blainski É, Tormena CA, Fidalski J, Guimarães RML. Quantifying soil physical degradation through the soil penetration resistance curve. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2008;32(3):1171-1178. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300007>.
- Boeno D, Gubiani PI, Lier QDJV, Mulazzani RP. Estimating lateral flow in double ring infiltrometer measurements. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2021;45:e0210027. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210027>.
- Böhm W. *Methods of Studying Root Systems. Biological Conservation, Ecological Studies.* Springer Berlin Heidelberg. 1979. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8>.
- Bonini AK, Secco D, Santos RF, Reinert DJ, Reichert JM. Physical-hydraulic attributes and wheat yield in an Oxisol under compaction states. *Cienc Rural.* 2011;41:1543-8. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000122>.
- Bortoluzzi EC, Parize GL, Korchagin J, Silva VRD, Rheinheimer DDS, Kaminski J. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2014;38:262-271. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100026>.

- Calonego JC, Raphael JPA, Rigon JPG, Oliveira Neto L de, Rosolem CA. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *Eur J Agron*. 2017;85:31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.12.009>.
- CONAB. Série histórica das safras - soja. Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30>.
- CQFS-RS/SC. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (11ª ed.). Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. 2016.
- Da Silva E, Conceição SP, Amorim FF, França BRB, Pamponet BM, Oliveira RJ. Chemical and physical attributes of a yellow dystrophic oxisol and rootgrowth of *Brachiaria decumbens* submitted to fertilization and subsoiling. *Comunicata Scientiae*. 2015;6(4):385-395. <https://doi.org/10.14295/CS.v6i4.484>.
- Donagema GK, Campos DVB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM. Manual de Métodos de Análise de Solo. Embrapa. 2011.
- Drescher MS, Eltz FLF, Denardin JE, Faganello A. Persistence of mechanical interventions effect for soil decompaction in no-tillage systems. *Rev Bras Cienc Solo*. 2011;35:1713-22. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500026>.
- Drescher MS, Reinert DJ, Denardin JE, Gubiani PI, Faganello A, Drescher GL. Duration of changes in physical and hydraulic properties of a clayey Oxisol by mechanical chiseling. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2016;51(2):159-168. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200008>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Status of the World's Soil Resources: Main Report. FAO, ITPS, Global Soil Partnership. 2015; 650.
- Inagaki TM, de Moraes Sá JC, Tormena CA, Dranski A, Muchalak A, Briedis C, da Silva AP, et al. Mechanical and biological chiseling impacts on soil organic C stocks, root growth, and crop yield in a long-term no-till system. *Soil Till Res*. 2021;211:104993. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104993>.
- Keller T, Sandin M, Colombi T, Horn R, & Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil Till Res*. 2019;194:1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>.
- Kumar V, et al. A Review of Soil Compaction- Concerns, Causes and Alleviation. *Int J Plant Soil Sci*. 2018;22(4):1-9. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2018/40351>
- Letey J. Relationship between soil physical properties and crop production, in: Stewart BA (Ed.), *Adv Soil S*. Springer New York, NY, p. 320. <https://doi.org/10.1007978-1-4612-5046-3>.

- Mehlich A. Soil test evaluation of phosphorus, potassium, sodium, calcium, magnesium and manganese by a new Mehlich extract. Memo 4, Agronomy Division, North Carolina Department of Agriculture, Raleigh, NC, 4 pp. (unpublished). 1965.
- Mulazzani RP, Gubiani PI, Zanon AJ, Drescher MS, Schenato RB, & Girardello VC. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT. *Soil Till Res.* 2022;203:103523. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>.
- Nascimento VN, et al. Physical attributes of a dystrophic regolithic neosol under pasture submitted to mechanical forage harvesting or animal grazing. *Bol Ind Anim.* 2017;74(3):169-175. <https://doi.org/10.17523/bia.v74n3p169>
- Navarro Vasquez M, Florida Rofner N, Navarro Vasquez L. Physical attributes and organic matter of oxisols in sugar cane production systems. *Rev Invest Altoandinas.* 2019;21(2):89-99. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2019.453>.
- Peixoto DS, Silva BM, de Oliveira GC, Moreira SG, da Silva F, Curi N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil Till Res.* 2019; 194:104307. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>.
- Pereira CA, Mulazzani RP, de Jong Van Lier Q, de Araújo Pedron F, Gubiani PI. Particle arrangement and internal porosity of coarse fragments affect water retention in stony soils. *European J Soil Sci.* 2023;74(3):e13382. <https://doi.org/10.1111/ejss.13382>.
- Piccin M, Amado TJC, Fiorin JE. Management strategies to deep rooting layer improvement of an Oxisol. *Rev Ciênc Agrár.* 2020;43(2):174-183. <https://doi.org/10.19084/rca.19242>.
- R CORE TEAM. (n.d.). R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available: <https://www.R-project.org/>.
- Raij B van, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. *Inst Agrônômico.* 2001.
- Rankoth LM, Udawatta RP, Anderson SH, Gantzer CJ, Alagele S. Cover crop influence on soil water dynamics for a corn–soybean rotation. *Agrosyst Geosci Environ.* 2021;4(3):e20175. <https://doi.org/10.1002/agg2.20175>.
- Reichert JM, Fontanela E, Awe GO, Fasinmirin JT. Is cassava yield affected by inverting tillage, chiseling or additional compaction of no-till sandy-loam soil *Rev Bras Ciênc Solo.* 2021;45: e0200134. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200134>.
- Reinert DJ, Reichert JM. Use of sand column to measure soil water retention: prototypes and test. *Ciênc Rural.* 2006;36:1931-1935. <https://doi.org/10.1590/S0103-8478200600044>.

- Reynolds WD, Elrick DE, Youngs EG. Single-ring and double-ring infiltrometers. In Dane JH, Topp GC (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4 - Physical methods* (pp. 821-826). Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Oliveira JB, Coelho MR, Lumberras JF, Cunha TJF. (2013). *Brazilian system of soil classification*. 3rd edition. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Sentelhas PC, et al. The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *J Agric Sci*. 2015;153(8):1394-1411.
<https://doi.org/10.1017/S0021859614000939>.
- Silva AP, Tormena AA, Junior MSD, Imhof S, Klein VA. Indicadores da qualidade física do solo. In: Jong Van Lier Q De, editor. *Física do Solo*. 1nd ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.241-281.
- Silva TSD, Cassol EA, Levien R, Eltz FLF, Schmidt MR. Long-term wheat-soybean successions affecting the cover and soil management factor in USLE, under subtropical climate. *Soil Till Res*. 2020;196:104501. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104501>.
- Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy*. 12ed. USDANRCS, Washington, DC, USA.
- Suzuki LEAS, Reichert JM, Albuquerque JA, Reinert DJ, Kaiser DR. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. *Geoderma Regional*. 2015;5:64-70.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.03.005>.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).
- Valadão FC de A, et al. Phosphorus fertilization and soil compaction: soybean and mayze root system and soil physical properties. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2015;39:243-255.
<https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150144>.

Evaluation of soybean root distribution in southern Brazil

(Artigo submetido à Revista Geoderma Regional)

Abstract

Large soybean yield gaps are related to irregular rainfall patterns in several rainfed soybean crop regions, such as southern Brazil. More efficient rainwater use can be achieved in these regions through deeper roots. Therefore, assessing the status of soybean rooting and soil-related factors that drive root growth in soybean fields is mandatory for making management decisions that minimize the yield gap. To this end, we conducted a survey in 10 fields in the state of Rio Grande do Sul (RS), Brazil, during the 2021/22 season. Undisturbed soil blocks and cores and disturbed soil samples were collected in trenches up to approximately 80 cm deep when the soybean was at the R5 stage. The roots washed from the soil blocks were scanned to determine the relative root length density (RRLD), whereas the soil cores and disturbed samples were used for physical and chemical analyses. Hierarchical cluster analysis based on the RRLD was performed to group fields according to their similarities in root distribution and soil-related factors. Soybean rooting in RS fields is quite shallow, with more than 72% of the total RRLD in all fields located within the 0–20 cm layer and less than 15% deeper than 40 cm in most fields. The highest concentration of roots close to the soil surface occurred in the fields where the soil profile was limited to the bedrock at a depth of 47 cm. A sharp decrease in the RRLD related to physical constraints was observed in 33% of the fields. A gradual decrease in RRLD was observed in 55% of the fields with chemical limitations. The most homogeneous root distribution was observed in the fields with more large pores and a lower gradient of acidity-related variables along the soil profile.

Keywords: root growth; physical constraints; chemical constraints; soybean root survey

29 **1. Introduction**

30

31 Land use intensification towards more efficient agriculture is mandatory to reach the
32 global goals of sustainable development, mainly Goals 2, 13, and 15¹ (UN General Assembly,
33 2015). Intensification involves increasing the biomass production of agricultural crops per unit
34 of land. Although breeding programs have enhanced crops efficiency in converting solar
35 radiation, water, and nutrients into yield (Umburanas et al., 2022), significant yield gaps related
36 to water deficit and crop management persist (Minussi Winck et al., 2023). Reducing yield gaps
37 increases harvesting and favors the preservation of natural ecosystems, as the increase in
38 agricultural production does not depend on the increase in the area used for crops.

39 Water deficit is an important cause of the yield gap in rainfed agriculture, particularly in
40 regions with irregular rainfall pattern. This is the case in Brazil, a global producer and exporter
41 of crops and livestock products and the largest producer of soybean (FAO, 2021), where more
42 than 87% of the cropland area is rainfed (ANA, 2021; FAO, 2021). The combination of few
43 irrigated area with irregular rainfall has resulted in water deficit and large yield gap in soybean
44 production in the southern states of Brazil, particularly in the state of Rio Grande do Sul (RS)
45 (Minussi Winck et al., 2023; Sentelhas et al., 2015). Although RS ranks fourth in soybean
46 production in Brazil, its average soybean yield over the last five years has been 27,5% lower
47 than the average Brazilian soybean yield (CONAB, 2023). Rainfall scarcity between December
48 and March (the soybean growing season in RS), particularly in years under La Niña conditions,
49 is the major cause of lower soybean yield in RS (Arsego et al., 2019; Berlato and Fontana,
50 1999; Zanon et al., 2016). Improvement in rainwater use to reduce the soybean yield gap in RS
51 will certainly contribute to greater land use efficiency locally and to greater soybean availability
52 globally.

¹ Goal 2 - End hunger, achieve food security and improved nutrition, and promote sustainable agriculture.
Goal 13 - Take urgent action to combat climate change and its impacts.
Goal 15 - Protect, restore, and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage
forests, combat desertification, halt and reverse land degradation, and halt biodiversity loss.

53 The amount of rainwater used by soybean depends largely on the root distribution.
54 Greater concentration of roots in deeper soil layers minimizes yield loss during drought periods
55 because they enable the plant to uptake rainwater stored in a more extensive section of the soil
56 profile. A survey of soybean root distribution in fields over the central region of Brazil (Sako et
57 al., 2015) found that soybean yield was greater than 7.2 Mg ha⁻¹ where 50% or more of the roots
58 grew deeper than 30 cm, whereas yield was lower than 4.0 Mg ha⁻¹ where 40% or less of the
59 roots grew deeper than 30 cm. It is important to note that the benefit of deeper roots, as
60 observed by Sako et al. (2015), depends on replenishing soil water by rainfall. The combination
61 of deep roots with scarce rainfall may result in a soybean yield similar to the yield from the
62 combination of shallow roots but with abundant rainfall (Battisti and Sentelhas, 2017). As the
63 relationship between root depth and yield is not detectable in all seasons, the benefit of deeper
64 roots in decreasing the yield gap in regions with interannual variability in rainfall pattern is
65 more evident over the long term. Simulations of the soybean yield gap for climatic conditions of
66 the central region of RS over 30 years showed no effect of root depth on the yield gap in almost
67 20% of the years; however, the yield gap reduced from 40 to 12% as the rooting depth increased
68 from 50 to 150 cm when considering the 30 years (Mulazzani et al., 2022).

69 Thus, increasing root depth is a reasonable management strategy for reducing the
70 soybean yield gap. However, the efficiency of this strategy to decrease yield gap in RS depends
71 on how far the current root distribution in soybean fields is from the attainable root distribution
72 that minimizes yield gap (roots more concentrated in deeper layers) (Battisti and Sentelhas,
73 2017; Mulazzani et al., 2022; Sako et al., 2015). Unfortunately, information on the current root
74 distribution in soybean fields in RS is scarce. This information is necessary to evaluate whether
75 the attainable increase in yield compensates for management efforts/costs linked to increased
76 root depth.

