



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ALAN RICARDO VALDANHA DE SOUZA**

**CRESCIMENTO INICIAL DE PLÂNTULAS DE MILHO SOB NÍVEIS DE  
DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO**

**RONDONÓPOLIS-MT  
2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CRESCIMENTO INICIAL DE PLÂNTULAS DE MILHO SOB NÍVEIS DE  
DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO**

**ALAN RICARDO VALDANHA DE SOUZA  
ENGENHEIRO AGRÔNOMO**

**Orientador:** Prof. Dr. Tonny José Araújo da Silva.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Rondonópolis, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**RONDONÓPOLIS-MT  
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte  
Ficha Catalográfica elaborada de forma automática com os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a). Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

S719c Souza, Alan Ricardo Valdanha de.  
CRESCIMENTO INICIAL DE PLÂNTULAS DE MILHO SOB NÍVEIS DE  
DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO [recurso eletrônico] / Alan  
Ricardo Valdanha de Souza. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 66 f., il. color., pdf).  
– 2025.

Orientador(a): Prof. Dr. Tonny José Araújo da Silva..  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Rondonópolis,  
Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Agrícola, Rondonópolis, 2025. Inclui bibliografia.

1. Qualidade física do solo. 2. Desenvolvimento inicial. 3. Teor de água  
no solo. 4. Sistema radicular. 5. Zea mays L. I. Silva., Prof. Dr. Tonny José  
Araújo da, *orientador*. II. Título.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS**  
**PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: CRESCIMENTO INICIAL DE PLÂNTULAS DE MILHO SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO**

**AUTOR : Alan Ricardo Valdanha de Souza**

Dissertação defendida e aprovada em **28 de FEVEREIRO** de **2025**.

**COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA**

**1. Prof. Dr. Tonny José Araújo da Silva** (Presidente Banca /Orientador)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS

**2. Dr. Ivis Andrei Campos e Silva** (Membro Interno)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS

**3. Dra. Alessana Franciele Schlichting** (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: LANID CONSULTORIA

**Rondonópolis, 28/02/2025.**



Documento assinado eletronicamente por **Ivis Andrei Campos e Silva**, **Usuário Externo**, em 14/03/2025, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tonny Jose Araujo da Silva, Docente - UFR**, em 19/03/2025, às 14:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufr.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufr.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0476683** e o código CRC **68C3A1A5**.

---

**Referência:** Processo nº 23853.001495/2025-15

SEI nº 0476683

*"A todas as pessoas que contribuíram para o meu sucesso e para o meu crescimento, tanto pessoal quanto profissional, expressei minha mais profunda gratidão. Cada ensinamento, incentivo e apoio foram essenciais nesta jornada.*

*DEDICO."*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte inesgotável de força e sabedoria, que guiou meus passos e me permitiu alcançar esta conquista. Sem sua graça e providência, este caminho teria sido ainda mais árduo.

À minha mãe, Maria Aparecida Valdanha, cuja coragem e sacrifício foram a base sobre a qual construí meu percurso acadêmico. Seu amor incondicional e sua resiliência diante das adversidades me permitiram seguir adiante e realizar este sonho.

Aos meus irmãos, Marcelo Roberto Fernandes, Beatriz Dias de Souza, Leandro Dias de Souza e Benilson Dias de Souza (*in memoriam*), por sempre acreditarem em mim e apoiarem minhas escolhas. Sua confiança foi um pilar essencial nessa trajetória.

Ao meu orientador, Professor Dr. Tonny José Araújo da Silva, pela oportunidade de integrar seu grupo de pesquisa e pelo incentivo constante ao meu desenvolvimento acadêmico. Sua orientação precisa e rigor científico foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À Professora Dr.<sup>a</sup> Edna Maria Bonfim-Silva, cujas palavras de incentivo e apoio foram fundamentais para que eu superasse os momentos mais desafiadores. Sua generosidade, sabedoria e orientação contínua foram essenciais para que eu permanecesse firme e determinada neste percurso.

À Professora Dr.<sup>a</sup> Patrícia Ferreira da Silva, pelos conselhos valiosos, pela paciência e pelo compromisso em guiar meu aprendizado, ajudando-me a superar os obstáculos que surgiram ao longo da pesquisa.

Aos colegas Rosana Andréia da Silva Rocha, Laura Caroline Rodrigues Vieira, Igor Rian Bonelli de Oliveira e Joyce da Costa Cruz, cuja parceria e apoio tornaram esta caminhada mais leve e enriquecedora.

Ao Dr. Ivis Andrei Campos e Silva, pela atenção dedicada à revisão da dissertação e pelo auxílio imprescindível na parte estatística deste trabalho.

À Dr.<sup>a</sup> Alessana Franciele Schlichting pelas contribuições em minha dissertação.

Aos amigos de turma, Altair Marques Pereira Filho, Maísa de Oliveira Matos, Natalia do Val Tavares, Yasmim Beltrão Dib e Tallys Henrique Bonfim da Silva, por compartilharem comigo os desafios e alegrias desta jornada acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por me proporcionar a oportunidade de expandir meus horizontes e aprofundar meus conhecimentos.

À Universidade Federal de Rondonópolis, instituição que desempenhou um papel central em minha formação profissional e intelectual. Sou grato por todo aprendizado e pelas experiências que moldaram minha trajetória acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo à pesquisa científica.

E, por fim, a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho. Meu sincero reconhecimento e gratidão.

**Com profunda gratidão**

Alan Ricardo Valdanha de Souza

## CRESCIMENTO INICIAL DE PLÂNTULAS DE MILHO SOB NÍVEIS DE DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO

### RESUMO

A densidade do solo e a tensão de água no solo são fatores críticos que afetam o desenvolvimento inicial do milho (*Zea mays* L.), uma das principais culturas agrícolas do Brasil e do mundo. Objetivou-se avaliar o efeito combinado de tensões de água e da densidade do solo no crescimento inicial de plântulas de milho cultivados em mesa de tensão e determinar a faixa ideal de cultivo. O experimento foi realizado na Universidade Federal de Rondonópolis – MT, em casa de vegetação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com esquema fatorial 4x5, sendo quatro níveis de densidade (1,2; 1,4; 1,6 e 1,8 g cm<sup>-3</sup>) e cinco tensões de água no solo (0, 10, 20, 60 e 100 cm H<sub>2</sub>O), com três repetições, totalizando 60 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi formada de um vaso de PVC com 12 cm de altura e 5 cm de diâmetro e posteriormente compactados com auxílio da prensa hidráulica P15ST até atingir os respectivos níveis de densidade do solo. O solo utilizado foi o Latossolo Vermelho distrófico. Não foi realizada adubação mineral nas unidades experimentais. As avaliações foram realizadas a cada 24 horas para quantificar a taxa de crescimento das plântulas e aos 15 dias após a semeadura realizou a leitura SPAD e aos 20 dias após a semeadura ao final do experimento realizou a medição de altura de plantas, área foliar, massa fresca da parte aérea, massa fresca de raiz, massa seca de raiz, diâmetro médio da raiz, volume de raiz, área do sistema radicular, área superficial de raiz e comprimento total de raiz. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e sua homocedasticidade pelo teste de Bartlett. Após, procedeu à análise de variância, ambos à 5% de probabilidade de erro, utilizando o software Sisvar. Ocorrendo significância para os fatores isolados, aplicou-se análise de regressão linear e polinomial, já para a interação, foi realizada a superfície de resposta. Tempo de emergência, altura das plantas e taxa de crescimento foram influenciados pela densidade e tensões de água no solo. Densidade do solo de 1,4 g cm<sup>-3</sup> e tensão de 65,2 cm H<sub>2</sub>O resultaram no maior acúmulo de massa fresca da parte aérea do milho. A tensão de água do solo aumentou o diâmetro médio da raiz para 0,36 cm. Densidades de 1,3 g cm<sup>-3</sup> e 1,49 g cm<sup>-3</sup> favoreceram a massa fresca e seca das raízes. Tensões de 72,03 cm H<sub>2</sub>O e 94,5 cm H<sub>2</sub>O proporcionaram maior área do sistema radicular (32,36 cm<sup>2</sup>) e volume de raízes (4,9 ml).

**Palavras-chave:** Qualidade física do solo; Desenvolvimento inicial; Teor de água no solo; Sistema radicular; *Zea mays* L.

# INITIAL GROWTH OF CORN SEEDLINGS UNDER SOIL WATER TENSION AND DENSITY LEVELS

## ABSTRACT

Soil density and soil water tension are critical factors affecting the initial development of maize (*Zea mays* L.), one of the main agricultural crops in Brazil and worldwide. This study aimed to evaluate the combined effect of water tensions and soil density on the initial growth of maize seedlings cultivated on a tension table and to determine the optimal cultivation range. The experiment was conducted at the Federal University of Rondonópolis – MT, in a greenhouse of the Graduate Program in Agricultural Engineering. A completely randomized design was used, with a 4x5 factorial scheme, consisting of four soil density levels (1.2, 1.4, 1.6, and 1.8 g cm<sup>-3</sup>) and five soil water tensions (0, 10, 20, 60, and 100 cm H<sub>2</sub>O), with three replications, totaling 60 experimental units. Each experimental unit consisted of a PVC pot with a height of 12 cm and a diameter of 5 cm, which was subsequently compacted using a P15ST hydraulic press to reach the respective soil density levels. The soil used was a Dystrophic Red Latosol. No mineral fertilization was applied to the experimental units. Evaluations were carried out every 24 hours to quantify seedling growth rate. At 15 days after sowing, SPAD readings were taken, and at 20 days after sowing, at the end of the experiment, measurements of plant height, leaf area, shoot fresh mass, root fresh mass, root dry mass, average root diameter, root volume, root system area, root surface area, and total root length were performed. Data were subjected to normality testing using the Shapiro-Wilk test and homoscedasticity testing using the Bartlett test. Subsequently, an analysis of variance was performed at a 5% probability of error using the Sisvar software. When significance was observed for isolated factors, linear and polynomial regression analysis was applied, and for interactions, a response surface analysis was conducted. Emergence time, plant height, and growth rate were influenced by soil density and water tensions. A soil density of 1.4 g cm<sup>-3</sup> and a water tension of 65.2 cm H<sub>2</sub>O resulted in the highest accumulation of shoot fresh mass in maize. Soil water tension increased the average root diameter to 0.36 cm. Soil densities of 1.3 g cm<sup>-3</sup> and 1.49 g cm<sup>-3</sup> favored root fresh and dry mass. Water tensions of 72.03 cm H<sub>2</sub>O and 94.5 cm H<sub>2</sub>O provided a larger root system area (32.36 cm<sup>2</sup>) and root volume (4.9 ml).