77 The feasibility of increasing root depth also depends on knowledge of soil-related
78 factors that prevent root growth. Physical and chemical soil factors that limit root growth are
79 widely known. For example, the reduction in root deepening caused by high soil mechanical
80 resistance (Moraes et al., 2020), low soil aeration (Hu et al., 2021), high acidity (Meng et al.,

81 2019), high concentration of toxic Al^{3+} ion (Poschenrieder et al., 2008), and low concentration
82 of nutrients (Bossolani et al., 2021) are well documented. Nevertheless, different restrictive
83 factors require different management interventions to improve root distribution. Chiseling or
84 subsoiling effectively reduces the mechanical resistance of compacted layers but has no effect
85 when chemical restrictions are present; however, the opposite is true for liming. Hence, the most
86 effective management strategy for increasing root depth depends on identifying the major
87 limiting factors.

88 RS farmers usually sample soil for fertilization and liming purposes, enabling them to
89 assess the chemical restrictions on roots. However, samples are predominantly obtained from
90 superficial layers (0–10 or 0–20 cm), and physical restrictions are rarely evaluated using
91 analytical methods. Similar to root distribution, soil-related factors that limit root growth in
92 deep soil layers (below 20 cm) are largely unknown in soybean fields in RS. Thus, our objective
93 was to conduct a survey of root distribution and soil-related factors that constrain root growth
94 along the soil profile of soybean fields in RS.

95

96 **2. Material and methods**

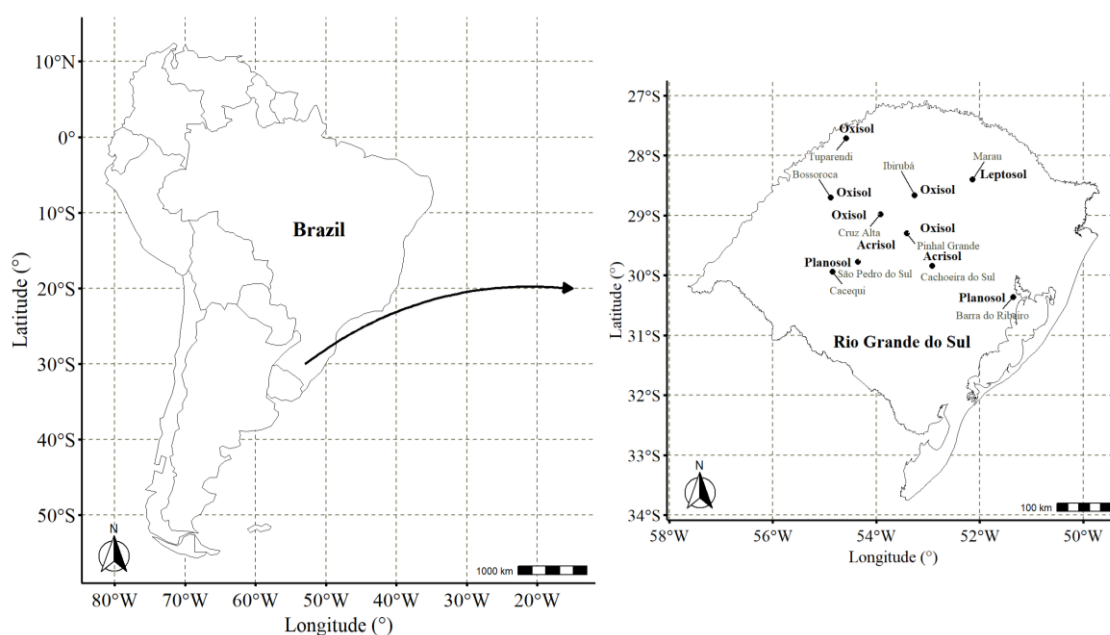
97

98 2.1 Description of evaluated soybean fields and sampling procedures

99

100 The survey was conducted in 10 soybean fields in the state of Rio Grande do Sul (RS),
101 Brazil, during the 2021/22 season (October to March) (Fig. 1). A larger number of fields were
102 selected in the soil classes encompassing a larger cropped area of soybean in RS. Thus, we
103 sampled five fields in Oxisols (Latossolos), two fields in Acrisols (Argissolos), two fields in
104 Planosols (Planossolos), and one field in Leptosol (Neossolo lítóico), which were described
105 according to the WRB classification (IUSS Working Group WRB, 2015), followed by the
106 Brazilian Soil Classification in parenthesis (Santos et al., 2018) (Table 1). Only fields cultivated
107 with the best management practices were selected, which included a combination of cultivars
108 with high potential yield (fertilized and sowed on appropriate dates and populations to support

109 the potential yield) with adequate protection against biotic stresses (chemical products were
 110 used to minimize damage caused by weeds, bugs, and diseases on soybean seeds and plants).
 111 Therefore, the differences in soybean growth, development, and yield were mostly caused by
 112 environmental variations among fields (weather and soil) rather than by the
 113 management/technology applied by farmers.



114
 115 **Fig. 1.** Location of the soybean fields selected for the root distribution survey in Rio Grande do
 116 Sul state, Brazil.

117

118 **Table 1.** General description of soybean fields selected for root distribution survey in Rio Grande
 119 do Sul, Brazil.

Field	Local	Soil class ¹	Clay ² (%)	Sand ² (%)	Tillage system ³	Sowing date	Cultivar	MG ⁴	Irrigation	Population ⁵ (pl. m ⁻²)	Yield (Mg ha ⁻¹)
BOS	Bossoroca	Oxisol	60.5	9.8	NT	Nov. 28	BMX Fibra IPRO	6.4	No	28.9	2.89
CRU	Cruz Alta	Oxisol	39.4	50.0	NT	Nov. 10	55I57 RSF IPRO	5.5	Yes	33.3	4.93
IBI	Ibirubá	Oxisol	51.3	37.0	NT	Nov. 4	BMX Zeus IPRO	5.5	Yes	31.1	3.78
PIN	Pinhal Grande	Oxisol	26.3	65.8	NT	Oct. 28	BMX Raio IPRO	5.0	No	24.0	1.38
TUP	Tuparendi	Oxisol	68.2	7.0	NT	Nov. 11	BRS 5601	5.6	No	26.7	1.30
CCH	Cachoeira do Sul	Acrisol	29.4	42.8	NT	Nov. 5	BMX Zeus IPRO	5.5	No	28.0	4.32
SPS	São Pedro do Sul	Acrisol	13.3	74.3	NT	Oct. 4	BMX Alvo RR	5.9	No	31.1	1.73
BAR	Barra do Ribeiro	Planosol	12.8	53.4	CT	Nov. 4	DM5958	5.9	No	28.9	4.56
CAC	Cacequi	Planosol	5.5	86.0	CT	Nov. 10	BMX Garra IPRO	6.3	No	28.9	3.22

MA R	Marau	Leptosol	49.3	18.0	NT	Nov. 20	BMX Zeus IPRO	5.5	No	26.7	3.19
120	¹ soil class according to WRB (IUSS Working Group WRB, 2015).										
121	² average of all layers. Particle size distribution of each layer is detailed in Table A.1 (Supplementary Data –										
122	Appendix A).										
123	³ NT – no-tillage; CT – conventional tillage.										
124	⁴ maturity group.										
125	⁵ measured at the R5 stage.										
126	Fields were sowed between October 4 and November 28 with cultivars with a maturity										
127	group (MG) ranging from 5.0 to 6.4, and with an indeterminate growth habit. Only two fields										
128	were cropped in the conventional tillage system (chiseling or plowing followed by harrowing),										
129	whereas the others adopted no-tillage system. Two fields were equipped with an irrigation										
130	system. Further details regarding these fields are presented in Table 1. For conciseness, fields										
131	will be identified using the acronyms listed in the first column of Table 1 hereafter.										
132	Soil samples for determining root distribution and physical and chemical variables were										
133	collected at the maximum vegetative growth of soybean, approximately at the R5 stage on the										
134	Fehr and Caviness scale (Fehr and Caviness, 1977). One trench at approximately 80 cm depth										
135	(except in the MAR field, where the soil profile was 47 cm depth) was dug transversely into a										
136	sowing row in each field. The soil profiles were divided into morphologically different layers										
137	based on their texture, color, and mechanical resistance to a knife tip. This resulted in different										
138	numbers of layers and layer thicknesses between fields (Table 2). In each layer, soil blocks were										
139	collected for root determination, and soil cores (metal rings of 5 cm height and 6 cm diameter)										
140	were sampled for physical analysis that required undisturbed structure. Disturbed samples were										
141	collected for chemical and additional physical analyses that did not require undisturbed										
142	structure. The horizontal dimensions of the soil blocks (width and length) were equal to the										
143	intra-row and inter-row plant spacing, respectively (Table 2). The top block contained a plant at										
144	its center, and its height was equal to the thickness of the first layer. The deeper blocks were										
145	sampled exactly below the top block, and their heights were equal to their respective layer										
146	thicknesses. The undisturbed soil cores were taken from the center of each layer, whereas the										
147	undisturbed samples comprised soil material taken from the entire layer.										

148 **Table 2.** Layer position along the soil profile and intra- and inter-row plant spacing in sampled
 149 soybean fields for root distribution survey in Rio Grande do Sul state, Brazil.

Field	Layer position along soil profile (cm)						Spacing (cm)	
	1	2	3	4	5	6	Intra-row	Inter-row
BOS	0–6	6–16	16–29	29–49	49–65	65–80	7.69	45
CRU	0–9	9–19	19–40	40–55	55–80	–	6.66	45
IBI	0–9	9–21	21–38	38–57	57–67	67–80	7.14	45
PIN	0–6	6–14	14–31	31–45	45–65	65–85	8.33	50
TUP	0–6	6–23	23–43	43–63	63–83	–	8.33	45
CCH	0–7	7–17	17–37	37–57	57–77	–	7.14	50
SPS	0–8	8–18	18–35	35–55	55–70	70–85	7.14	45
BAR	0–6	6–22	22–42	42–62	62–82	–	7.69	45
CAC	0–7	7–16	16–31	31–46	46–65	65–85	7.69	45
MAR	0–9	9–25	25–47	–	–	–	8.33	45

150

151 2.2 Root distribution measurements

152

153 Soil blocks with roots were immersed in water inside a bucket for complete
 154 disaggregation, and the suspension of soil with roots was passed through a 1 mm mesh sieve
 155 (Böhm, 1979). The roots and coarse particles retained on the sieve were transferred to a tray
 156 with water to remove organic detritus and coarse materials manually. The primary root of the
 157 upper block was also removed (after detaching the lateral roots from it) because it had a greater
 158 diameter (and mass) and shorter length, which did not represent the length/mass ratio of the rest
 159 of the roots. The cleaned roots were then cut into 1 cm-long fragments, and approximately 10%
 160 (wet mass) were subsampled for root length determination using scanner imaging. Scanning
 161 10% of the roots reduces the time spent on the analysis significantly and is accurate for
 162 estimating the root length of the entire sample (Costa et al., 2000; Moraes et al., 2020). After
 163 root scanning (EPSON Expression 11000 Scanner), images were processed using WinRHIZO
 164 software (Arsenault et al., 1995) to determine root length. Scanned roots (~10%) and unscanned
 165 roots (~90%) were oven dried at 60 °C for 72 h. The length/dry mass ratio of the scanned roots
 166 was multiplied by the total dry mass of the roots (scanned + unscanned roots) to determine the
 167 total root length in the sample.

168 The root length density (RLD) was calculated for each soil block by dividing the root
 169 length by the block volume (block width \times block length (intra- and inter-row) \times block height
 170 (layer thickness)). After determining the RLD for all the layers, we calculated the relative root
 171 length density (RRLD) of each layer using Eq. 1:

$$172 \quad \text{RRLD}_i = \frac{\text{RLD}_i}{\sum_{i=1}^n \text{RLD}_i} 100$$

173 where RRLD_i is the relative root length density of layer i (expressed as a percentage)
 174 and RLD_i is the root length density of layer i (cm cm^{-3}). Instead of using root mass, we used
 175 root length density to represent the presence of roots in a soil layer because the ability of a root
 176 system to explore soil volume depends more on its length than its mass (Faye et al., 2019).
 177 There would be no difference in root mass or length if the roots had the same diameter;
 178 however, the roots of dicotyledons were slightly thicker in the superficial layers than in the
 179 deeper layers (Fan et al., 2016; Müller et al., 2020). Furthermore, we normalized the RLD (Eq.
 180 1) because water uptake by the plant from each soil layer is related to the proportion of roots
 181 within the layer rather than the absolute quantity of roots (Gardner, 1964).

182

183 2.3 Soil physical variables

184

185 Soil cores with undisturbed structure were used to determine the saturated hydraulic
 186 conductivity (K_{SAT} , cm h^{-1}), water content at saturation (SAT , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), water content at field
 187 capacity (FC , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), bulk density (BD , g cm^{-3}) and penetration resistance (PR , MPa). The
 188 K_{SAT} was determined using a constant head permeameter (Teixeira et al., 2017). SAT and FC
 189 were determined as the water content after 48 h of saturation and drainage at 1 m of matric
 190 suction in a sand column, respectively (Reinert and Reichert, 2006). PR was measured with a
 191 bench penetrometer pushing a cone with a 12.5 mm^2 basal area at a rate of 1 cm min^{-1} into the
 192 soil samples drained at 3.3 m of matric suction. BD was calculated as the sample dried mass
 193 after 48 h in an oven at $105 \text{ }^\circ\text{C}$ divided by the core volume. As BD comparisons may be biased
 194 by soil texture, we relativized BD to the maximum BD (MBD), which was estimated as a

195 function of clay content with $MBD = -0.009 \times \text{clay}(\%) + 2.0138$, fitted for RS soils (Marcolin
 196 and Klein, 2011). By dividing BD/MBD , we calculated the degree of compaction (DC) and used
 197 it to compare the sampled fields.

198 Some of the disturbed soil samples were used to determine the sand, silt, and clay
 199 content and water retention at the permanent wilting point (PWP, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). The sand, silt, and
 200 clay contents were determined using the pipette method (Suzuki et al., 2015), and the PWP was
 201 determined at 150 m of matric suction using a dew point potentiometer (Gubiani et al., 2012).

202 We also calculated the air-filling porosity at FC (AFP, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), the difference between
 203 SAT and FC, as an estimate of soil aeration capacity, and the available water (AC, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), the
 204 difference between FC and PWP, as an estimate of the soil holding capacity of water that the
 205 roots can uptake.

206

207 2.4 Soil chemical variables

208

209 The remaining disturbed soil samples were used to analyze chemical variables, such as
 210 water pH, potential acidity ($(H+Al)$, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), phosphorus (P, mg dm^{-3}), potassium (K, mg dm^{-3}),
 211 calcium (Ca, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), magnesium (Mg, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), aluminum (Al, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), organic
 212 matter (OM, %), bases saturation (B_{SAT} , %) and aluminum saturation (Al_{SAT} , %). Soil pH was
 213 measured in an aqueous suspension (1:1 v/v) (CQFS/NRS-SBCS, 2016), and $(H+Al)$ was
 214 estimated using the equation $H+Al = e^{(10.665 - (1.1483SMP))} / 10$ (Kaminski et al., 2001), which is a
 215 function of the pH of a suspension of the soil with the SMP buffer solution (Shoemaker et al.,
 216 1961). Available P and K were extracted using a Melich-1 solution (1:10 v/v); exchangeable Al,
 217 Ca, and Mg were extracted using $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ (1:10 v/v) (Tedesco et al., 1995), and OM was
 218 extracted by sulfochromic digestion (Walkley and Black, 1934). Colorimetry was used to
 219 determine the P (Murphy and Riley, 1962) and OM contents, and the K content was measured
 220 using a flame emission spectrophotometer. The Al content was determined by titration with a
 221 standardized $0.0125 \text{ mol L}^{-1}$ NaOH solution and Ca and Mg content by atomic absorption
 222 spectrophotometry. Based on results of the measurements described above, we calculated B_{SAT}

223 $= 100 \times ((\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}) / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + (\text{H} + \text{Al})))$ and Al_{SAT}

224 $= 100 \times (\text{Al} / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Al})).$

225

226 2.5 Soybean yield

227

228 Soybean yield information was provided by the individual farmers. The informed yield
229 is the average of an area of approximately 2.5 ha harvested over the sampling point, with grain
230 humidity adjusted to 13%.

231

232 2.6 Evaluation of soil-root relationship

233

234 The initial characterization of root distribution along the soil profile was performed
235 using graphical analysis and descriptive statistics. Next, we ran a cluster analysis to identify
236 fields with similar root distribution. We applied the “agnes” algorithm (Struyf et al., 1997),
237 present in the “cluster” R package (Maechler et al., 2022), to conduct an agglomerative
238 hierarchical clustering. The algorithm has been set to use the Euclidean distance in the
239 dissimilarity matrix and the average linkage method for grouping. The soil layers were used as
240 clustering variables, and the RRLD of each layer was the variable’s value. In the clustering
241 analysis, the deepest layer of the TUP and BAR fields was considered to belong to layer 6.
242 Based on the clustering results, we identified groups of fields based on root distribution
243 similarity; for example, fields with a high concentration of roots in the upper layers were
244 separated from fields with more roots in deeper layers.

245 After grouping the fields by root distribution, we analyzed the physical and chemical
246 variables to identify the soil-related factors that could have influenced root distribution by
247 summarizing (mean and standard deviation) soil variables within each cluster and analyzing
248 whether the differences in soil variables between clusters were associated with differences in
249 root distribution.

250

251 3. Results

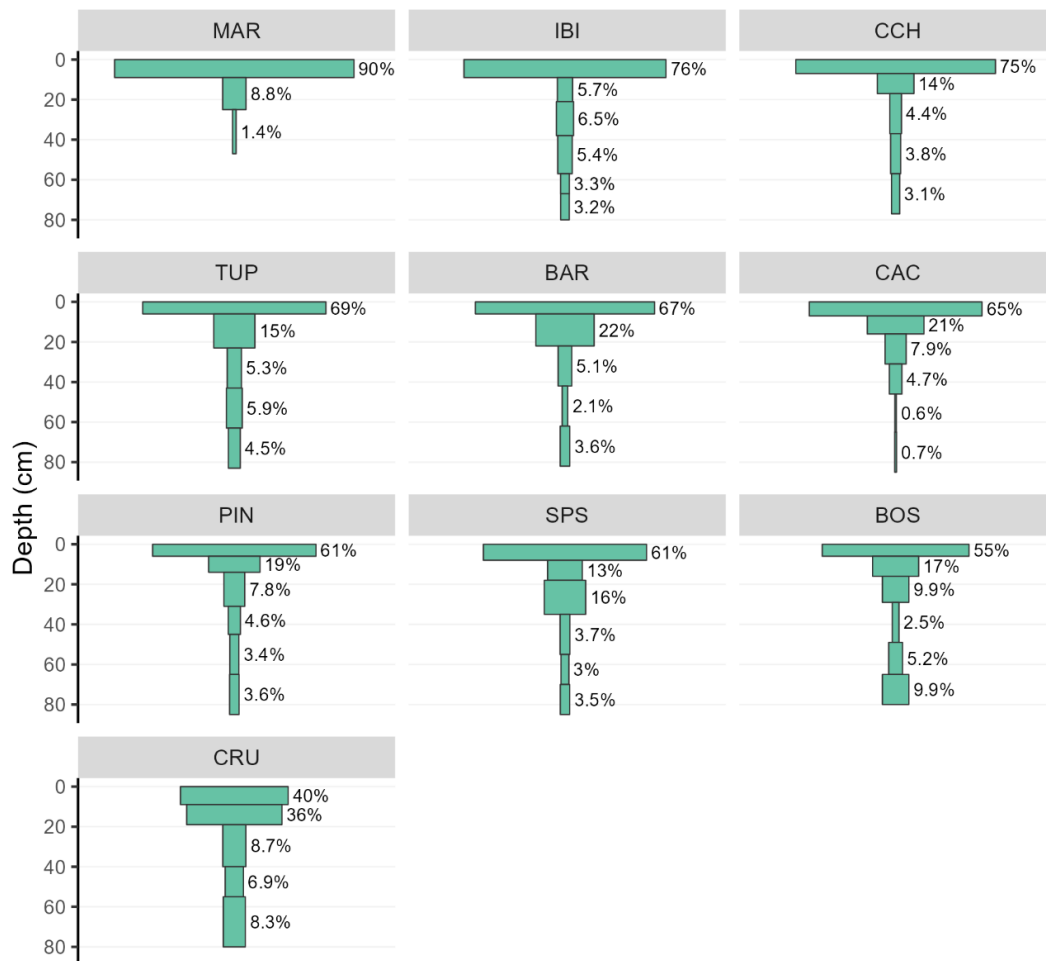
252

253 3.1 Root distribution

254

255 Soybean roots were found throughout the soil profile in all the fields. Except for the
256 MAR field, where the soil profile ended in the bedrock at a depth of 47 cm, the roots in the
257 other fields reached the deepest sampled layer, approximately 80 cm deep. However, the roots
258 were quite concentrated in superficial layers. The sum of RRLD of the two upper layers (0–19.1
259 ± 3.5 cm) ranged from 72,4% to 98,6% (Fig. 2). Roots were even shallower in the MAR and IBI
260 fields, with the RRLD of layer 1 more than ten times greater than that of layer 2. For the BAR,
261 CAC, PIN, and BOS fields, the same relation was approximately three times, indicating a more
262 gradual variation in the RRLD between layers 1 and 2. The CRU field showed the highest
263 concentration of roots in layer 2, with the RRLD being only 4% lower than that in layer 1 (Fig.
264 2).

265 Because of the high concentration of roots in the upper layers, their presence below
266 layer 2 was scarce. Only layer 3 in the SPS field (18–35 cm) exhibited an RRLD of > 15%. The
267 RRLD for the remaining layers ranged from 0.6 to 9.9% (mean 4.9%). Except for the BOS and
268 CRU fields, even when summing the root concentration from all layers deeper than
269 approximately 40 cm, the RRLD was less than 15% (Fig. 2).



270

271 **Fig. 2.** Relative root length density distribution along the soil profile of 10 soybean fields in Rio
 272 Grande do Sul state, Brazil. The plots are arranged from left-to-right and top-to-bottom based on
 273 the decreasing root concentration in the first layer.

274

275 3.2 Field clustering using root distribution

276

277 Hierarchical clustering confirmed the marked difference in root distribution between the
 278 MAR and CRU fields compared to the other fields, as shown in Fig. 2. In other fields where
 279 differences in root distribution were less noticeable, cluster analysis provided a clearer
 280 identification of groups than visual root distribution analysis alone (Fig. 2). We identified four
 281 clusters (Fig. 3) with distinct root distribution.

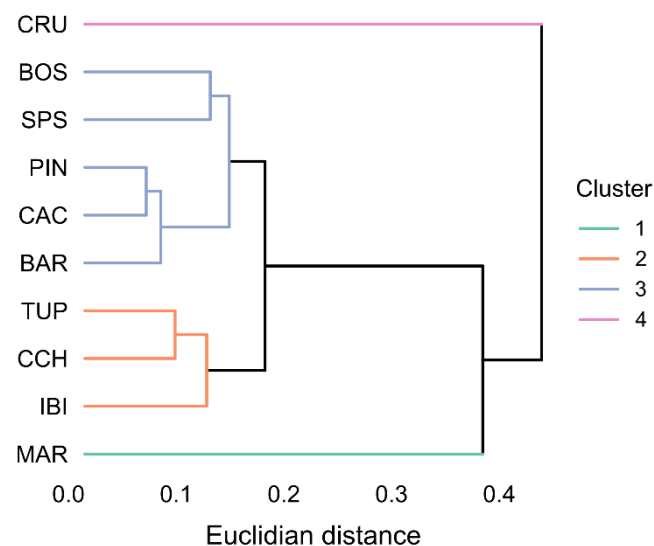
282 - Cluster 1 represents a shallower root distribution and is composed only of the MAR
 283 field.

284 - Cluster 2 represents root distribution highly concentrated in layer 1, with a sharp
 285 decrease in RRLD in layer 2 and similar RRLD in the layers below. Fields IBI, CCH, and TUP
 286 comprised this cluster.

287 - Cluster 3 represents the “standard” root distribution, i.e., greater root concentration in
 288 the upper layer with gradual decrease in RRLD with increasing depth (Fig. 1). The root
 289 distribution in the SPS and BOS fields was slightly different, with a small increase in RRLD
 290 observed with depth (layers 2 to 3 in SPS and layers 3 to 4 and 5 in BOS; Fig. 2), compared to
 291 the BAR, CAC, and PIN fields. However, we maintained these fields within the same cluster.
 292 Increasing the number of groups with a limited number of objects (10 fields) may complicate
 293 the identification of patterns in soil variables related to root growth.