**Keywords:** Soil physical quality; Initial development; Soil water content; Root system; *Zea mays* L.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
2.1 A CULTURA DO MILHO .....	18
2.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MILHO (ZEA MAYS L.) .....	18
2.1.2 EFICIÊNCIA NA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR E CAPACIDADE DE MULTIPLICAÇÃO .....	18
2.1.3 INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO DAS PLÂNTULAS .....	18
2.1.4 A TENSÃO HÍDRICA E SUA RELAÇÃO COM A GERMINAÇÃO .....	19
2.2 INFLUÊNCIAS DA DENSIDADE DO SOLO NO CRESCIMENTO INICIAL DO MILHO.....	19
2.2.1 EFEITOS DA COMPACTAÇÃO NA PROPRIEDADE FÍSICA DO SOLO E NO CRESCIMENTO RADICULAR .....	19
2.2.2 A INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO SOLO NA GERMINAÇÃO E AERAÇÃO.....	19
2.2.3 ADAPTAÇÕES DAS RAÍZES À COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	20
2.2.4 IMPACTOS DA COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES DO SOLO E NO CRESCIMENTO DAS PLÂNTULAS .....	20
2.2.5 PRÁTICAS DE MANEJO PARA MITIGAR A COMPACTAÇÃO E MELHORAR A QUALIDADE DO SOLO.....	20
2.3 TENSÃO DA ÁGUA NO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA AS PLANTAS.....	21
2.4 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	22
2.4.1 FUNCIONAMENTO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO ..	22
2.4.2 IMPORTÂNCIA DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	23
2.4.3 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	24
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
3.1 ÁREA EXPERIMENTAL E DETALHES DOS TRATAMENTOS .....	26
3.2 VARIÁVEIS ANALISADAS .....	29
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
4.1 TEMPO DE EMERGÊNCIA.....	34
4.2 ALTURA DE PLANTA.....	35
4.3 TAXA DE CRESCIMENTO DA PLÂNTULA .....	36
4.4 ÁREA FOLIAR .....	38
4.6 MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA .....	39
4.7 MASSA FRESCA DE RAIZ.....	41
4.8 MASSA SECA DE RAIZ.....	42
4.5 ÍNDICE DE SPAD .....	44
4.9 DIÂMETRO MÉDIO DA RAIZ.....	45
4.10 VOLUME DE RAIZ.....	48
4.11 ÁREA DO SISTEMA RADICULAR .....	49
4.12 ÁREA SUPERFICIAL DA RAIZ (CM <sup>2</sup> ) .....	51

4.13 COMPRIMENTO TOTAL DE RAIZ.....	53
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Análise de Solo realizada com solo 0 - 20 cm de profundidade .....	26
<b>Figuras 2.</b> Compactação de solo obtida em prensa hidráulica .....	27
<b>Figura 3.</b> Diagrama da bancada utilizando princípio de mesa de tensão desenvolvida para obtenção das diferentes tensões de água no solo nas unidades experimentais. (0, 1, 2, 6 e 10 kPa).....	28
<b>Figura 4.</b> Tubo de PVC saturado para cultivo do milho. ....	29
<b>Figura 5.</b> Emergência das primeiras unidades experimentais. ....	30
<b>Figura 6.</b> Avaliação Índice SPAD aos 15 dias após a emergência.....	30
<b>Figura 7.</b> Plantas de milho aos 20 dias após a emergência. ....	31
<b>Figura 8.</b> Tempo de Emergência (dias) da planta do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo (A) e de tensões de água no solo (B). Significativo a * - $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	34
<b>Figura 9.</b> Altura da planta do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a * - $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	35
<b>Figura 10.</b> Taxa de crescimento (cm dia <sup>-1</sup> ) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a * - $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	37
<b>Figura 11.</b> Área foliar do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a * - $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	38
<b>Figura 12.</b> Massa fresca da parte aérea do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a * - $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	40
<b>Figura 13.</b> Massa fresca da raiz do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a * - $p \leq 0,05$ e ** - $p \leq 0,01$ . DS=densidade do solo.....	41
<b>Figura 14.</b> Massa seca da raiz da cultura do milho híbrido P3889R da Pioneer, submetida a níveis de densidade do solo (A) e tensões de água no solo (B). Significativo em * - $p \leq 0,05$ ; * ns - Não significativo. DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	43
<b>Figura 15.</b> Índice de SPAD do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a * - $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	44
<b>Figura 16.</b> Diâmetro médio da raiz da cultura do milho híbrido P3889R da Pioneer, submetida a níveis de densidade do solo (A) e tensões de água no solo (B). Significativo em * - $p \leq 0,05$ ; * ns - Não significativo. DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	46
<b>Figura 17.</b> Volume de raiz (cm) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a * - $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....	48

- Figura 18.** Área do Sistema radicular (cm<sup>2</sup>) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....50
- Figura 19.** Área superficial da raiz (cm<sup>2</sup>) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....52
- Figura 20.** Comprimento total da raiz (cm) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo. ....53

## 1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal mais produzido no mundo, com uma produção anual que ultrapassa 1,1 bilhão de toneladas. Esse volume representa aproximadamente 40% da produção mundial total de cereais. Os principais produtores de milho são os Estados Unidos, a China e o Brasil, que juntos respondem por cerca de 60% da produção global (Tonin; Costa, 2023).

O Brasil tem uma área plantada de aproximadamente 21,97 milhões de hectares com uma produção equivalente a 115,1 milhões de toneladas, sendo os maiores produtores os estados do Mato Grosso, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. A produção de 45,2 milhões de toneladas do Mato Grosso é superior à de cada uma das demais regiões do País, sendo uma das commodities mais importantes do agronegócio brasileiro (CONAB, 2022).

Para que se tenha elevados desempenhos produtivos, as commodities como o milho dependem do crescimento inicial, notadamente a germinação, vigor das plântulas e o desenvolvimento inicial da planta (Taiz; Zaiger, 2017). Ali *et al.* (2021) afirmam que o crescimento inicial das plântulas de milho está intimamente ligado às propriedades do solo, como porosidade, densidade, compactação, tensão e umidade do solo, assim como o fornecimento de nutrientes conforme a curva de absorção da cultura.

Dentre as propriedades físicas do solo, a densidade apresenta elevada influência no crescimento inicial de plântulas de milho, Xiong *et al.* (2022) afirmam que essa propriedade do solo altera o comportamento hídrico do solo na região de semeadura, além de elevar a resistência à penetração no plano vertical da linha de semeadura, isso ocorre em função da densidade elevada aumentar a resistência mecânica do solo, que pode ser quantificada em termos de densidade do solo e resistência à penetração.

Xiong *et al.* (2020) evidenciam que o crescimento radicular, assim como, o volume da raiz da cultivar de milho Zhengdan958 foi reduzida significativamente em solos com densidade elevada. Já Obour; Ugarte (2021) constataram redução no crescimento inicial das plântulas de milho em decorrência do nível de maior densidade no solo, o que reflete em decréscimo em termos de produtividade de milho da ordem de 34%.

Nesse sentido, como a densidade influi no comportamento hídrico do solo, é fundamental analisar como a tensão de água no solo relaciona-se com a umidade e o grau de densidade, e como influencia no crescimento inicial de plântulas de milho.

Keller *et al.* (2017) afirmam que o alto nível de densidade dos solos deforma a estrutura do solo, reduz a porosidade e altera a morfologia dos poros, tem efeitos negativos em cascata no armazenamento e transporte de água do solo, ou seja, diferentes tensões de água no solo refletem conteúdos hídricos diferentes, o que remete a graus de compactações diferentes assim como no crescimento das raízes e na disponibilidade de nutrientes, contribuindo para redução da produtividade dos cultivos (Schjønning *et al.*, 2017).

A tensão de água no solo pode ser quantificada por diferentes métodos, como tensiômetro e câmaras de pressão com placas porosas, e quando associada a umidade, reflete a curva característica de água no solo, sendo comumente utilizada como ferramenta para manejo de irrigação, podendo ser um indicativo do momento de irrigar assim como do volume a ser repostado aos solos (Silva *et al.*, 2018; Zarehaghi *et al.* 2017), além disso a tensão de água no solo pode ser uma ferramenta valiosa para prever a densidade do solo, pois existe uma relação direta entre a compactação do solo e a retenção de água.

Solos compactados possuem maior densidade, o que aumenta a tensão de água, dificultando a disponibilidade de água para as plantas (Li *et al.*, 2016). A compactação reduz a porosidade do solo, o que limita a infiltração e a retenção de água, elevando a tensão da água no solo (Zhu *et al.*, 2020). A medição da tensão de água pode ser realizada com tensiômetros, proporcionando uma forma prática de identificar áreas com alta compactação e, assim, prever a densidade do solo (Kahlon *et al.*, 2021). Dessa forma, a tensão de água pode ser utilizada para otimizar o manejo da irrigação e melhorar a eficiência no uso da água (Vogeler *et al.*, 2014).

Além disso, modelos baseados na relação entre tensão de água e densidade do solo permitem estimativas mais precisas das condições do solo, favorecendo práticas agrícolas mais sustentáveis (Gheorghe *et al.*, 2018).

O aumento da densidade e da tensão do solo pode ser causado por diversos fatores, com a compactação sendo a principal causa. A compactação do solo ocorre principalmente devido ao tráfego de máquinas pesadas e práticas agrícolas inadequadas, como o uso excessivo de implementos, esse processo reduz a

porosidade do solo, dificultando a circulação de ar e a infiltração de água, o que eleva a tensão da água no solo (Zhu *et al.*, 2020).

Solos com maior densidade apresentam menor capacidade de retenção de água, prejudicando a disponibilidade de água para as plantas e afetando o crescimento radicular (Li *et al.*, 2016). Além disso, a falta de matéria orgânica e a degradação estrutural do solo contribuem para o aumento da densidade e da tensão (Fisher *et al.*, 2012). Essas condições afetam negativamente a produtividade das culturas e a eficiência no uso da água (Vogeler *et al.*, 2014).

Em geral, para a maioria das culturas, bons rendimentos têm sido obtidos quando são mantidas baixas tensões de água no solo, em função da maior umidade do solo nessas tensões (Silva *et al.*, 2018). Todavia, Xiong *et al.* (2020) afirmam que altos valores de umidade têm efeitos negativos nas características das raízes em solo compactado. Já Zarehaghi *et al.* (2017) relataram que o alto teor de água no solo compactado pode exacerbar as deficiências de oxigênio nas raízes, dificultando ainda mais o crescimento do sistema radicular. O mesmo cenário é abordado nos estudos Xiong *et al.*, 2022; Obour; Ugarte, 2021; Xiong *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2018; Zarehaghi *et al.* 2017.

No entanto, estudos sobre efeitos da combinação de diferentes tensões de água no solo com diferentes níveis de densidade no crescimento inicial de plântulas de milho em solos tropicais ainda são incipientes.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo avaliar o efeito combinado de tensões de água e da densidade do solo no crescimento inicial de plântulas de milho cultivados em mesa de tensão e determinar a faixa ideal de cultivo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cultura do milho

#### 2.1.1 Características Gerais do Milho (*Zea mays* L.)

O milho (*Zea mays* L.), uma gramínea da família Poaceae, é uma planta monocotiledônea amplamente cultivada devido à sua importância econômica e alimentar. Classificado como uma planta de ciclo C4, o milho apresenta alta eficiência no uso de água e na fixação de carbono, sendo adaptado a condições de alta luminosidade e temperaturas elevadas, típicas de regiões tropicais e subtropicais (Taiz; Zeiger, 2017). Seu sistema radicular fasciculado é altamente desenvolvido, podendo penetrar até 2 metros de profundidade, dependendo das condições do solo e do manejo agrícola. A produção radicular pode atingir até 40 toneladas por hectare em condições ideais, contribuindo para a ciclagem de nutrientes e melhorando a estrutura do solo (Darby; Lauer, 2013).

#### 2.1.2 Eficiência na Conversão de Energia Solar e Capacidade de Multiplicação

O milho se destaca pela sua eficiência na conversão de energia solar em biomassa. A partir de uma única semente de cerca de 0,3 g, a planta pode produzir entre 600 e 1000 novas sementes em aproximadamente nove semanas, dependendo das condições ambientais e práticas de manejo. Essa capacidade de multiplicação rápida e eficiente reforça a relevância do milho como uma das principais culturas agrícolas globais (Barros; Calado, 2014; Magalhães *et al.*, 2003).