294 - Cluster 4 represents the most homogeneous root distribution, with the lowest root
 295 concentration in the upper layer and the highest root RRLD in layers deeper than ~20 cm. This
 296 cluster was composed of the CRU field.

297



298

299 **Fig. 3.** Hierarchical clustering of fields based on the root distribution

300

301

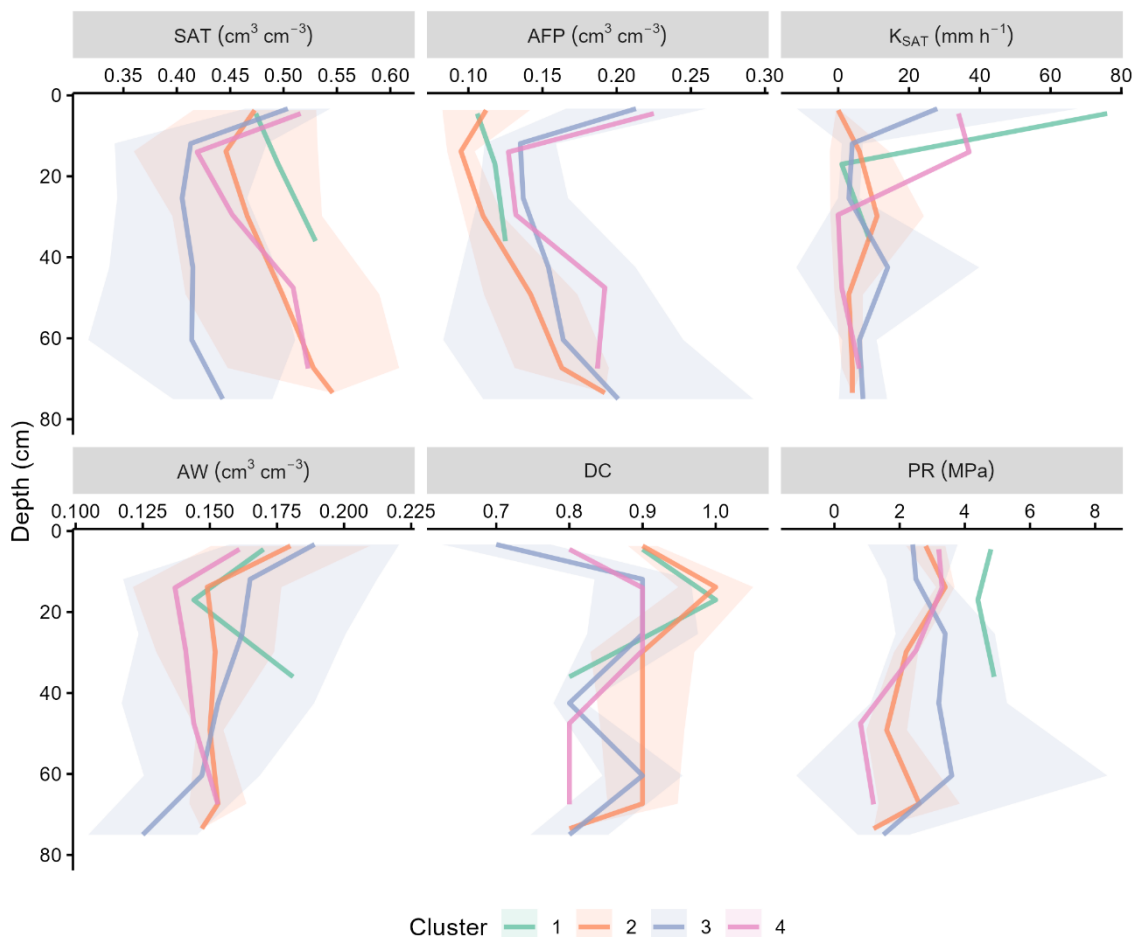
302

303 3.3 Soil physical variables within each root distribution cluster

304

305 Differences in pedogenetic characteristics (different soil classes) and management
 306 practices (tillage systems) were observed in the fields (Table 1), resulting in a wide variation in
 307 soil physical properties (Table A.1 – Supplementary Data Appendix A). In general, this
 308 variability remained high even after clustering the fields according to root distribution. The
 309 standard deviation was higher in the whole profile for SAT, AW, and PR; in deeper layers for
 310 APF and PR; and in the upper and intermediate layers for K_{SAT} (Fig. 4). DC showed the lowest
 311 variability among the clusters.

312



313

314 **Fig. 4.** Mean (lines) and standard deviation (shaded areas) of soil physical variables summarized
 315 within each cluster of root distribution. SAT, water content at saturation; AFP, air-filled porosity
 316 at field capacity; K_{SAT} , saturated hydraulic conductivity; AW, available water; DC, degree of

317 compaction; and PR, penetration resistance. No standard deviation was calculated for clusters 1
318 and 4 because they comprised one field each.

319

320 In layers with lower variability, such as those between 10 and 30 cm depth for K_{SAT} and
321 the upper two layers for PR, the means of the variables overlapped (Fig. 4). Therefore, it was
322 possible to observe coherence between clusters of root distribution and soil physical properties
323 only for AFP and DC. AFP was higher across all layers in clusters 3 and 4 where roots were
324 better distributed than in clusters 1 and 2 (although uncertainty was more pronounced in the
325 deeper layers), and DC was lower in almost all layers (Fig. 4). It was not possible to identify a
326 clear pattern between root distribution and physical properties for the other variables.

327

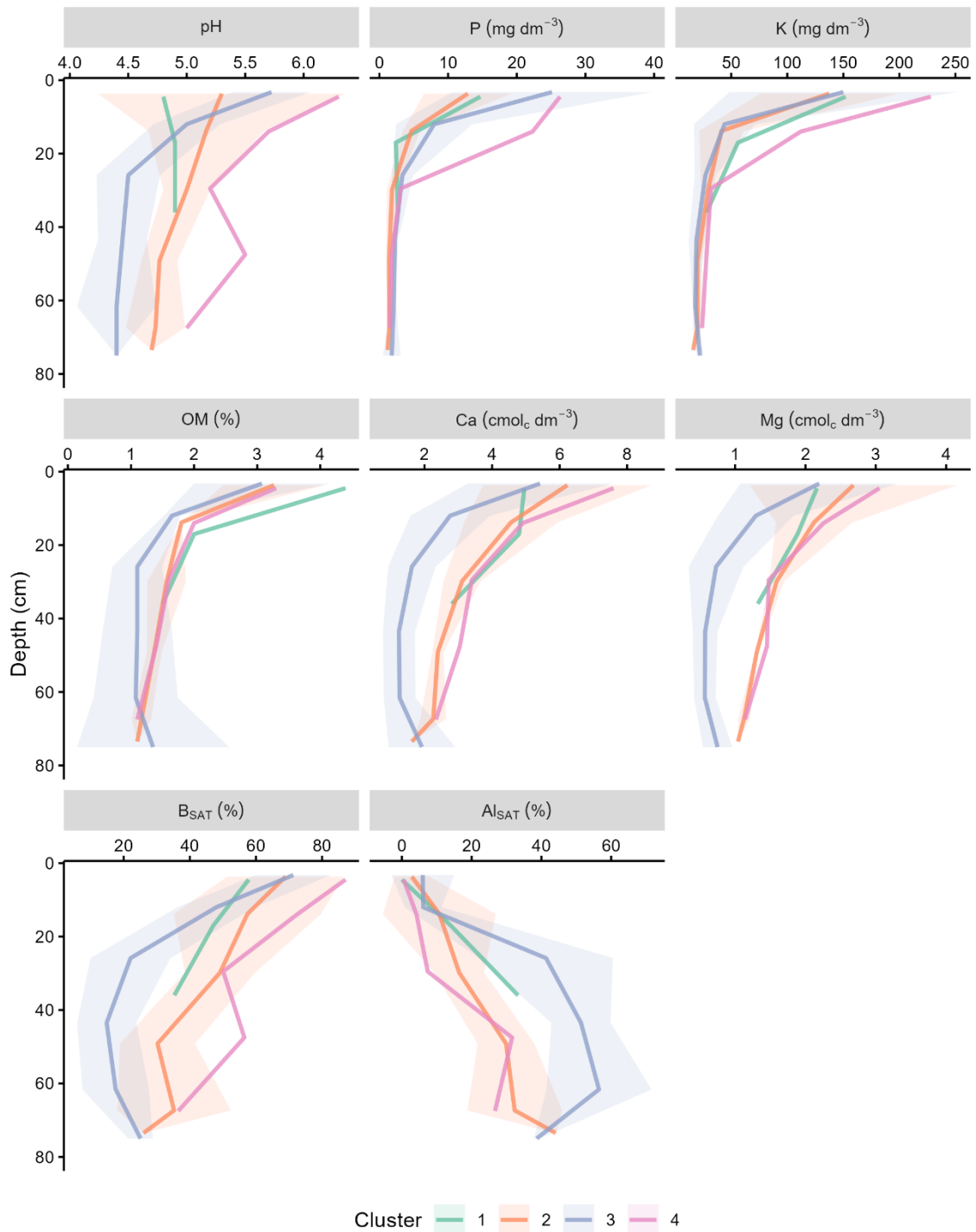
328 3.4 Soil chemical variables within each root distribution cluster

329

330 The same pedogenetic and management differences that led to wide variation in soil
331 physical properties seemed to have resulted in slightly less variability in the chemical properties
332 observed in the fields (Table A.2 – Supplementary Data Appendix A). Lower variability was
333 also observed within the clusters compared to the physical properties (Fig. 5).

334 The standard deviation was higher in all layers for pH, B_{SAT} , and Al_{SAT} ; in deeper layers
335 for OM; and in the upper layers for P, K, Ca, and Mg. However, in the intermediate layers of the
336 soil profile, the differences in the means of pH, B_{SAT} , Al_{SAT} , Ca, and Mg between the clusters
337 were greater than their standard deviations. In contrast, the means of P and K were very close at
338 depths below 15 cm; therefore, it was difficult to notice differences between clusters, even with
339 lower variability. OM showed fewer noticeable differences between clusters. Although the OM
340 content was higher in the upper layer of cluster 1 and lower at a depth of approximately 30 cm
341 in cluster 3, no additional differences were evident (Fig. 5).

342



343

344 **Fig. 5.** Mean (lines) and standard deviation (shaded areas) of soil chemical variables345 summarized within each cluster of root distribution. OM, organic matter; B_{SAT}, bases saturation;346 and Al_{SAT}, aluminum saturation. No standard deviation was calculated for clusters 1 and 4

347 because they comprised one field.

348

349 Overall, the chemical variables of cluster 4 showed higher means for pH and nutrients
350 (P, K, Ca, Mg, and B_{SAT}) and lower values for Al_{SAT}. In contrast, cluster 3 showed higher acidity
351 and fewer nutrients (Ca, Mg, and B_{SAT}) in layers deeper than 20 cm compared to the other
352 clusters (Fig. 5). Except for P and K, cluster 3 showed the most heterogeneous distribution of
353 nutrients and acidity-related properties (pH and Al_{SAT}), with sharp changes in chemical variables
354 with depth (Fig. 5). In most layers, the mean values of the chemical variables for clusters 1 and
355 2 were within the intervals defined by the means of clusters 3 and 4.

356

357 3.5 Soybean yield within each cluster of root distribution

358

359 Soybean yield (\pm standard deviation) of clusters 1, 2, 3, and 4 was 3.19, 3.13 ± 1.61 ,
360 2.76 ± 1.27 , and 4.93 Mg ha^{-1} , respectively. A significant difference in yield was observed only
361 for cluster 4, with a yield at least 54% greater than the yield of the other clusters. The higher
362 standard deviation of yield in clusters 2 and 3 and the proximity of the yield mean among
363 clusters 1, 2, and 3 (a maximum difference of 0.43 Mg ha^{-1}) did not enable us to state that there
364 was a difference in yield between these fields.

365

366 4. Discussion

367

368 4.1 Root distribution of soybean in fields of RS

369

370 Soybean roots were found up to the deeper layers evaluated (~ 80 cm depth, Fig. 2) but
371 were not as deep as some soybean root depths reported in the literature (e.g., 160 cm depth in
372 tropical (Sako et al., 2015) and 180 cm depth in temperate regions (Fan et al., 2016)). However,
373 some farmers were surprised to observe roots at such depths at their fields because they rarely
374 used techniques other than pulling plants to observe their roots. Although root depth indicates
375 the extent of the soil profile reached by the roots, it alone does not provide a comprehensive
376 understanding of root distribution. Thus, when referring to “deeper roots” hereafter, we

377 specifically denote a higher concentration of roots in deeper soil layers, emphasizing not only
378 the longest root extending into the soil profile but a greater proportion of roots at increased
379 depths. This perception is useful for comparing the root distribution between fields sampled at
380 the same depth.