#### 2.1.3 Influência da Densidade do Solo no Desenvolvimento das Plântulas

A densidade do solo e sua compactação afetam significativamente os processos de germinação e emergência das plantas. A compactação do solo aumenta a densidade, reduzindo a porosidade e dificultando a penetração das raízes, prejudicando o desenvolvimento inicial das plântulas. Estudos indicam que densidades superiores a  $1,4 \text{ g cm}^{-2}$  comprometem o crescimento radicular de várias espécies, limitando a emergência e o vigor das plântulas, como observado em *Crotalaria juncea*, *C. spectabilis* e *C. ochroleuca* (Pacheco *et al.*, 2016).

#### 2.1.4 A Tensão Hídrica e Sua Relação com a Germinação

A tensão hídrica do solo é um fator crucial para a germinação das sementes, pois está diretamente relacionada à disponibilidade de água. Pesquisas indicam que tensões superiores a 130 kPa reduzem a taxa de emergência e o vigor das plântulas de milho, destacando a importância de um manejo hídrico adequado para garantir o sucesso na germinação e no desenvolvimento inicial das plantas (Garcia, 2017). Práticas agrícolas que evitem a compactação excessiva e mantenham níveis ideais de umidade no solo são essenciais para promover um crescimento saudável das plântulas.

### **2.2 Influências da densidade do solo no crescimento inicial do milho.**

#### 2.2.1 Efeitos da Compactação na Propriedade Física do Solo e no Crescimento Radicular

A compactação do solo eleva sua densidade, o que pode resultar em uma redução do comprimento do sistema radicular e aumento de seu diâmetro. Essa mudança ocorre devido ao aumento da resistência mecânica necessária para a expansão das raízes, conforme Santos *et al.* (2005). A densidade elevada também dificulta o crescimento das raízes, comprometendo a absorção de água e nutrientes e prejudicando a troca gasosa no solo, o que pode afetar negativamente a produtividade das plantas (Nogueira; Manfredi, 1983).

#### 2.2.2 A Influência da Densidade do Solo na Germinação e Aeração

Dentre os fatores essenciais para a germinação das plântulas estão a umidade, temperatura e aeração do solo. Modolo *et al.* (2011) destacam que esses fatores são diretamente influenciados pela compactação ao redor da semente. A densidade elevada do solo é considerada um problema significativo para os solos agrícolas, como observado por Almeida *et al.* (2008), pois dificulta a germinação e o desenvolvimento inicial das plântulas.

### 2.2.3 Adaptações das Raízes à Compactação do Solo

Quando o solo está compactado, as raízes precisam desenvolver adaptações para superar as barreiras físicas. Essas mudanças incluem o aumento da densidade radicular em camadas superficiais e a modificação do diâmetro das raízes, resultando frequentemente em raízes mais finas ou laterais mais longas. Embora essas adaptações ajudem as raízes a atravessar camadas compactadas e acessar água e nutrientes em profundidade, elas podem comprometer a eficiência do sistema radicular e reduzir a produtividade das plantas (Cherubim *et al.*, 2016; Benevenuto *et al.*, 2020).

### 2.2.4 Impactos da Compactação nas Propriedades do Solo e no Crescimento das Plântulas

Solos compactados apresentam maior densidade e menor macroporosidade, o que limita a penetração das raízes e restringe o acesso das plântulas a nutrientes e água. Além disso, a compactação pode induzir estresse hídrico devido à redução da capacidade das raízes de explorar camadas mais profundas do solo (Mcphee *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2015). Esses impactos têm efeitos diretos no crescimento e produtividade das culturas, ressaltando a importância de práticas de manejo adequadas.

### 2.2.5 Práticas de Manejo para Mitigar a Compactação e Melhorar a Qualidade do Solo

Existem várias práticas de manejo que podem reduzir a compactação e melhorar as condições físicas do solo. A rotação de culturas é uma dessas práticas, promovendo maior diversidade radicular e contribuindo para a redução da compactação (Gomes *et al.*, 2021). Além disso, o controle de tráfego de máquinas agrícolas e a subsolagem, quando aplicada corretamente, ajudam a minimizar a compressão excessiva do solo e a melhorar sua porosidade (Silva *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2020). O uso de cobertura vegetal também protege o solo contra o impacto direto da chuva e melhora a infiltração de água, prevenindo a compactação superficial

(Santos *et al.*, 2023). Essas práticas são fundamentais para melhorar a qualidade do solo e promover a sustentabilidade agrícola.

## **2.3 Tensão da Água no Solo e Sua Influência na Disponibilidade Hídrica para as Plantas**

### **2.3.1 A Tensão de Água no Solo**

A tensão da água no solo, ou potencial matricial, regula a disponibilidade hídrica para as plantas e é influenciada pela textura, estrutura, matéria orgânica e umidade do solo. Esses fatores impactam diretamente a eficiência da irrigação, a absorção de água pelas raízes e a saúde das culturas. Solos com boa estrutura e maior matéria orgânica retêm mais água, favorecendo o crescimento das plantas (McGrath *et al.*, 2016). Já a compactação do solo pode reduzir a infiltração e a troca gasosa, afetando negativamente o desenvolvimento radicular (Bendix *et al.*, 2019). A gestão adequada dessa tensão é crucial, especialmente em regiões de escassez hídrica (Duran *et al.*, 2021).

### **2.3.2 A Importância da Tensão de Água na Absorção de Nutrientes e Fotossíntese**

A tensão da água no solo não apenas regula a disponibilidade de água para as plantas, mas também afeta processos fisiológicos importantes, como a absorção de nutrientes e a fotossíntese. Bendix *et al.* (2019) afirmam que a compreensão dessa tensão é fundamental para otimizar o crescimento e a produtividade das plantas, principalmente em condições de estresse hídrico.

### **2.3.3 O Papel da Tensão de Água na Eficiência do Uso da Água nas Culturas**

A tensão de água no solo tem sido amplamente pesquisada em relação à eficiência do uso da água nas plantas. Duran *et al.* (2021) destacam que o manejo adequado dessa tensão pode melhorar a eficiência do uso da água, especialmente em regiões semiáridas onde a água é um recurso limitado. Isso ressalta a importância de estratégias de manejo que considerem a tensão de água no solo, contribuindo para a sustentabilidade agrícola em face das mudanças climáticas.

### 2.3.4 Efeitos do Aumento da Tensão de Água na Produtividade das Culturas

Estudos demonstram que o aumento na tensão da água no solo pode reduzir significativamente o crescimento de culturas, como o feijoeiro, afetando parâmetros importantes, como o índice de área foliar e a taxa de produção de matéria seca (Stone; Portes; Moreira, 2021). Isso mostra como a tensão de água pode impactar negativamente o desempenho das plantas, especialmente quando não gerenciada adequadamente.

### 2.3.5 Tecnologias de Monitoramento da Tensão de Água no Solo

Em um cenário de escassez de recursos hídricos, o monitoramento preciso da tensão da água no solo torna-se vital para a gestão eficiente da irrigação. Tecnologias como sensores para monitoramento da tensão ajudam os produtores a tomar decisões informadas sobre o manejo da água, contribuindo para a sustentabilidade do uso desse recurso na agricultura (EMBRAPA, 2023).

## 2.4 Curva característica de retenção de água no solo

A curva característica de retenção de água no solo (CRA) é uma representação gráfica que descreve a relação entre o teor de água no solo e o potencial matricial, refletindo a energia com que a água é retida na matriz do solo. Essa curva é essencial para compreender o comportamento hídrico do solo, influenciando diretamente práticas de manejo agrícola, como a irrigação, e estudos relacionados à disponibilidade de água para as plantas.

A CRA permite determinar a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, fornecendo informações cruciais sobre a água disponível para as culturas (EMBRAPA, 2006). Além disso, a curva auxilia na avaliação da retenção de água em solos com diferentes texturas, contribuindo para a gestão eficiente da irrigação e a sustentabilidade agrícola (Moretti, 2010).

### 2.4.1 Funcionamento da Curva Característica de Retenção de Água no Solo

A CRA é obtida através da aplicação de diferentes tensões a amostras de solo saturadas, medindo-se o teor de água correspondente em cada tensão aplicada. Isso

permite identificar pontos críticos, como a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, que delimitam a faixa de umidade disponível para as plantas. A capacidade de campo refere-se ao teor de água retido no solo após a drenagem gravitacional, enquanto o ponto de murcha permanente é o teor de água abaixo do qual as plantas não conseguem mais extrair água suficiente, levando ao murchamento irreversível. (Souza; Silva; Ferreira, 2021).

#### 2.4.2 Importância da Curva Característica de Retenção de Água no Solo

A Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CRA) é uma ferramenta essencial na agricultura moderna, com diversas aplicações práticas e científicas.

**Manejo da Irrigação:** A CRA fornece dados cruciais sobre a disponibilidade de água no solo, permitindo a formulação de estratégias de irrigação mais eficientes. Compreender essa curva ajuda a evitar tanto o déficit hídrico quanto o excesso de água, fatores que podem prejudicar o desenvolvimento das culturas. Estudos destacam que a CRA é fundamental na caracterização das propriedades hidráulicas do solo, influenciando diretamente a gestão da irrigação e a disponibilidade de água para as plantas (Souza; Silva; Ferreira, 2021).

**Avaliação da Qualidade Física do Solo:** A forma da CRA indica a distribuição dos poros no solo, permitindo inferir sobre sua estrutura e qualidade física. Solos bem estruturados apresentam uma distribuição equilibrada de macro e microporos, refletida em uma CRA que demonstra adequada retenção e disponibilidade de água. Pesquisas indicam que a CRA é um importante indicador de qualidade física do solo, estando diretamente relacionada ao desenvolvimento das plantas e à eficiência do uso da água (Silva *et al.*, 2010).

**Modelagem Hidrológica e Estudos Ambientais:** A CRA é amplamente utilizada em modelos que simulam o movimento da água no solo, sendo essencial para prever fluxos de água e solutos. Essas previsões são cruciais em estudos de contaminação e conservação ambiental. A curva é utilizada na modelagem do movimento de água no solo, no fluxo e transporte de solutos, e na configuração do manejo da irrigação e de redes de drenagem em sistemas agrícolas, evidenciando sua importância em estudos ambientais (Andrade *et al.*, 2008).

### 2.4.3 Métodos para Determinação da Curva Característica de Retenção de Água no Solo

A obtenção da CRA pode ser realizada por diferentes métodos, que variam em precisão, custo e aplicabilidade. Entre os principais, destacam-se:

**Câmara de Pressão de Richards:** Considerado o método padrão, utiliza câmaras de pressão para aplicar tensões específicas às amostras de solo saturadas, medindo-se o teor de água em equilíbrio para cada tensão. Embora preciso e amplamente utilizado, este método requer equipamentos especializados e tempo considerável para a obtenção dos dados (Melo Filho *et al.*, 2015).

**Psicrômetro de Ponto de Orvalho (WP4):** Este equipamento eletrônico mede o potencial hídrico de amostras de solo através da determinação do ponto de orvalho em uma câmara fechada. Proporciona leituras rápidas e é útil para uma ampla faixa de potenciais, embora possa apresentar limitações em tensões muito baixas (Melo Filho *et al.*, 2015).

**Método do Papel Filtro:** Consiste em colocar papéis de filtro em contato com amostras de solo para equilibrar a umidade entre eles. Após o equilíbrio, a umidade do papel filtro é medida e, com base em curvas de calibração, determina-se o potencial matricial correspondente. É um método mais rápido e de menor custo, porém com limitações em determinadas faixas de tensão (Lucas *et al.*, 2011).

**Funil de Placa Porosa e Mesa de Tensão:** Utilizados para determinar a retenção de água em baixas tensões, esses métodos envolvem a aplicação de sucções controladas em amostras de solo, permitindo a avaliação da umidade retida em diferentes potenciais (Cintra *et al.*, 2004).

A compreensão detalhada da Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CRA) é essencial para o manejo eficiente dos recursos hídricos na agricultura e para a preservação ambiental. A escolha do método adequado para sua determinação deve considerar as características específicas do solo, os recursos disponíveis e os objetivos do estudo, garantindo a obtenção de dados precisos e relevantes para práticas agrícolas e pesquisas científicas.

Estudos recentes destacam a importância de selecionar métodos de determinação da CRA que se alinhem com as condições locais e os objetivos específicos de manejo. Por exemplo, Nascimento *et al.* (2010) compararam métodos laboratoriais e de campo na obtenção da curva de retenção em solos irrigados do

Submédio São Francisco, ressaltando a necessidade de calibrações específicas para essas condições.

Além disso, Gotardo *et al.* (2019) evidenciaram diferenças nos dados de conteúdo de água do solo obtidos por técnicas laboratoriais e de campo, enfatizando a relevância de adaptar os métodos às características do solo e aos objetivos do estudo.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área experimental e detalhes dos tratamentos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente a Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), localizado sob as coordenadas geográficas 16° 27' 49" S, 54° 34' 46" W e altitude de 290 m no período de 20 de maio de 2024 a 8 de junho de 2024. O solo utilizado nas unidades experimentais foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Santos, 2018), com textura franco-argilo-arenoso, coletado na camada de 0-0,20 m de profundidade e peneirado em malha de 4 mm, sob vegetação de Cerrado nos limites da Universidade Federal de Rondonópolis, cujas coordenadas geográficas foram 16°27'35" S e 54°35'00" W. Realizou-se análise química do solo que resultou conforme figura 1.

Nº Lab	Amostra	Prof.	pH		P	K	Ca+Mg	Ca	Mg	Al	H	Mat. Org.	Soma de Base (S)	CTC	Sat por Bases (V)	RELAÇÕES			SATURAÇÕES (%) POR:				SAT. Al
			Água	CaCl <sub>2</sub>												mg d3 <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				g dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	
764631	Rondonópolis - MT	0*20	6,6	5,9	12,9	167,2	5,86	3,95	1,91	0,00	2,55	32,8	6,29	8,84	71,15	2,07	9,09	4,39	44,68	21,61	4,92	28,85	0,00

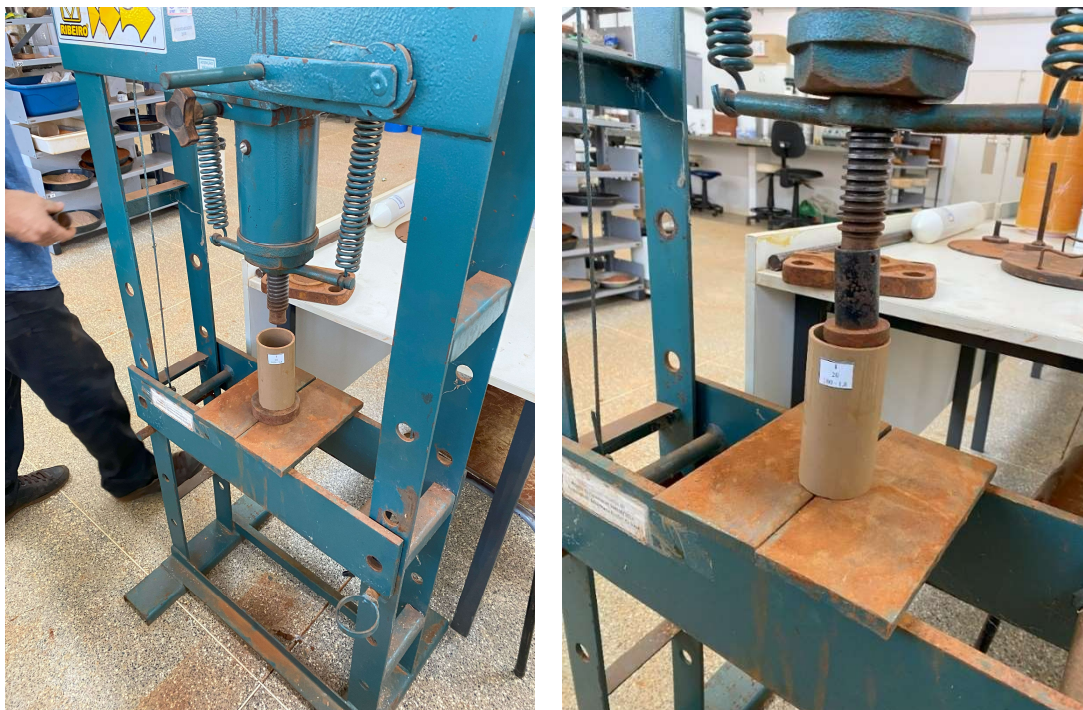
**Figura 1.** Análise de Solo realizada com solo 0 - 20 cm de profundidade

Realizou-se calagem para correção do solo 30 (trinta) dias antes da coleta para realização do experimento.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, arranjado em esquema fatorial, com 3 (três) repetições. Os tratamentos foram compostos por dois fatores sendo eles: quatro níveis de densidade solo, resultante das seguintes compressões (1,2; 1,4; 1,6; e 1,8 g cm<sup>-3</sup>) e cinco níveis tensões de água no solo obtidas em mesa de tensão (0, 10, 20, 60 e 100 cm H<sub>2</sub>O). O experimento foi composto por 20 (vinte) tratamentos, com um total de 60 (sessenta) unidades experimentais. Essas unidades foram cilindros de PVC (policloreto de vinila) de 12 cm de altura por 5 cm de diâmetro preenchidos com solo e compactados para atingir as densidades desse estudo, onde foram cultivadas as plântulas de milho.

O preenchimento dos cilindros de PVC com solo, conforme a metodologia adaptada de Farias et al. (2013), é realizado em etapas. Primeiramente, o solo é homogeneizado e preparado para o experimento. Em seguida, é colocado no cilindro de PVC em camadas sucessivas, sendo cada camada compactada por uma prensa hidráulica até atingir a densidade desejada. O processo é repetido até que o cilindro

esteja completamente preenchido, garantindo uma compactação uniforme em toda a extensão do solo. Ao final, o solo é nivelado para garantir condições adequadas para a realização dos testes experimentais.



**Figuras 2.** Compactação de solo obtida em prensa hidráulica

Para obter as compressibilidades de solo desejadas, realizou-se ensaio utilizando prensa hidráulica acionada manualmente. Para a realização do teste, seguiu as metodologias propostas pela norma MB-3336 da ABNT (1990) que trata sobre ensaio de adensamento unidimensional – bem como, as orientações previstas no comunicado técnico 111 da Embrapa (1997) uso de prensa manual como alternativa para determinação da compressibilidade de solos agrícolas.

Para determinação da quantidade de massa a ser compactada em cada tratamento com os seus respectivos níveis de densidade (1,2; 1,4; 1,6; e 1,8 g cm<sup>-3</sup>), utilizou-se a equação 1.

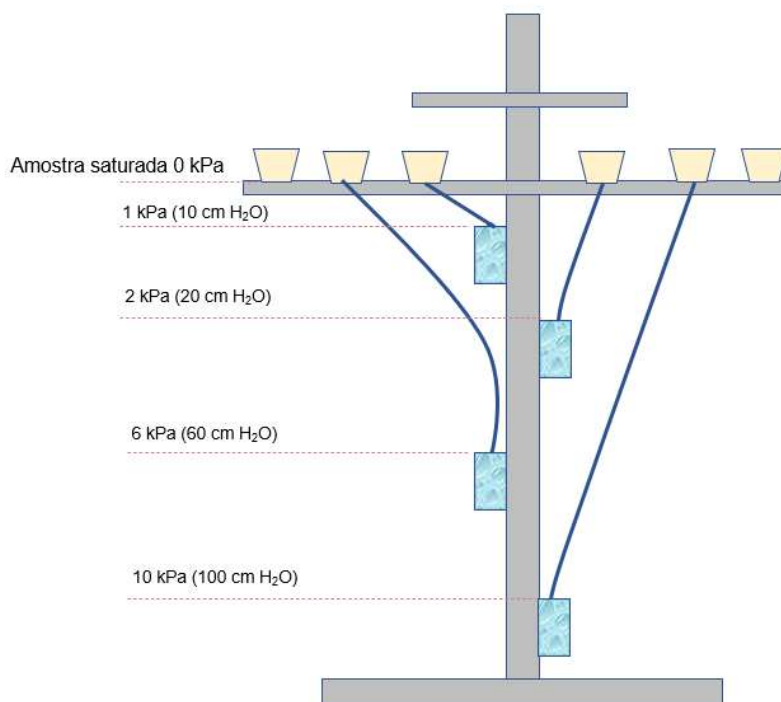
$$D_s(\text{gcm}^{-3}) = \frac{M_s}{V_t} \quad \text{Eq. 1}$$

$D_s$  - densidade do solo (gcm<sup>-3</sup>);

$M_s$  - massa de sólidos (g);

$V_t$ - volume de solo ( $\text{cm}^3$ ).

Já as tensões de água no solo foram estabelecidas por meio da construção de uma bancada utilizando o princípio de mesa de tensão, através da manutenção de colunas d'água de 10 a 100 cm, conforme diagrama da figura 2.



**Figura 3.** Diagrama da bancada utilizando princípio de mesa de tensão desenvolvida para obtenção das diferentes tensões de água no solo nas unidades experimentais. (0, 1, 2, 6 e 10 kPa).

Após a saturação do solo contido nos tubos de PVC, e a obtenção do equilíbrio hídrico sob mesa de tensão, foram realizados 3 furos no solo de cada coluna, no limite do anel superior, com aproximadamente 2 cm cada para receber as três sementes de milho para a germinação e crescimento inicial nos diferentes tratamentos. Foi utilizado, na semeadura, o milho híbrido P3889R da Pioneer, este que é um híbrido simples modificado de ciclo precoce (Figura 3).



**Figura 4.** Tubo de PVC saturado para cultivo do milho.

### 3.2 Variáveis analisadas

O Tempo de Emergência (TE) foi avaliado a cada 24h após a semeadura, considerando emergida a primeira semente que apontou no solo. A Taxa de Crescimento das plantas (TC) foi monitorada a cada 24 horas após a emergência da primeira semente, com o auxílio de régua graduada. Aos 15 dias após a semeadura, foi avaliado o índice SPAD (SPAD). Aos 20 dias após a semeadura, a Altura de Plantas (AP) foi medida com auxílio de régua graduada, e as unidades experimentais foram retiradas da mesa de tensão para posteriores análises em laboratório. No laboratório, foram avaliadas a Área Foliar (AF), Massa Fresca da Parte Aérea (MFA), Massa Fresca de Raiz (MFR), Massa Seca de Raiz (MSR), Diâmetro de Raiz (DR), Volume de Raiz (VR), Área do Sistema Radicular (AR), Área Superficial de Raiz (ASR) e Comprimento Total de Raiz (CTR). A Área do Sistema Radicular (AR) refere-se à extensão total do sistema de raízes, considerando o volume e a profundidade que ele ocupa no solo, enquanto a Área Superficial de Raiz (ASR) está relacionada à superfície total das raízes, fundamental para a absorção de água e nutrientes (Fitter, 2002). A AR é uma medida geral da rede radicular, enquanto a ASR foca na parte

funcional, influenciando a captação de recursos do solo (Gao *et al.*, 2015). A avaliação dessas áreas é crucial para entender como as raízes interagem com o solo (Lynch, 2013).