381 The roots of most plant species are concentrated in the upper layers, similar to what was
382 observed in our survey (Fig. 2). Nevertheless, to the best of our knowledge, an abrupt decrease
383 in root concentration from layer 1 to layer 2, such as observe in some soybean fields, has not
384 been reported before. The average reduction in root concentration was approximately 63% over
385 about 9.5 cm (the average distance between the centers of layers 1 and 2) in the MAR, IBI,
386 CCH, TUP, and SPS fields (Fig. 2). A more typical pattern of root distribution, as observed in
387 various studies (Bossolani et al., 2021; Fan et al., 2016; Moraes et al., 2020; Noh et al., 2022;
388 Nunes et al., 2021), exhibited a smoother decrease in root concentration with depth. However, in
389 the fields exhibiting this pattern (BAR, CAC, PIN, and BOS), deeper roots were still limited
390 (less than 25%; Fig. 2). Thus, the superficiality of soybean roots revealed in this survey is
391 probably an important factor related to the greatest yield gap of RS compared to other soybean-
392 producing regions of Brazil (Battisti and Sentelhas, 2017; Minussi Winck et al., 2023; Sentelhas
393 et al., 2015).

394

395 4.2 Management-related factors that affect root distribution

396

397 As previously mentioned, the soybean roots in fields in RS were, in general, highly
398 concentrated in the upper layer. However, cluster analysis (Fig. 3) made it possible to
399 distinguish fields with deeper roots (Fig. 2). The factors driving root growth in clusters 3 and 4
400 differed from those in clusters 1 and 2 to some degree. Identifying these factors is challenging
401 because many variables influence root growth (genetic traits, weather conditions, management
402 practices, and biotic and abiotic stressors). Except for the MAR field, where root depth and
403 distribution were limited by soil profile depth, it was difficult to identify factors related to root
404 distribution in most fields. Clustering fields using root distribution aided in identifying potential

405 soil-related factors affecting the roots (as discussed in the next section). However, caution
406 should be exercised owing to certain management-related confounding factors.

407 Tillage system can influence root distribution by inducing differences in the soil
408 structure (Peixoto et al., 2020) and nutrient gradients (Nunes et al., 2021) in the upper soil
409 layers via the action or absence of tillage operations. This potential effect was not observed in
410 the sampled fields, particularly in cluster 3 (Fig. 3), where tillage differences were present.
411 Fields managed under conventional tillage (BAR and CAC) showed root distributions similar to
412 those managed under no-tillage (PIN, SPS, and BOS) (Table 1). It is likely that tillage
413 operations had a small effect on soil mobilization because farmers reported that they performed
414 only light harrowing or shallow chiseling (up to a depth of 15 cm) on conventionally tilled
415 fields. In addition, the gradient in the physical and chemical properties along the first two layers
416 was similar between fields under conventional and no-tillage management (Table A.1 and A.2 –
417 Supplementary Data Appendix A). Furthermore, differences in soil structure may have vanished
418 because of soil reconsolidation over the four-month period between tillage and soil sampling.

419 In addition to tillage, other management features, such as sowing date and cultivar
420 maturity group (MG), can also affect root distribution (Ferreira et al., 2023). Early sowing or
421 high MG extend the vegetative growth period and result in more time for root growth. However,
422 no effect of these management features was observed. Notably, fields sown on the same date
423 were grouped into different clusters (e.g., BAR in cluster 2 and IBI in cluster 3), and large
424 differences in sowing dates (55 days) were observed, even within the same cluster (BOS and
425 SPS). Moreover, fields sown with cultivars of the lowest (5.0) and highest (6.4) MG belonged to
426 the same cluster, whereas cultivars of the same MG (5.5) were present in clusters 1, 3, and 4
427 (Table 1). Therefore, the random distribution of sowing dates and MG among the clusters may
428 have minimized the potential bias in root distribution resulting from these management features.

429 It was difficult to clearly evaluate the potential differences in root distribution due to
430 cultivar traits, unlike that of tillage, sowing date, and MG. Soybean genotypes differ in root
431 system architecture under the same environmental conditions (Liu et al., 2021), and some
432 soybean cultivars can change their root architecture, proliferating more roots in deeper layers

433 during drought periods and vice versa in wet periods (Franchini et al., 2017; Noh et al., 2022).
434 Specific information regarding the root architecture of cultivars grown in the sampled fields was
435 not found. Nonetheless, we presumed that the presence of different cultivars within the same
436 cluster reduced the bias caused by cultivar root architectural traits.

437 Despite the difficulty in identifying the causes behind the observed root distributions
438 owing to the presence of management-related confounding factors, there is no doubt about the
439 potential influence of physical and chemical stratification along the soil profile on root
440 proliferation in each soil layer (Moraes et al., 2020; Müller et al., 2020; Nunes et al., 2021). The
441 analysis of the noticeable difference in root distribution between the CRU and IBI fields (Fig. 2)
442 supports our assumption that soil-related factors have a more significant impact on root
443 distribution than other management-related factors. Management practices at the CRU and IBI
444 were similar (Table 1), and the differences in root architecture related to water deficit owing to
445 cultivar traits were minimized because both fields were irrigated. Thus, the similarities in
446 management-related factors between the CRU and IBI fields led to the conclusion that, at least
447 for these fields, the differences in root distribution were mostly caused by differences in soil-
448 related factors.

449

450 4.3 Soil-related factors that affect root distribution

451

452 The depth of the profile is a soil-related limitation of root deepening that cannot be
453 altered. Shallow Leptosols (< 1 depth), such as the MAR field, impose permanent root
454 confinement, which restricts the magnitude of yield gap reduction by increasing the root depth.
455 Unfortunately, management practices to reduce the very high concentration of roots in the upper
456 layer of Leptosols (Fig. 2) probably result in little increase in water accessibility for the plant
457 because the entire root system will still access a small soil volume.

458 The physical and chemical variables showed different distribution patterns along the
459 soil profile between the clusters where soil depth did not constrain root growth (Clusters 2, 3,

460 and 4). Although physical and chemical variables may interact with root growth, they were
461 discussed separately to better understand their differences.

462 The physical variables of air-filled porosity at field capacity (AFP) and degree of
463 compaction (DC) showed a clear difference when comparing clusters with deeper roots (clusters
464 3 and 4) to that with shallower roots (cluster 2). The greater AFP and lower DC in clusters 3 and
465 4 and the higher KSAT in the upper layers of cluster 4 (Fig. 4) indicated a greater presence of
466 large pores (diameter > 0.30 mm) in these clusters than in cluster 2. It is reasonable to attribute
467 better root distribution to the presence of large pores because they serve as paths for root growth
468 (Landl et al., 2017) and facilitate root penetration, even in compacted layers (Clark et al., 2003;
469 Zhang et al., 2022).

470 The differences in AFP and DC were more decisive for root distribution than
471 penetration resistance (PR) (Fig. 4). PR is widely used as an indicator of soil mechanical
472 resistance to root growth (Colombi et al., 2018; Silva et al., 1994) because the mechanical
473 impedance faced by roots directly affects their elongation rate (Bengough, 1997). However, the
474 mechanical resistance experienced by roots differs from that measured by penetrometers
475 (Bengough et al., 2011). This difference is probably greater in well-structured soils under long-
476 term no-tillage (Moraes et al., 2014), as was the case for most of the evaluated fields (Table 1).
477 Thus, our results suggested that root proliferation in two soil layers with similar PR may be
478 more pronounced in the layer with a greater presence of large pores.

479 Although the number of large pores and total porosity (represented by water content at
480 saturation [SAT]) are frequently associated, the effect of large pores on root proliferation was
481 much more evident (Fig. 4). Total porosity is usually correlated with macroporosity because
482 changes in total porosity mainly result from changes in larger pores. This correlation is evident
483 when differences in soil structure are caused by tillage system or land use (Moraes et al., 2016;
484 Santos et al., 2021). However, differences in texture also affect total porosity by increasing
485 microporosity in clayey soils compared with coarse-textured soils. A greater total porosity does
486 not necessarily imply greater macroporosity when comparing soils with different textures, as in

487 this study. Thus, indicators of the volume of large pores, such as AFP or macroporosity, are
488 more suitable than total porosity for evaluating predisposition to root growth in a soil layer.

489 As the root distribution in cluster 1 was highly determined by soil depth, chemical
490 variables were also analyzed between clusters 2, 3, and 4. In general, soil acidity (pH) and
491 acidity-influenced variables (B_{SAT} and Al_{SAT}) were the principal chemical distinctions between
492 clusters (Fig. 5). This distinction was even more marked below a depth of 20 cm in cluster 3,
493 with clear differences in pH, B_{SAT} , Al_{SAT} , Ca, and Mg compared to those in clusters 2 and 4. In
494 addition, cluster 3 showed the lowest intra-variation in chemical variables (lower standard
495 deviation) (Fig. 5) despite being a cluster with more fields and higher soil diversity (five fields
496 and three soil classes) (Table 1).

497 The lower variability of acidity-related variables within cluster 3 may be the result of
498 similar management practices adopted by farmers in the transition from conventional to no-
499 tillage. RS soils are naturally acidic, and liming is the main management practice for correcting
500 soil acidity. When farmers migrated to no-tillage system, many stopped turning over the soil
501 without analyzing whether deep soil correction was necessary (Bellinaso et al., 2021). In fields
502 where acidity was not correct before no-tillage implementation, the superficial lime application
503 created a pronounced acidity gradient, such as in cluster 3 (Fig. 5), compared with fields that
504 incorporated lime at the beginning of no-tillage (dos Santos et al., 2018; Miotto et al., 2020).
505 This acidity gradient creates chemical constraints on root proliferation in depth (Bortoluzzi et
506 al., 2014; Bossolani et al., 2021).

507 The best chemical conditions for root growth were observed in cluster 4, with the lowest
508 acidity and highest nutrient concentrations, which were different from those in cluster 3 (Fig. 5).
509 This chemical distinction between clusters 3 and 4 in almost all variables and layers is a
510 reasonable explanation for the differences in root distribution in these clusters. However, the
511 even more noticeable difference in root distribution between clusters 2 and 4 cannot be assigned
512 to the same cause because the chemical distinction between clusters 2 and 4 was less marked.

513 At this point, we combined the analysis of physical and chemical soil-related factors
514 that affect root distribution using cluster 4 as a reference for better root distribution. Cluster 4

515 had a higher volume of large pores, lower acidity, and higher nutrient concentrations than the
516 other clusters. Cluster 3 was physically similar to cluster 4 but chemically worse. Then, the soil
517 of the fields of cluster 3 constrained root growth in depth, mainly because of chemical-related
518 restrictions. In contrast, cluster 2 was more chemically similar to cluster 4 than cluster 3;
519 however, cluster 2 was physically worse than clusters 3 and 4. Thus, the main restrictions on
520 root deepening in cluster 2 were related to physical constraints.

521 This comparative approach for evaluating the soil-related factors that affect root
522 distribution is a promising strategy for determining the main restrictions on soybean root
523 deepening in the field. It is difficult to identify soil-related restrictions on roots from
524 experimental results because most experiments are designed to evaluate the effects of individual
525 factors (e.g., mechanical resistance, porosity, acidity, aluminum toxicity). As shown in our
526 results, roots can be predominantly restricted by physical factors in some fields or by chemicals
527 in others, and this differentiation cannot be detected in experiments that evaluate only one factor
528 (physical or chemical). Thus, comparing fields with distinct root distributions can help farmers
529 apply precise management practices to minimize specific soil-related factors that constrain root
530 growth in their fields.

531

532 4.4 Root distribution and soybean yield

533

534 The deeper roots associated with irrigation (i.e., the absence of water deficit) resulted in
535 the highest observed yield in the CRU field. However, complementary irrigation in the IBI field
536 resulted in a lower yield than that in the other rainfed fields (Table 1). A hypothesis for the
537 different yields is that irrigation scheduling may have been underestimated in the IBI field by
538 considering the roots in the irrigation project to be deeper than the observed roots (Fig. 2). Thus,
539 shallower roots can prevent a reduction in the yield gap due to water deficit, even when soybean
540 are cropped under irrigation.