**Figura 5.** Emergência das primeiras unidades experimentais.

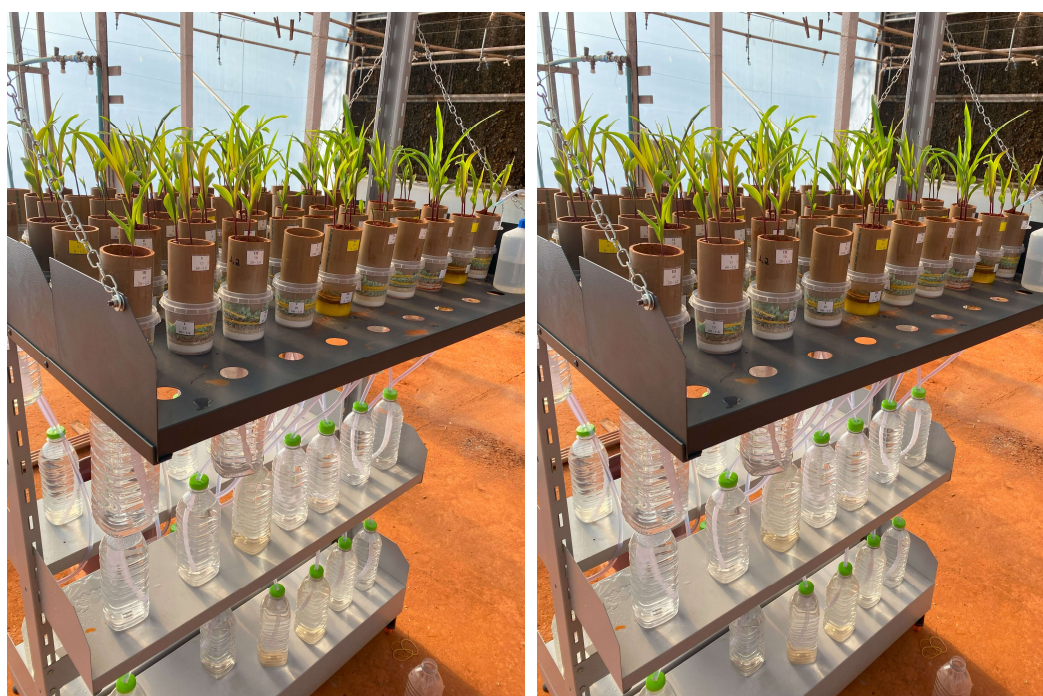
Após a emergência das plântulas, a altura das plantas foi avaliada a cada 24 horas com o auxílio de régua graduada para quantificar a taxa de crescimento (TC) diário, seguindo a metodologia de cálculo descrita por Tomer *et al.* (2012).

Aos 15 dias após a semeadura, foi avaliado o índice SPAD de cada parcela utilizando o SPAD – 502 Plus conforme Figura 5.



**Figura 6.** Avaliação Índice SPAD aos 15 dias após a emergência.

Ao final do experimento (Figura 6) foram realizadas avaliações de altura de plântulas (AP) com auxílio de régua graduada aferindo do solo até o comprimento da maior folha, e as unidades experimentais foram retiradas da mesa de tensão para proceder com as análises em laboratório, onde foram avaliadas; Área Foliar (AF) de plantas com integrador LI-3100C Area Meter; Massa Fresca da Parte Aérea (MFA) das plantas cortadas rentes ao solo e pesadas em balança analítica.



**Figura 7.** Plantas de milho aos 20 dias após a emergência.

Posteriormente as raízes foram retiradas do solo por meio de lavagem em peneira e quantificado o volume de raízes (VR), para isso utilizou-se uma quantidade de água conhecida adicionada em proveta, em seguida adiciona-se as raízes e conforme a variação de volume que a água sofreu estimou-se o volume das raízes. A área de raiz (AR) foi quantificada utilizando o WinDIAS 3 - Leaf Image Analysis System.

O Comprimento total de Raiz (CTR), Área superficial de Raiz (ASR) e Diâmetro médio de raiz (DMR), foram obtidos através das seguintes equações:

$$CTR(cm) = \frac{AR^2}{1,27324*VR}$$

Eq. 2

CTR – Comprimento total de raiz

AR – Área do sistema radicular

VR – Volume de raiz

$$DMR(cm) = \frac{1,27324*VR}{VR*AR} \quad \text{Eq. 3}$$

DMR – Diâmetro médio de raiz

VR – Volume de raiz

AR – Área do Sistema radicular

$$ASR(cm^{-2}) = Pi * CTR * DMR \quad \text{Eq. 4}$$

ASR – Área superficial de raiz

Pi - Valor de Pi

CTR – Comprimento total de raiz

DMR – Diâmetro médio de raiz

Posterior a determinação do volume das raízes, foi quantificada a massa fresca das raízes (MFR) em balança analítica de precisão após serem conduzidas estufa de ar forçado à 105° C, por 24h, para quantificar a massa seca da parte das raízes (MSR) das plantas com auxílio de balança analítica de precisão.

Quantificou-se a relação raiz parte área das plantas, conforme metodologia de (Benincasa, 2003).

### 3.3 Análise estatística

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk e sua homocedasticidade foi realizada pelo teste de Bartlett a 5% de probabilidade. Atendidos os pressupostos básicos da ANOVA, procedeu-se a análise de variância por meio do teste F. Verificada significância, foi realizada o desdobramento para interação entre os fatores estudados com auxílio do software Sisvar (Ferreira, 2019).

Os dados que apresentaram efeitos significativos, apenas, dos fatores isolados foram ajustados através de regressão polinomial linear e quadrática e utilizado o modelo de superfície de resposta quando houve interação significativa entre fatores.

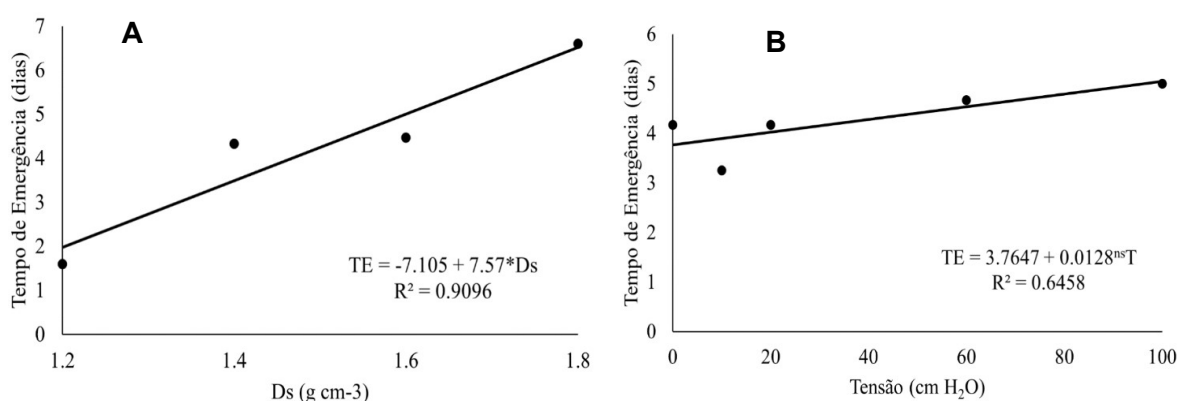
Os dados da interação entre os fatores foram apresentados no formato de superfície de resposta ( $z = a + bx + cx^2 + dxy + ey + fy^2$ ), utilizou-se para o desdobramento o software R versão 4.4.2.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Tempo de Emergência

A variável tempo de emergência apresentou efeito significativo de forma isolada para os fatores densidade do solo ( $p < 0.05$ ) e tensão do solo ( $p < 0.05$ ), comportando-se de maneira linear, indicando que o aumento da densidade e da tensão de água no solo resultou em um maior tempo para a emergência das plantas (Figura 7 A e B).

Os resultados apresentados são lineares, indicando que não existe um ponto de máxima. Esse padrão sugere que o tempo de emergência continua a aumentar de forma proporcional à elevação desses fatores, sem atingir um valor de saturação que poderia ser associado a uma dose máxima.



**Figura 8.** Tempo de Emergência (dias) da planta do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo (A) e de tensões de água no solo (B). Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

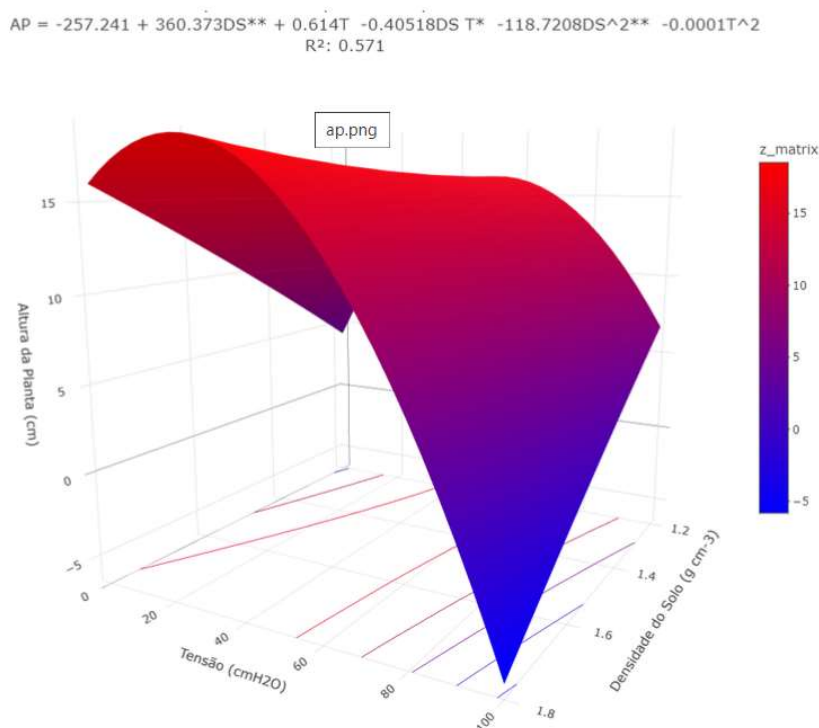
Os resultados obtidos demonstram que o aumento dos níveis de densidade do solo e tensão de água prolonga o tempo de emergência das plantas de milho. Magalhães e Durães (2002) ressaltam que a emergência do milho ocorre, em média, entre quatro e cinco dias após a semeadura em condições favoráveis. No presente estudo o tempo médio foi o mesmo citado pelos autores.

Os resultados, contudo, revelam que as condições de alta densidade e tensão de água no solo, interferem significativamente no tempo de emergência, evidenciando, principalmente o impacto negativo da densidade no estabelecimento inicial da cultura. Viana *et al.* (2006), associam a densidade do solo à dificuldade na absorção de oxigênio pelas sementes de milho e ao retardo no processo de germinação.

É importante ressaltar que, assim como observado por Genero *et al.* (2023), as condições do solo desempenham um papel crucial no desenvolvimento inicial do milho. A disponibilidade adequada de fatores químicos e físicos, bem como a ausência de condições adversas como a densidade, favorecem a emergência satisfatória das plantas e influenciam diretamente na produtividade da cultura.