541 The great variability in yield within clusters 2 and 3 and the absence of discernible
542 effect of root distribution on yield among clusters 1, 2, and 3 highlight the importance of

543 cumulative rainfall and its distribution on soybean yield. Lower cumulative rainfall over a crop
544 season limits soybean yield. However, an irregular distribution can cause larger yield gaps even
545 when rainfall is abundant (Minussi Winck et al., 2023; Zanon et al., 2016). The spring/summer
546 season of 2021/22 occurred under La Niña meteorological conditions in RS, implying a
547 temporally and spatially irregular rainfall distribution. Unfortunately, accurate rainfall data were
548 unavailable for all the fields to evaluate the relationship between yield, root distribution, and
549 rainfall pattern. However, consistent evidence indicates that deeper roots minimize the yield gap
550 in soybean (Battisti and Sentelhas, 2017). Furthermore, the apparent absence of benefits in yield
551 observed solely in one season may obscure the advantage of deeper roots in the long term
552 (Mulazzani et al., 2022).

553

554 **5. Conclusion**

555

556 In general, the survey revealed that soybean roots in the fields of southern Brazil were
557 quite shallow, with 72–98% of the roots concentrated within the layer 0–20 cm and less than
558 15% of roots deeper than 40 cm in most fields. Based on a detailed analysis of the differences in
559 root distribution between fields, we identified soil-related factors that prevent deeper root
560 growth. The limited soil profile caused the highest root concentration close to the soil surface.
561 This was observed in the field, where the soil profile ended at the bedrock at a depth of 47 cm.
562 Where the soil profiles were deeper than their sampled portion (~80 cm), root deepening was
563 limited by physical constraints in 33% of the fields and chemical constraints in 55%. Soil layers
564 with a lower presence of large pores and a high gradient of acidity-related variables along the
565 soil profile were the soil-related factors that are likely to be limiting soybean roots from
566 reaching deeper layers in fields of southern Brazil.

567

568 **Acknowledgements**

569

570 We thank the farmers who made their fields available for this study. In addition, all
571 members of the FieldCrops Team (Department of Crop Science) and the Laboratory of Soil
572 Physics (Department of Soil Science) at UFSM provided operational support.

573

574 **Funding**

575

576 This work was funded by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível
577 Superior – CAPES (BR) (Finance Code 001) and Conselho Nacional de Desenvolvimento
578 Científico e Tecnológico – CNPq (BR) (grant number: 142326/2018-6).

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

593

594

595

596

597

Table A.1. Soil physical variables of each layer in the fields of soybean sampled for root distribution survey in Rio Grande do Sul state, Brazil. Sand, Silt and Clay – particle size fractions (g g^{-1}); K_{SAT} – saturated hydraulic conductivity (mm h^{-1}); SAT – water content at saturation ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); FC – field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); PWP – permanent wilting point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); AW – available water ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); BD – bulk density (g cm^{-3}); DC – degree of compaction (dimensionless); PR – penetration resistance (MPa); and AFP – air-filling porosity at field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Field	Local	Layer	Depth	Sand	Silt	Clay	K_{SAT}	SAT	FC	PWP	AW	BD	DC	PR	AFP
BAR	Barra do Ribeiro	1	0–6	0.52	0.35	0.12	20.5	0.514	0.308	0.080	0.228	1.26	0.66	2.4	0.206
		2	6–22	0.56	0.32	0.13	0.7	0.368	0.224	0.064	0.16	1.59	0.84	2.2	0.144
		3	22–42	0.57	0.31	0.12	0.4	0.384	0.242	0.053	0.189	1.56	0.82	3.3	0.142
		4	42–62	0.53	0.34	0.13	0.1	0.354	0.242	0.065	0.177	1.63	0.86	6.1	0.112
		5	62–82	0.49	0.37	0.14	0.0	0.288	0.232	0.082	0.15	1.78	0.94	12.0	0.056
BOS	Bossoroca	1	0–6	0.12	0.29	0.59	0.8	0.568	0.425	0.256	0.169	1.28	0.86	3.1	0.143
		2	6–16	0.12	0.26	0.62	0.4	0.531	0.432	0.281	0.151	1.43	0.98	2.7	0.099
		3	16–29	0.15	0.18	0.68	2.0	0.505	0.407	0.253	0.154	1.40	1.00	3.2	0.098
		4	29–49	0.05	0.33	0.62	1.8	0.552	0.447	0.251	0.196	1.24	0.85	2.1	0.105
		5	49–65	0.08	0.32	0.6	8.5	0.557	0.394	0.231	0.163	1.21	0.82	2.5	0.163
		6	65–80	0.07	0.40	0.52	2.7	0.501	0.376	0.235	0.141	1.32	0.85	2.2	0.125
CAC	Cacequi	1	0–7	0.80	0.12	0.08	11.2	0.468	0.255	0.039	0.216	1.45	0.75	1.2	0.213
		2	7–16	0.81	0.13	0.06	4.4	0.424	0.295	0.049	0.246	1.59	0.81	2.2	0.129
		3	16–31	0.84	0.09	0.07	1.6	0.375	0.261	0.053	0.208	1.64	0.84	2.2	0.114
		4	31–46	0.86	0.07	0.07	8.4	0.399	0.18	0.029	0.151	1.62	0.83	1.4	0.219
		5	46–65	0.92	0.05	0.03	7.8	0.426	0.156	0.011	0.145	1.64	0.83	0.8	0.270
		6	65–85	0.93	0.05	0.02	9.2	0.392	0.113	0.005	0.108	1.71	0.86	1.0	0.279
CCH	Cachoeira do Sul	1	0–7	0.49	0.30	0.22	1.0	0.407	0.313	0.114	0.199	1.54	0.85	2.8	0.094
		2	7–17	0.44	0.29	0.27	0.4	0.373	0.289	0.143	0.146	1.65	0.93	3.2	0.084
		3	17–37	0.44	0.29	0.27	25.7	0.397	0.299	0.122	0.177	1.52	0.86	2.5	0.098
		4	37–57	0.39	0.30	0.31	1.2	0.405	0.298	0.153	0.145	1.50	0.86	2.2	0.107
		5	57–77	0.38	0.22	0.4	1.4	0.442	0.315	0.170	0.145	1.48	0.89	1.8	0.127
CRU	Cruz Alta	1	0–9	0.59	0.12	0.29	33.6	0.516	0.291	0.130	0.161	1.35	0.77	3.2	0.225
		2	9–19	0.54	0.12	0.34	36.9	0.419	0.292	0.155	0.137	1.54	0.90	3.3	0.127
		3	19–40	0.49	0.10	0.41	0.5	0.452	0.32	0.179	0.141	1.43	0.87	2.5	0.132
		4	40–55	0.45	0.10	0.45	1.1	0.509	0.317	0.173	0.144	1.27	0.79	0.8	0.192
		5	55–80	0.43	0.09	0.48	6.5	0.523	0.336	0.183	0.153	1.28	0.81	1.2	0.187

Field	Local	Layer	Depth	Sand	Silt	Clay	K _{SAT}	SAT	FC	PWP	AW	BD	DC	PR	AFP
IBI	Ibirubá	1	0–9	0.42	0.20	0.38	0.5	0.503	0.357	0.162	0.195	1.39	0.83	2.2	0.146
		2	9–21	0.42	0.14	0.44	1.5	0.424	0.324	0.201	0.123	1.59	0.98	3.7	0.100
		3	21–38	0.39	0.11	0.5	1.8	0.464	0.340	0.197	0.143	1.39	0.89	1.8	0.124
		4	38–57	0.40	0.08	0.52	8.1	0.506	0.339	0.188	0.151	1.28	0.83	1.0	0.167
		5	57–67	0.30	0.10	0.6	7.0	0.540	0.355	0.206	0.149	1.21	0.82	4.0	0.185
		6	67–80	0.29	0.07	0.64	3.7	0.546	0.354	0.207	0.147	1.17	0.81	1.2	0.192
MAR	Marau	1	0–9	0.17	0.35	0.48	75.8	0.474	0.368	0.198	0.170	1.37	0.87	4.8	0.106
		2	9–25	0.15	0.32	0.53	1.3	0.495	0.377	0.233	0.144	1.47	0.96	4.4	0.118
		3	25–47	0.22	0.31	0.47	9.5	0.530	0.405	0.224	0.181	1.26	0.79	4.9	0.125
PIN	Pinhal Grande	1	0–6	0.72	0.09	0.19	11.7	0.486	0.259	0.085	0.174	1.37	0.74	4.3	0.227
		2	6–14	0.70	0.08	0.22	6.8	0.385	0.244	0.104	0.140	1.57	0.86	4.0	0.141
		3	14–31	0.69	0.07	0.24	7.4	0.413	0.248	0.097	0.151	1.47	0.82	2.2	0.165
		4	31–45	0.65	0.08	0.28	1.3	0.383	0.265	0.126	0.139	1.52	0.86	4.8	0.118
		5	45–65	0.62	0.07	0.31	0.7	0.415	0.289	0.125	0.164	1.50	0.86	1.5	0.126
		6	65–85	0.57	0.09	0.34	0.7	0.424	0.305	0.161	0.144	1.50	0.88	2.2	0.119
SPS	São Pedro do Sul	1	0–8	0.78	0.10	0.11	98.2	0.482	0.208	0.052	0.156	1.38	0.72	1.0	0.274
		2	8–18	0.74	0.13	0.13	5.9	0.355	0.191	0.065	0.126	1.63	0.86	1.6	0.164
		3	18–35	0.76	0.13	0.12	5.2	0.347	0.182	0.074	0.108	1.65	0.87	5.9	0.165
		4	35–55	0.73	0.13	0.13	60.1	0.389	0.171	0.068	0.103	1.54	0.81	1.8	0.218
		5	55–70	0.73	0.12	0.15	10.6	0.382	0.176	0.065	0.111	1.52	0.81	1.1	0.206
		6	70–85	0.72	0.12	0.16	15.7	0.455	0.175	0.068	0.107	1.42	0.76	0.7	0.280
TUP	Tuparendi	1	0–6	0.10	0.50	0.40	0.3	0.510	0.414	0.268	0.146	1.44	0.87	3.4	0.096
		2	6–23	0.07	0.24	0.69	1.4	0.541	0.441	0.263	0.178	1.44	1.03	3.3	0.100
		3	23–43	0.06	0.19	0.75	4.2	0.537	0.428	0.292	0.136	1.33	0.99	2.3	0.109
		4	43–63	0.06	0.18	0.76	1.1	0.586	0.433	0.278	0.155	1.25	0.94	1.6	0.153
		5	63–83	0.06	0.14	0.81	2.5	0.601	0.423	0.258	0.165	1.17	0.91	1.9	0.178
Maximum				0.93	0.50	0.81	98.2	0.601	0.447	0.292	0.246	1.78	1.03	12.0	0.280
Minimum				0.05	0.05	0.02	0.01	0.288	0.113	0.005	0.103	1.17	0.66	0.7	0.056
Mean				0.46	0.19	0.35	10.0	0.457	0.304	0.148	0.157	1.45	0.86	2.8	0.153
Median				0.49	0.13	0.31	2.7	0.455	0.305	0.153	0.151	1.45	0.86	2.2	0.141
Standard deviation				0.26	0.11	0.22	18.9	0.072	0.086	0.081	0.030	0.15	0.07	1.8	0.054

Table A.2. Soil chemical variables of each layer in the fields of soybean sampled for root distribution survey in Rio Grande do Sul state, Brazil. P e K in mg dm⁻³; OM – organic matter (%); Al, Ca, Mg and H+Al in cmol_c dm⁻³; CEC – cation exchange capacity at natural pH (cmol_c dm⁻³); CEC_{pH7} – cation exchange capacity at pH 7.0 (cmol_c dm⁻³); B_{SAT} – bases saturation (%); and Al_{SAT} – aluminum saturation (%). nd – not determined.