## 4.2 Altura de planta

A variável altura de planta apresentou interação significativa ( $p < 0.05$ ) entre os fatores densidade do solo e tensão de água no solo. Os resultados obtidos indicam que a altura da planta é influenciada pela interação entre a tensão e a densidade do solo. O valor máximo de altura de 16,2 cm foi observado sob a tensão de 2,28 cm H<sub>2</sub>O e densidade do solo de 1,51 g cm<sup>-3</sup> (Figura 8).



**Figura 9.** Altura da planta do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

Esses resultados confirmam com os resultados de Silva *et al.* (2018), que destacam o bom desempenho do milho sob baixas tensões. A exposição ao estresse hídrico pode resultar em diversos danos, como redução da altura da planta, do

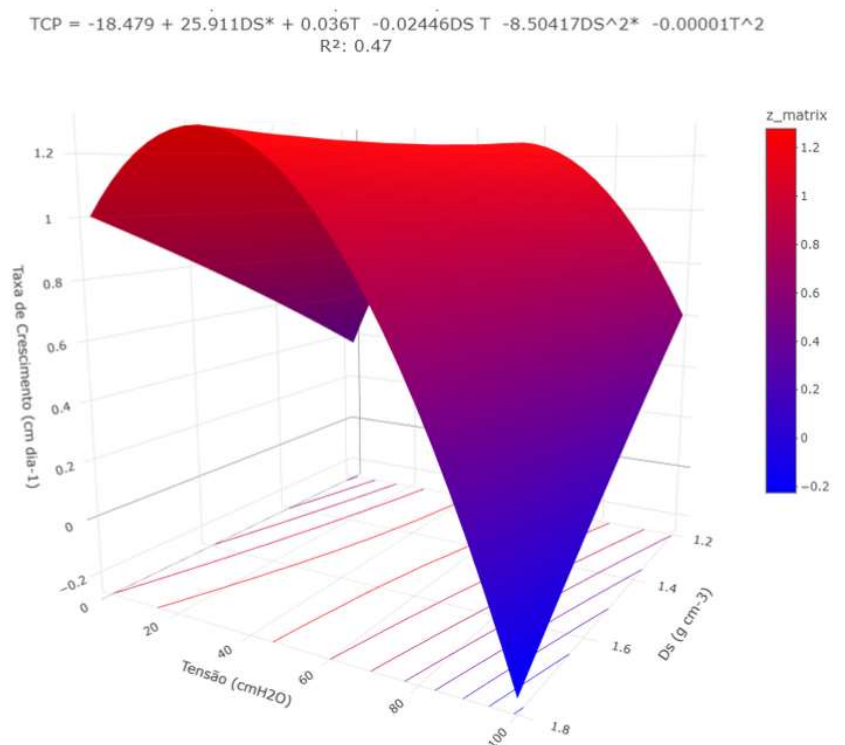
diâmetro do colmo e da produtividade, devido à menor área foliar para fotossíntese e aos danos no aparato fotossintético (Guimarães; Rocha; Paternian, 2019).

Além do estresse hídrico, a densidade do solo também exerce influência significativa nas características morfológicas das plantas, reduzindo o volume de solo explorado pelas raízes e comprometendo a absorção de água e nutrientes, o que limita o crescimento e o desenvolvimento vegetal. Resultados semelhantes foram apresentados por Sousa Almeida *et al.* (2021), que identificaram uma relação linear entre o aumento da densidade do solo e a redução na altura das plantas de milho.

Guimarães *et al.* (2013) constataram a mesma tendência no milheto, associando esse efeito à dificuldade de desenvolvimento das raízes e brotos, uma vez que a compactação do solo, aumenta a densidade, reduz a porosidade e a aeração, afetando a absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, prejudicando o crescimento da planta.

#### **4.3 Taxa de crescimento da plântula**

A taxa de crescimento da plântula foi afetada pela interação entre os níveis de densidade do solo e as tensões hídricas durante o crescimento inicial do milho. O nível de densidade do solo de  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  combinado com a tensão de  $40,2 \text{ cm H}_2\text{O}$ , foram os que proporcionaram maiores taxa de crescimento inicial da cultura do milho de 1,5 (Figura 9).



**Figura 10.** Taxa de crescimento (cm dia-1) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

Lacerda *et al.* (2016), descreve que a taxa de crescimento de plantas pode ser afetada por diversos fatores abióticos. Ressalta que, a diminuição do crescimento da planta são resposta comum de restrição ou excesso desses fatores. O crescimento de um vegetal depende dos processos celular, como expansão, divisão e desenvolvimento, são processos vulnerável ao desequilíbrio hídrico, principalmente na fase de alongamento celular (Tatagiba *et al.*, 2024).

Muitas das vezes, a planta como sistema de defesa diminui o consumo de energia para se adaptar as condições adversas (Liu, 2015). Para o resultado desse estudo, mesmo em níveis de densidade considerado elevado de  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ , a planta conseguiu desenvolver no período determinado no estudo. Ademais, plantas que sofre restrição física do solo, tende a reduzir a absorção de água o que comprometem os

processos fisiológico, como desidratação celular, e conseqüentemente dos processos de crescimento da planta (Lima; Ribeiro., 2020).

A interação dos fatores estudados, foram essenciais para o bom crescimento inicial do milho, ademais, a cultura possui um metabolismo de fixação de carbono o que faz com que o seu crescimento seja acelerado no início do desenvolvimento.

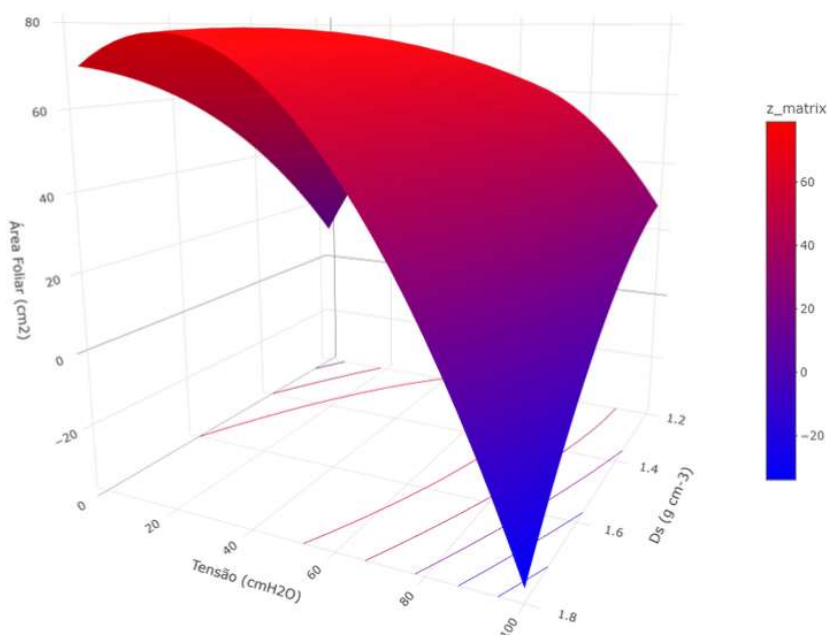
Beutler e Centurion (2007) investigaram como a compactação do solo afeta o crescimento radicular e a produtividade da soja, destacando que a compactação reduz a porosidade do solo, limita a disponibilidade de água e nutrientes e prejudica a aeração, comprometendo o crescimento contínuo das plantas.

#### 4.4 Área foliar

A variável área foliar (AF) apresentou uma influência significativa ( $p < 0.05$ ) decorrente da interação entre os níveis de densidade do solo de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  e as tensões de água no solo de 78,8, resultando em uma área foliar de  $79,0 \text{ cm}^2$  (Figura 10).

$$AF = -1096.709 + 1518.765DS^* + 3.458T^* - 2.0191DS \cdot T^* - 496.6792DS^2 - 0.0044T^2$$

$$R^2: 0.548$$



**Figura 11.** Área foliar do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

Essa variável é importante, pois uma maior área foliar durante o crescimento inicial da planta favorece os processos fotossintéticos e a síntese de fotoassimilados. Assim, a área foliar se configura como um parâmetro relevante para a produtividade das plantas (Veronezi *et al.*, 2018).

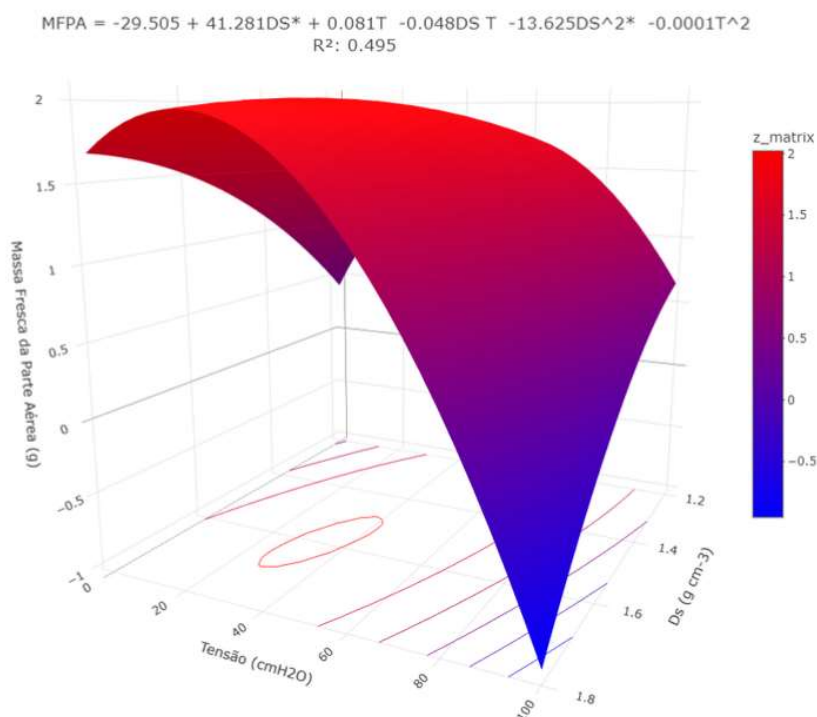
A interação entre esses fatores é fundamental para o desenvolvimento inicial saudável da cultura do milho, considerando que a disponibilidade hídrica é um determinante essencial para o crescimento do limbo foliar. Westering (2020) destaca em sua pesquisa que, quando a disponibilidade de água diminui, há uma redução no crescimento da planta, evidenciada pela queda na área foliar. Isso significa que plantas submetidas a estresse hídrico apresentam uma área foliar significativamente menor em comparação àquelas que estão em condições adequadas de manejo hídrico.

No estudo realizado por Resende Neto *et al.* (2024) sobre o desempenho do milho em diferentes níveis de densidade do solo, os autores identificaram que uma densidade de  $1 \text{ g cm}^{-3}$  promoveu o melhor desenvolvimento tanto da parte aérea quanto do sistema radicular da planta. Essas variáveis estão intimamente relacionadas ao tamanho da área foliar, uma vez que a combinação de um solo bem estruturado com adequada disponibilidade de água propicia um crescimento inicial robusto, a produção de folhas e o potencial produtivo da cultura.

Por outro lado, o estresse hídrico compromete a produção de fitomassa da parte aérea, impactando negativamente a expansão da área foliar. Essa resposta fisiológica se dá porque a planta redireciona sua energia para funções essenciais, priorizando sua sobrevivência em condições adversas (Taiz; Zeiger, 2009).

#### **4.6 Massa fresca da parte aérea**

A massa fresca da parte aérea foi afetada pela interação entre os níveis de densidade do solo e as tensões hídricas durante o crescimento inicial do milho. O valor máximo de massa fresca da parte aérea do milho foi alcançado quando as plantas cresceram em uma densidade do solo de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ , associado a uma tensão de água no solo de  $65,2 \text{ cm H}_2\text{O}$  obtendo uma massa fresca de  $2,06\text{g}$  (Figura 11).



**Figura 12.** Massa fresca da parte aérea do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

No que diz respeito ao crescimento e desenvolvimento inicial das plantas de milho, observa-se que a combinação de fatores contribuiu para o máximo desenvolvimento da parte aérea até o período em análise.

Essa constatação pode ser explicada pelas condições do solo, que, em conjunto com a tensão da água, provocaram alterações na distribuição dos poros e favoreceram o desenvolvimento radicular, esse desenvolvimento das raízes, por sua vez, pode estar relacionado a um aumento na biomassa da planta (Jia *et al.*, 2024).

É importante destacar que a redistribuição do solo, ocasionada pela alta densidade e umidade (Colombi *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2023), impacta o crescimento da parte aérea, especialmente nos estágios iniciais do desenvolvimento. Essa situação provoca a diminuição do sistema radicular, o que requer a adoção de manejos alternativos para otimizar o uso do solo.

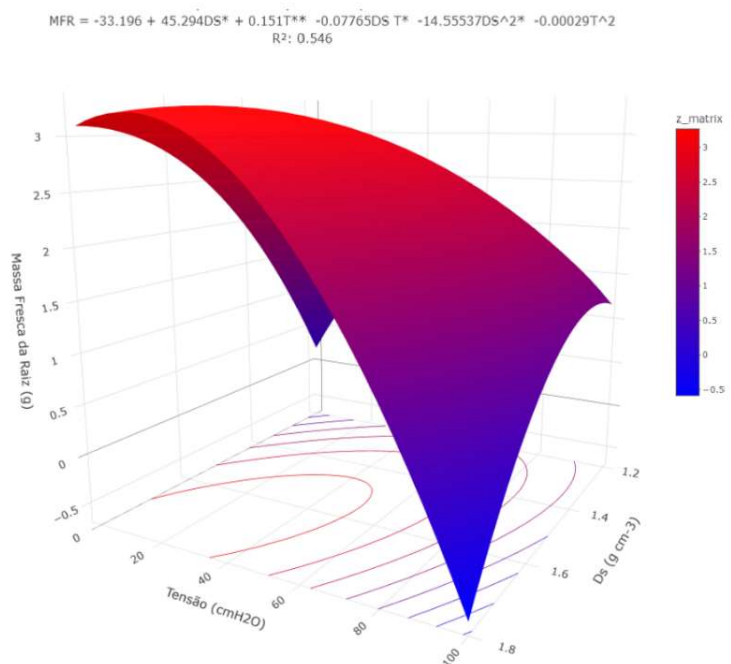
Lourenço *et al.* (2024), em sua pesquisa sobre o crescimento e fisiologia da planta *Peltophorum dubium*, identificaram que a restrição hídrica no solo afeta negativamente o acúmulo de biomassa foliar. As conclusões desse estudo estão ligadas ao mecanismo de defesa das plantas em situações adversas, uma vez que,

conforme Todaka *et al.* (2017), a redução da biomassa fresca está associada à diminuição da turgescência celular, provocando uma queda no potencial hídrico das plantas.

Ademais, solos com alta umidade e submetidos à pressão tendem a ser mais compactos, aumentando a resistência à penetração e dificultando o crescimento radicular, o que reduz a absorção de água e nutrientes essenciais.

#### 4.7 Massa fresca de raiz

A massa fresca das raízes foi afetada pela interação entre os níveis de densidade do solo e as tensões hídricas durante o crescimento inicial do milho. O valor máximo de massa fresca das raízes de 3,3 g foi alcançado quando as plantas cresceram em uma densidade do solo de  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ , associado a uma tensão de água no solo de 81,4 cm H<sub>2</sub>O (Figura 13).



**Figura 13.** Massa fresca da raiz do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$  e \*\* -  $p \leq 0,01$ . DS=densidade do solo.

É importante destacar que, em cultivos com alta densidade, observa-se uma diminuição do espaço poroso entre as partículas do solo. Isso pode dificultar a absorção de nutrientes e água pelas plantas, além de provocar uma queda nos níveis de oxigênio disponíveis, resultando em um menor desenvolvimento das raízes e,

consequentemente, comprometendo a estrutura de sustentação das plantas (Rocha *et al.*, 2023).

Ademais, solos com alta densidade e condições hídricas restritas tendem a prejudicar a formação do sistema radicular. Solos mais secos, por sua vez, impõem maior resistência ao crescimento das raízes (Mondal; Chakraborty, 2023).

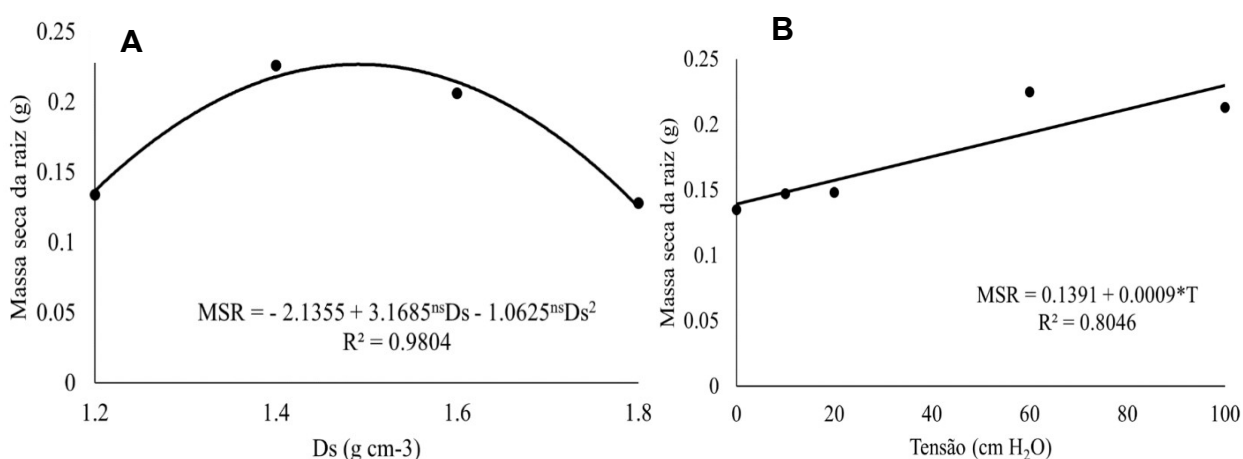
É fundamental entender que o sistema radicular é influenciado tanto pela escassez quanto pelo excesso de água, além de estar sujeito à resistência do solo à penetração das raízes. Essa interação entre solo e água, descrita na curva de resistência do solo, pode ser utilizada para inferir sobre as condições estruturais do solo em relação às resistências críticas que afetam o crescimento das plantas (Xiong *et al.*, 2020).

#### 4.8 Massa seca de raiz

A Massa seca de raiz foi estatisticamente significativa de forma isolada para os fatores estudados, os resultados ajustaram ao modelo de quadrático de regressão para os níveis de densidade do solo e para as os níveis de tensões de água ajustaram ao modelo linear de regressão.

Para o fator nível de densidade do solo, o maior valor de massa seca de raiz foi observado na densidade de 1,49 g cm<sup>3</sup>, com uma produção de 0,23 gramas de massa seca de raiz (Figura 14A). Ressalta-se que essa quantidade é representativa do crescimento inicial do milho, considerando que as plantas ainda não atingiram seu pleno desenvolvimento.

Para os níveis de tensões de água no solo, à medida que se aumentou as tensões de água houve aumento da massa seca de raiz (Figura 14B). Esses resultados podem ser justificados, pois as plantas necessitam de água nos estádios iniciais de crescimento, o que fez que se ocorra maior massa seca de raiz no período estudado.



**Figura 14.** Massa seca da raiz da cultura do milho híbrido P3889R da Pioneer, submetida a níveis de densidade do solo (A) e tensões de água no solo (B). Significativo em \* -  $p \leq 0,05$ ; \* ns - Não significativo. DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

Nesse período, a disponibilidade hídrica adequada favorece a divisão celular, a alongação das raízes e a absorção de nutrientes, contribuindo diretamente para o acúmulo de massa seca radicular (Cruz *et al.*, 2021). Além disso, a água desempenha um papel fundamental na translocação de assimilados, garantindo o suprimento energético necessário para o crescimento das raízes (Bezerra *et al.*, 2017). Dessa forma, a maior massa seca de raiz observada no período estudado pode estar diretamente relacionada à adequada disponibilidade de água, que promove condições favoráveis ao desenvolvimento inicial das plantas.

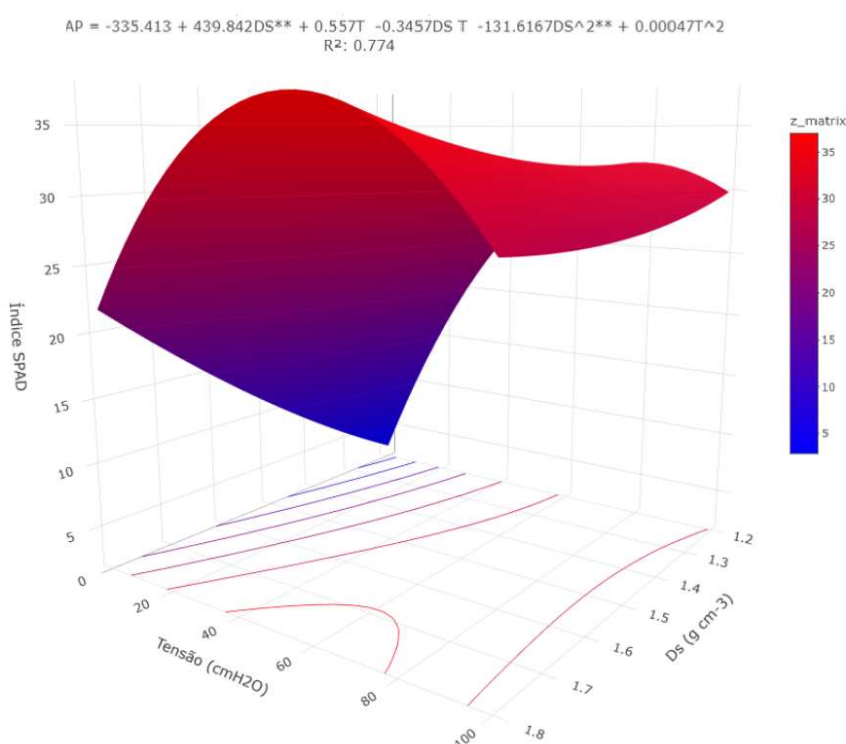
A densidade do solo em níveis de alta resistência ocasiona a diminuição da aeração que pode limitar a taxa de alongamento radicular, retardar o crescimento inicial das raízes secundárias ocasionando sistemas radiculares insuficiente (Colombi *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2022). Reichert *et al.* (2008), descreve que para cada solo há suas características próprias e a partir disso há uma densidade crítica, em que a resistência se torna tão alta que reduz ou impede o crescimento de raízes.