Field	Local	Layer	Depth	pH	P	K	OM	Al	Ca	Mg	H+Al	CEC	CEC _{pH7}	B _{SAT}	Al _{SAT}
BAR	Barra do Ribeiro	1	0–6	5.4	20.6	56	3.5	0.28	5.1	1.5	3.5	7.1	10.3	65.7	3.9
		2	6–22	5.2	5.9	24	1.5	0.35	2.8	1.1	3.9	4.3	7.9	50.1	8.1
		3	22–42	4.6	2.6	20	0.6	1.21	1.3	0.5	12.3	3.0	14.1	12.5	40.3
		4	42–62	4.7	1.8	12	0.5	1.5	0.9	0.5	12.3	3.0	13.8	10.7	50.0
		5	62–82	4.9	2.4	16	0.5	1.15	1.1	0.7	4.9	3.0	6.8	27.8	38.3
BOS	Bossoroca	1	0–6	5.9	6.7	160	4.3	0.00	8.0	3.8	2.8	12.1	14.9	81.4	0.0
		2	6–16	5.2	2.1	36	1.7	0.28	4.4	2.1	4.4	6.9	11.0	59.8	4.1
		3	16–29	4.6	2.0	20	1.5	1.51	2.6	1.2	7.7	5.4	11.6	33.4	28.0
		4	29–49	4.4	2.0	20	1.7	2.48	1.9	0.8	17.3	5.2	20.1	13.8	47.7
		5	49–65	4.2	2.0	20	2.0	3.23	2.0	0.7	17.3	5.9	20.0	13.5	54.7
		6	65–80	4.4	0.9	24	2.2	2.31	2.6	0.9	12.3	5.9	15.9	22.5	39.2
CAC	Cacequi	1	0–7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		2	7–16	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		3	16–31	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		4	31–46	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		5	46–65	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		6	65–85	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
CCH	Cachoeira do Sul	1	0–7	4.5	6.2	100	2.5	0.00	4.7	2.0	4.9	7.0	11.9	58.4	0.0
		2	7–17	4.6	3.9	28	1.8	2.02	3.0	1.8	9.7	6.9	14.6	33.5	29.3
		3	17–37	4.8	1.8	36	1.3	1.25	2.8	1.6	6.2	5.8	10.7	42.1	21.6
		4	37–57	4.6	1.1	24	1.3	2.18	2.3	1.3	15.4	5.9	19.1	19.3	36.9
		5	57–77	4.5	1.5	24	1.2	2.47	2.5	1.1	15.4	6.1	19.0	19.2	40.5
CRU	Cruz Alta	1	0–9	6.3	26.3	228	3.3	0.06	7.6	3.1	1.7	11.3	12.9	87.1	0.5
		2	9–19	5.7	22.3	112	2.0	0.33	4.9	2.3	2.8	7.8	10.3	72.4	4.2
		3	19–40	5.2	3.1	32	1.6	0.39	3.4	1.5	4.9	5.3	9.9	50.1	7.4
		4	40–55	5.5	1.8	28	1.4	2.12	3.0	1.5	3.5	6.7	8.1	56.5	31.6
		5	55–80	5.0	1.5	24	1.1	1.28	2.3	1.1	6.2	4.8	9.7	36.5	26.7

Field	Local	Layer	Depth	pH	P	K	OM	Al	Ca	Mg	H+Al	CTC _{EF}	CTC _{pH7}	BSAT	Al _{SAT}	
IBI	Ibirubá	1	0–9	4.9	18.8	208	4.1	0.00	4.9	1.7	4.9	7.1	12.0	59.2	0.0	
		2	9–21	5.4	4.0	64	1.8	0.21	5.0	1.8	4.4	7.2	11.3	61.4	2.9	
		3	21–38	5.2	2.6	28	1.9	0.50	3.7	1.7	3.5	6.0	9.0	61.3	8.3	
		4	38–57	4.8	1.9	20	1.5	1.68	2.3	1.3	8.7	5.3	12.3	29.5	31.7	
		5	57–67	4.7	1.6	20	1.3	2.03	1.8	1.2	6.2	5.1	9.3	33.2	39.8	
		6	67–80	4.7	1.2	16	1.1	2.16	1.6	1.0	7.7	4.9	10.4	26.0	44.1	
MAR	Marau	1	0–9	4.8	14.7	152	4.4	0.00	5.0	2.2	5.5	7.5	13.0	57.8	0.0	
		2	9–25	4.9	2.4	56	2.0	1.12	4.8	1.9	7.7	8.0	14.5	47.1	14.0	
		3	25–47	4.9	2.7	28	1.5	2.10	2.8	1.3	7.7	6.3	11.9	35.3	33.3	
PIN	Pinhal Grande	1	0–6	6.1	35.1	288	2.7	0.07	5.8	2.2	2.2	8.9	11.0	80.0	0.8	
		2	6–14	4.6	15.2	84	1.6	0.45	2.0	1.0	6.9	3.7	10.2	31.9	12.2	
		3	14–31	4.1	3.3	40	1.3	3.23	1.0	0.4	12.3	4.7	13.8	10.9	68.7	
		4	31–45	4.2	2.3	28	1.4	2.35	0.9	0.4	17.3	3.7	18.7	7.3	63.5	
		5	45–65	4.3	1.6	20	1.1	4.12	4.9	1.7	24.4	5.5	25.8	5.5	74.9	
		6	65–85	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	Nd	Nd	Nd	
SPS	São Pedro do Sul	1	0–8	5.5	38.1	96	1.8	1.02	1.0	0.4	3.1	5.3	7.4	58.1	19.2	
		2	8–18	5.0	8.7	32	1.8	0.00	2.8	1.3	2.8	2.9	5.7	50.4	0.0	
		3	18–35	4.7	5.5	28	1.0	1.02	1.8	1.0	5.5	3.6	8.1	31.5	28.3	
		4	35–55	4.5	2.9	16	0.8	1.46	1.6	0.8	4.9	3.3	6.7	27.6	44.2	
		5	55–70	4.2	2.3	16	0.7	2.15	1.2	0.6	4.9	3.7	6.4	23.5	58.1	
		6	70–85	4.4	2.7	20	0.5	1.18	1.0	0.5	4.9	3.1	6.8	27.7	38.1	
TUP	Tuparendi	1	0–6	6.5	13.6	104	3.2	1.27	1.2	0.6	1.7	15.0	15.4	89.2	8.5	
		2	6–23	5.5	6.1	32	1.8	0.00	9.1	4.4	2.5	8.5	11.0	77.4	0.0	
		3	23–43	5.0	1.1	24	1.5	1.05	5.7	2.7	5.5	5.4	9.8	44.0	19.4	
		4	43–63	4.9	1.2	16	1.3	1.05	2.8	1.5	5.5	5.0	9.4	41.9	21.0	
		5	63–83	5.0	1.2	16	1.0	0.72	2.6	1.3	3.1	4.3	6.7	53.3	16.7	
				Maximum	6.5	38.1	288	4.4	4.12	9.1	4.4	24.4	15.0	25.8	89.2	74.9
				Minimum	4.1	0.9	12	0.5	0.00	0.9	0.4	1.7	2.9	5.7	5.5	0.0
				Mean	4.9	6.7	54	1.8	1.25	3.1	1.4	7.2	5.9	11.9	42.1	25.2
				Median	4.9	2.6	28	1.5	1.17	2.6	1.3	5.5	5.5	11.0	39.2	24.2
				Standard deviation	0.6	9.0	62	1.0	1.01	2.0	0.8	5.1	2.4	4.3	22.6	20.9

613 **References**

614

615 ANA (Ed.), 2021. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada, 2nd ed. Ana, Brasília, DF.

616 Arsego, D.A., Ferraz, S.E.T., Streck, N.A., Cardoso, A. de O., Zanon, A.J., 2019. Climatic
617 indicators and soybean yield in Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*
618 34, 191–200. <https://doi.org/10.1590/0102-77863340024>

619 Arsenault, J.-L., Poulcur, S., Messier, C., Guay, R., 1995. WinRHIZO™, a Root-measuring
620 System with a Unique Overlap Correction Method. *HortSci* 30, 906D – 906.
621 <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.4.906D>

622 Battisti, R., Sentelhas, P.C., 2017. Improvement of soybean resilience to drought through deep
623 root system in Brazil. *Agronomy Journal* 109, 1612–1622.
624 <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0023>

625 Bellinaso, R.J.S., Tiecher, T., Vargas, J.P.R. de, Rheinheimer, D.S., Bruun, S., 2021. Crop yields
626 in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in
627 depth. *Soil Res.* 60, 33–49. <https://doi.org/10.1071/SR21021>

628 Bengough, A.G., 1997. Modelling rooting depth and soil strength in a drying soil profile.
629 *Journal of Theoretical Biology* 186, 327–338. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1996.0367>

630 Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A., 2011. Root elongation, water
631 stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip
632 traits. *Journal of Experimental Botany* 62, 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>

633 Berlato, M.A., Fontana, D.C., 1999. Interannual variability of rainfall and soybean yields in the
634 State of Rio Grande do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 7, 119–125.

635 Böhm, W., 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin,
636 Heidelberg.

637 Bortoluzzi, E.C., Parize, G.L., Korchagin, J., Silva, V.R. da, Rheinheimer, D. dos S., Kaminski,
638 J., 2014. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a
639 no-tillage system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 262–271.
640 <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100026>

- 641 Bossolani, J.W., Crusciol, C.A.C., Portugal, J.R., Moretti, L.G., Garcia, A., Rodrigues, V.A., Da
642 Fonseca, M.D.C., Bernart, L., Vilela, R.G., Mendonça, L.P., Dos Reis, A.R., 2021.
643 Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting
644 improvements in leaf gas exchange and grain yield. *European Journal of Agronomy*
645 128, 126308. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126308>
- 646 Colombi, T., Torres, L.C., Walter, A., Keller, T., 2018. Feedbacks between soil penetration
647 resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth
648 – A vicious circle. *Science of the Total Environment* 626, 1026–1035.
649 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>
- 650 CONAB, 2023. Série histórica das safras. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, DF.
- 651 Costa, C., Dwyer, L.M., Hamilton, R.I., Hamel, C., Nantais, L., Smith, D.L., 2000. A sampling
652 method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis.
653 *Agronomy Journal* 92, 621–627. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.924621x>
- 654 CQFS/NRS-SBCS, 2016. Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul
655 e Santa Catarina. Comissão de Química e Fertilidade do Solo, Núcleo Regional Sul -
656 Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Porto Alegre, RS.
- 657 dos Santos, D.R., Tiecher, T., Gonzatto, R., Santanna, M.A., Brunetto, G., da Silva, L.S., 2018.
658 Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural
659 grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol
660 from South Brazilian Campos. *Soil and Tillage Research* 180, 222–231.
661 <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.014>
- 662 Fan, J., McConkey, B., Wang, H., Janzen, H., 2016. Root distribution by depth for temperate
663 agricultural crops. *Field Crops Research* 189, 68–74.
664 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013>
- 665 FAO, 2021. FAOSTAT - Food and Agriculture Data. Food and Agriculture Organization of the
666 United Nations, Rome.
- 667 Faye, A., Sine, B., Chopart, J.-L., Grondin, A., Lucas, M., Diedhiou, A.G., Gantet, P., Cournac,
668 L., Min, D., Audebert, A., Kane, A., Laplaze, L., 2019. Development of a model

- 669 estimating root length density from root impacts on a soil profile in pearl millet
670 (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br). Application to measure root system response to water
671 stress in field conditions. PLOS ONE 14, e0214182.
672 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214182>
- 673 Fehr, W.R., Caviness, C.E., 1977. Stages of Soybean Development, Special report.
- 674 Ferreira, C.J.B., Silva, A.G. da, Tormena, C.A., Severiano, E. da C., Tavares, R.L.M., Braz,
675 G.B.P., Paiva Filho, S.V. de, 2023. Physiological and agronomic response of soybean
676 cultivars to soil compaction in the Brazilian Cerrado. *Bragantia* 82, e20220160.
677 <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20220160>
- 678 Franchini, J.C., Balbinot Junior, A.A., Debiasi, H., Nepomuceno, A.L., 2017. Root growth of
679 soybean cultivars under different water availability conditions. *SCA* 38, 715.
680 <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n2p715>
- 681 Gardner, W.R., 1964. Relation of Root Distribution to Water Uptake and Availability1.
682 *Agronomy Journal* 56, 41–45.
683 <https://doi.org/10.2134/agronj1964.00021962005600010013x>
- 684 Gubiani, P.I., Reichert, J.M., Campbell, C., Reinert, D.J., Gelain, N.S., 2012. Assessing Errors
685 and Accuracy in Dew-Point Potentiometer and Pressure Plate Extractor Measurements.
686 *Soil Science Society of America Journal* 77, 19–24.
687 <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0024>
- 688 Hu, W., Drewry, J., Beare, M., Eger, A., Müller, K., 2021. Compaction induced soil structural
689 degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New
690 Zealand case study. *Geoderma* 395, 115035.
691 <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115035>
- 692 IUSS Working Group WRB, 2015. World reference base for soil resources 2014. International
693 soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.
- 694 Kaminski, J., Rheinheimer, D. dos S., Bartz, H.R., Gatiboni, L.C., Bissani, C.A., Escosteguy,
695 P.A.V., 2001. Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso
696 do índice SMP em solos do RS e de SC.

- 697 Liu, S., Begum, N., An, T., Zhao, T., Xu, B., Zhang, S., Deng, X., Lam, H.-M., Nguyen, H.T.,
698 Siddique, K.H.M., Chen, Y., 2021. Characterization of Root System Architecture Traits
699 in Diverse Soybean Genotypes Using a Semi-Hydroponic System. *Plants* 10, 2781.
700 <https://doi.org/10.3390/plants10122781>
- 701 Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K., 2022. *cluster: Cluster Analysis*
702 *Basics and Extensions*.
- 703 Marcolin, C.D., Klein, V.A., 2011. Determination of relative soil density through a pedotransfer
704 function of maximum bulk density. *Acta Scientiarum. Agronomy* 33, 349–354.
705 <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120>
- 706 Meng, C., Tian, D., Zeng, H., Li, Z., Yi, C., Niu, S., 2019. Global soil acidification impacts on
707 belowground processes. *Environ. Res. Lett.* 14, 074003. [https://doi.org/10.1088/1748-](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab239c)
708 [9326/ab239c](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab239c)
- 709 Minussi Winck, J.E., Tagliapietra, E.L., Schneider, R.A., Inklman, V.B., Nora, M.D.,
710 Savegnago, C., Paula, L.S., Da Silva, M.R., Zanon, A.J., Streck, N.A., 2023.
711 Decomposition of yield gap of soybean in environment \times genetics \times management in
712 Southern Brazil. *European Journal of Agronomy* 145, 126795.
713 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126795>
- 714 Miotto, A., Tiecher, T., Kaminski, J., Brunetto, G., De Conti, L., Tiecher, T.L., Martins, A.P.,
715 Rheinheimer dos Santos, D., 2020. Soil acidity and aluminum speciation affected by
716 liming in the conversion of a natural pasture from the Brazilian Campos Biome into no-
717 tillage system for grain production. *Archives of Agronomy and Soil Science* 66, 138–
718 151. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1605164>
- 719 Moraes, M.T. de, Debiasi, H., Carlesso, R., Cezar Franchini, J., Rodrigues da Silva, V., Bonini
720 da Luz, F., 2016. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades
721 in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research* 155, 351–362.
722 <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.015>

- 723 Moraes, M.T. de, Debiassi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., Silva, V.R. da, 2014. Critical limits
724 of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência do*
725 *Solo* 38, 288–298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- 726 Moraes, M.T. de, Debiassi, H., Franchini, J.C., Mastroberti, A.A., Levien, R., Leitner, D.,
727 Schnepf, A., 2020. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from
728 subtropical Brazil. *Soil and Tillage Research* 200, 104611.
729 <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>
- 730 Mulazzani, R.P., Gubiani, P.I., Zanon, A.J., Drescher, M.S., Schenato, R.B., Girardello, V.C.,
731 2022. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-
732 DSSAT. *Agricultural Systems* 203, 103523. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103523>
- 733 Müller, M., Schneider, J.R., Klein, V.A., da Silva Júnior, J.P., Chavarria, G., 2020. Root growth
734 and crop performance of soybean under chemical, physical, and biological changes after
735 subsoiling. *Agronomy Journal* 112, 932–947. <https://doi.org/10.1002/agj2.20090>
- 736 Murphy, J., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of
737 phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31–36.
738 [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- 739 Noh, E., Fallen, B., Payero, J., Narayanan, S., 2022. Parsimonious root systems and better root
740 distribution can improve biomass production and yield of soybean. *PLOS ONE* 17,
741 e0270109. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270109>
- 742 Nunes, R. de S., Sousa, D.M.G. de, Goedert, W.J., de Oliveira, L.E.Z., Pinheiro, T.D., 2021.
743 Crops' Yield and Roots Response to Soil Phosphorus Distribution Resulting From
744 Long-Term Soil and Phosphate Fertilization Management Strategies. *Frontiers in*
745 *Agronomy* 3.
- 746 Peixoto, D.S., Silva, L. de C.M. da, Melo, L.B.B. de, Azevedo, R.P., Araújo, B.C.L., Carvalho,
747 T.S. de, Moreira, S.G., Curi, N., Silva, B.M., 2020. Occasional tillage in no-tillage
748 systems: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment* 745, 140887.
749 <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140887>

- 750 Poschenrieder, C., Gunsé, B., Corrales, I., Barceló, J., 2008. A glance into aluminum toxicity
751 and resistance in plants. *Science of The Total Environment* 400, 356–368.
752 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.003>
- 753 Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2006. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo:
754 protótipos e teste. *Ciência Rural* 36, 1931–1935. [https://doi.org/10.1590/s0103-](https://doi.org/10.1590/s0103-84782006000600044)
755 [84782006000600044](https://doi.org/10.1590/s0103-84782006000600044)
- 756 Sako, H., Soares, J.E., Silva, L.A. da, Balardin, R., 2015. Relações de enraizamento e cálcio no
757 solo para alta produtividade da safra 15/16, *Boletim Técnico CESB*.
- 758 Santos, H.G. dos, Jacomini, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V.Á.D., Lumbreras, J.F.,
759 Coelho, M.R., Almeida, J.A.D., Cunha, T.J.F., Oliveira, J.B., 2018. Sistema Brasileiro
760 de Classificação de Solos. EMBRAPA, Brasília, DF.
- 761 Santos, R.S., Wiesmeier, M., Cherubin, M.R., Oliveira, D.M.S., Locatelli, J.L., Holzschuh, M.,
762 Cerri, C.E.P., 2021. Consequences of land-use change in Brazil’s new agricultural
763 frontier: A soil physical health assessment. *Geoderma* 400, 115149.
764 <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149>
- 765 Sentelhas, P.C., Battisti, R., Câmara, G.M.S., Farias, J.R.B., Hampf, A.C., Nendel, C., 2015. The
766 soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable
767 production. *The Journal of Agricultural Science* 153, 1394–1411.
768 <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
- 769 Shoemaker, H.E., McLean, E.O., Pratt, P.F., 1961. Buffer Methods for Determining Lime
770 Requirement of Soils With Appreciable Amounts of Extractable Aluminum. *Soil*
771 *Science Society of America Journal* 25, 274–277.
772 <https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500040014x>
- 773 Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of
774 Soils. *Soil Science Society of America Journal* 58, 1775.
775 <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- 776 Struyf, A., Hubert, M., Rousseeuw, P., 1997. Clustering in an Object-Oriented Environment.
777 *Journal of Statistical Software* 1, 1–30. <https://doi.org/10.18637/jss.v001.i04>

- 778 Suzuki, L.E.A.S., Reichert, J.M., Albuquerque, J.A., Reinert, D.J., Kaiser, D.R., 2015.
779 Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil.
780 Geoderma Regional 5, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.03.005>
- 781 Tedesco, M.J., Gianello, C., Bissani, C.A., Bohnen, H., Volkweiss, S.J., others, 1995. Análises
782 de solo, plantas e outros materiais. Ufrgs Porto Alegre.
- 783 Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. Manual de métodos de
784 análise de solo. Embrapa, Brasília, DF.
- 785 Umburanas, R.C., Kawakami, J., Ainsworth, E.A., Favarin, J.L., Anderle, L.Z., Dourado-Neto,
786 D., Reichardt, K., 2022. Changes in soybean cultivars released over the past 50 years in
787 southern Brazil. Sci Rep 12, 508. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04043-8>
- 788 UN General Assembly, 2015. Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable
789 Development. UN General Assembly.
- 790 Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil
791 organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil
792 Science 37, 29.
- 793 Zanon, A.J., Streck, N.A., Grassini, P., 2016. Climate and management factors influence
794 Soybean yield potential in a subtropical environment. Agronomy Journal 108, 1447–
795 1454. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0535>
796

CONCLUSÕES

A curto prazo, a mobilização eventual do solo com plantio direto pode prejudicar o aprofundamento de raízes e potencializar a restrição imposta pelo déficit hídrico na produtividade de grãos. Se as raízes se concentram mais nas camadas superiores do solo, elas experimentam uma menor disponibilidade de água nessas camadas pelo efeito da mobilização.

Práticas de manejo que promovam o aprofundamento das raízes e favoreçam a disponibilidade de água nas camadas mais próximas à superfície do solo são fundamentais para reduzir a vulnerabilidade da soja a anos de déficit hídrico. Contudo, é necessária uma análise rigorosa das condições do solo em profundidade para identificar as principais restrições existentes. Isso porque a maioria dos solos, pelo menos do Rio Grande do Sul, possuem alguma condição, seja ela natureza física e/ou química que limitam o aprofundamento de raízes.

A realização de estudos que comparem a mobilização eventual em plantio direto e uso de cobertura verde parece ser uma excelente oportunidade para avaliar os impactos na distribuição das raízes, disponibilidade de água no solo e produtividade de diferentes culturas agrícolas. Isso ajudaria a identificar as práticas mais eficientes para melhorar o aproveitamento de água e nutrientes e aumentar a produtividade de grãos em anos mais secos.

REFERÊNCIAS

- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 4, p. 1612-1622, 2017b.
- BATTISTI, R. et al. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 83, p. 1–14. 2017a.
- BELLINASSO, R. J. S. et al. Crop yields in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in depth. **Soil Research**, v. 60, n. 1, p. 33-49, 2021.
- BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 3, p. 208-218, 2019.
- BEUTLER, A. N.; J.F. CENTURION. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agricola**, v. 61, p. 626–631, 2004.
- BIZARI, D. R. et al. Perda de massa de milho na produção do feijoeiro irrigado em sistema plantio direto. **Irriga**, v. 24, n. 3, p. 400-511, 2019.
- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, p. 164-200, 2018.
- BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 262–271, 2014.
- BOTTA, G. F. et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. **Soil & Tillage Research**, V. 110, p. 167–174, 2010.
- CAIRES, E. F. et al. Soil acidity and aluminum toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, v. 24, p.302–309, 2008.
- CECAGNO, D. et al. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 54–62, 2016.
- CONAB – Série histórica das safras – soja. Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30>>.
- FERREIRA, C. J. B. et al. Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 3, p. 383-396, 2021.
- FURLANI, C. E. A. et al. Temperatura do solo em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 375-

380, 2008.

GATHALA, M. K. et al. Effect of tillage and crop establishment methods on physical properties of a medium-textured soil under a seven-year rice-wheat rotation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, p. 1851-1862, 2011.

GUBIANI, P. I. et al. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1502-1511, 2013b.

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2013a.

KARLEN, D. L. et al. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 4-10, 1997.

KAZEMI, S. et al. Integral water capacity (IWC) and least limiting water range (LLWR): prediction using plant growth indices and soil properties. **3 Biotech**, v. 10, n. 7, p. 1-22, 2020.

LIU, X. et al. A global meta-analysis of the impacts of no-tillage on soil aggregation and aggregate-associated organic carbon. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 18, p. 5292-5305, 2021.

MONDAL, S.; CHAKRABORTY, D. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. **Geoderma**, v. 405, p. 115443, 2022.

MORAES, M. T. et al. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at different soil compaction levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1–18, 2019.

PIVETTA, L. A. et al. Soybean root growth and activity as affected by the production system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1547–1554, 2011.

RAO, I. M. et al. Root adaptations to soils with low fertility and aluminum toxicity. **Annals of Botany**, v. 118, p. 593–605, 2016.

SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 1394 – 1411, 2015.

SILVA, B. M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil & Tillage Research**, v. 154, p. 103–113, 2015.

SILVA, B. M. et al. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potencial, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. **Soil & Tillage Research**, v. 189, p. 36–43, 2019.

SILVA, L. F. S.; MARINHO, R. S. B.; MATSURA, E. E. Intervalo hídrico ótimo para avaliação de sistemas de produção e produtividade do feijão. **Irriga**, v. 22, p. 383–399, 2017.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Medium-term no-tillage, additional compaction, and chiseling as affecting clayey subtropical soil physical properties and yield of corn, soybean and wheat crops. **Sustainability**, v. 14, n. 15, p. 9717, 2022.

USDA (2016). Disponível em: <<https://www.ers.usda.gov/about-ers/plans-and-accomplishments/ers-annual-report-fy-2016/>>.

VAN LIER, Q. de J.; GUBIANI, P. I. Beyond the “least limiting water range”: rethinking soil physics research in brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 925-939, 2015.

WANG, H.; WANG, L.; REN, T. Long-term no tillage alleviates subsoil compaction and drought-induced mechanical impedance. **International Agrophys**, vol. 36, p. 297-307, 2022.