Bezerra (2018) demonstrou em seu estudo que, à medida que as tensões de água no solo aumentavam, ocorria uma redução na massa seca das raízes. Esse resulta foi contrário no que foi visto por esse estudo. Araújo (2019) descreve que a disponibilidade hídrica é um fator abiótico que influencia diretamente no desenvolvimento das plantas e provoca mudanças morfológicas. Assim, o acréscimo das raízes resulta em maior área para absorção de nutrientes e conseqüentemente a absorção de água do solo, o que pode levar ainda mais ao crescimento da planta.

A disponibilidade hídrica é tão crucial quanto a disponibilidade nutricional na fase inicial da planta, uma vez que a carência de ambos pode resultar em perdas significativas de produtividade. A planta requer condições favoráveis para alcançar seu pleno potencial produtivo, o que envolve não apenas a quantidade de água necessária para seu desenvolvimento, mas também uma nutrição adequada (Dias *et al.*, 2019).

#### 4.5 Índice de SPAD

Para a variável Índice de SPAD, os resultados indicaram que houve interação entre a densidade do solo e a tensão de água, influenciando significativamente o índice de SPAD. O índice máximo de SPAD, que atingiu o valor de 31,7, foi registrado em uma densidade de  $1,65 \text{ g cm}^{-3}$  e com uma tensão de água de  $14,52 \text{ cm H}_2\text{O}$  (Figura 11). Segundo Godoy; Villas Bôas (2004) o nível considerado adequado para índice SPAD é de valores acima de 37 unidade.



**Figura 15.** Índice de SPAD do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

A densidade do solo também pode levar à redução da área foliar e da taxa fotossintética (Morales *et al.*, 2020), afetando esse fator, além da síntese de clorofila (Oliveira *et al.*, 2023). Ferreira *et al.* (2018) observaram que maiores valores de índice relativo de clorofila estavam associados a menores densidades do solo, destacando a importância de um sistema radicular eficiente para a absorção de água e nutrientes.

Martin, Cunha e Bulcão (2013) destacam que os teores de clorofila estão diretamente associados a um dos nutrientes mais requeridos pelo milho, o nitrogênio,

cuja taxa de absorção está relacionada à unidade de massa de raiz (Borghetti *et al.*, 2016).

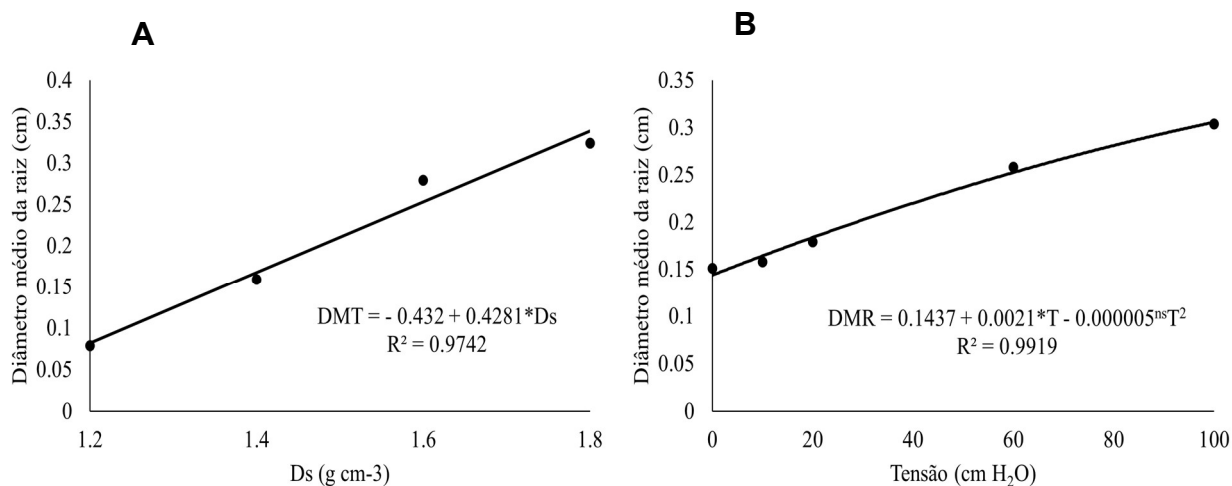
Em contraste com alguns estudos, os resultados obtidos indicam que a maior densidade do solo resultou no maior valor do índice de SPAD, um indicador da quantidade de clorofila nas folhas, quando associada à tensão de água de 14,52 cm H<sub>2</sub>O. Essa aparente contradição pode ser explicada pela influência da água, que juntamente com a alta densidade do solo, permitiu que a planta mantivesse uma alta taxa fotossintética e produção de clorofila (Backes *et al.*, 2010). Esse aumento no índice SPAD, tende a ser maior em folhas menores, visando maximizar a fotossíntese sob condições limitantes de recursos (Oliveira *et al.*, 2021).

É fundamental lembrar que o índice de SPAD, apesar de ser um indicador importante da saúde da planta, não reflete a totalidade do processo de crescimento e desenvolvimento vegetal. A densidade do solo pode afetar outros aspectos do desenvolvimento da planta, como a biomassa da raiz e a área foliar, mesmo que o índice de SPAD seja alto.

#### **4.9 Diâmetro médio da raiz**

A variável diâmetro médio da raiz do milho não apresentou interação entre os fatores, verificando-se significância de maneira isolada para os níveis de densidade do solo e tensões de água, sendo o modelo quadrático de regressão, o que melhor descreve os resultados. Para fator densidade do solo, foi observado que, conforme aumentou os níveis de densidade do solo aumento o diâmetro das raízes do milho (Figura 15 A).

Para o fator tensão de água no solo, a melhor resposta foi apresentada na tensão de 100 cm H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>, produzindo um total de 0,36 cm de diâmetro médio de raiz (Figura 15B). Nota-se que houve incremento para essa variável.



**Figura 16.** Diâmetro médio da raiz da cultura do milho híbrido P3889R da Pioneer, submetida a níveis de densidade do solo (A) e tensões de água no solo (B). Significativo em \* -  $p \leq 0,05$ ; \* ns - Não significativo. DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

Yu *et al.* (2024) investigaram o impacto da compactação do solo no crescimento radicular do trigo, considerando diferentes texturas e níveis de umidade do solo. Os autores descobriram que as plantas cultivadas em solo com densidades de  $1,5 \text{ g/m}^{-3}$  e  $1,3 \text{ g/m}^{-3}$  apresentaram diferença no diâmetro das raízes nas duas classes de solos analisadas.

Entretanto, os resultados obtidos neste experimento assemelham-se das constatações de Yu *et al.* (2024), pois, observou-se que, à medida que a densidade do solo aumentava, o diâmetro das raízes também crescia. Mondal *et al.* (2023) acrescentam que o alto nível de densidade da superfície do solo resulta em raízes mais curtas e com diâmetro e área de superfície reduzidos. Eles também reforçam que solos com maior teor de argila podem atenuar os efeitos adversos do alto nível de densidade, devido à sua capacidade de retenção de umidade, favorecendo o crescimento radicular.

No entanto, os efeitos da densidade do solo observados neste estudo contrastam com essas afirmações. Os resultados revelaram que a densidade não influenciou o diâmetro médio das raízes de milho. A habilidade dos solos argilosos em mitigar os efeitos do alto nível de densidade, conforme mencionado por Mondal *et al.* (2023), pode ser compreendida levando em conta que o solo em questão é um solo franco-argilosos (34,5%), proporcionando um nível de umidade suficiente para o desenvolvimento inicial do sistema radicular do milho.

Gao *et al.* (2024) ressaltam em suas pesquisas que altos teores de água na camada superior do solo estimulam o crescimento das raízes de milho, especialmente em relação ao diâmetro das raízes. Vanhees *et al.* (2021) também observam que raízes mais grossas com diâmetro superior a 1 mm são vantajosas, e no presente estudo, foram registrados diâmetros das raízes maiores do que os mencionados pelos autores. O que sugere que as raízes analisadas têm uma característica diferenciada, possivelmente mais vantajosa, em comparação ao que foi previamente descrito. Isso pode indicar um potencial superior das raízes em relação às mencionadas no estudo dos autores citados.

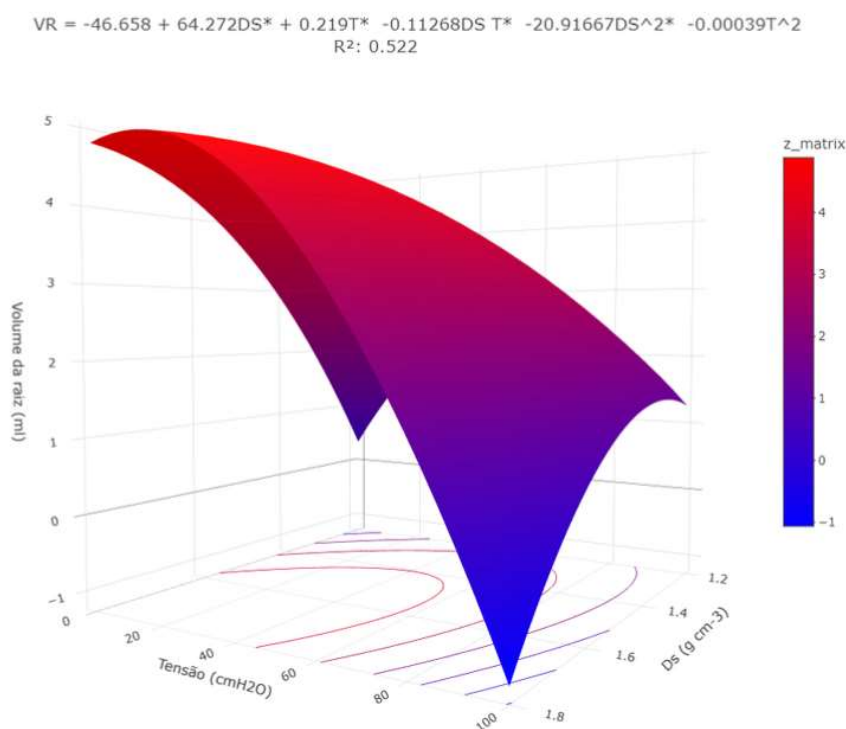
Adicionalmente, Colombi *et al.* (2018) destacam que sistemas radiculares mais rasos favorecem a absorção de água nas camadas superficiais do solo. Além disso, características anatômicas das raízes, como um aumento do diâmetro das células corticais, têm sido associadas à redução do consumo de energia sob condições adversas no solo (Leuther *et al.*, 2025).

O aumento linear do diâmetro médio das raízes em relação à tensão da água no solo pode ser atribuído ao fato de que as raízes tendem a se concentrar nas camadas superficiais do solo, onde há maior disponibilidade de água. Além disso, raízes com diâmetros menores apresentam uma maior eficiência na absorção de água, devido à sua maior área superficial em comparação com raízes mais espessas. Esse atributo permite que as raízes finas consigam capturar mais água e nutrientes do solo, o que é essencial para a sobrevivência das plantas em condições de escassez hídrica (Salvi Kohn *et al.*, 2016).

Wasaya *et al.* (2018) observam que plantas com raízes de diâmetro maior tendem a apresentar um crescimento mais significativo do que aquelas com raízes mais finas. Esse potencial de crescimento está diretamente relacionado à absorção de água, o que, por sua vez, aumenta a resiliência das plantas em condições adversas de solo. Raízes mais desenvolvidas geralmente têm uma maior capacidade de permeabilidade, permitindo uma absorção de água mais eficiente. Assim, entender esse processo é crucial, especialmente em solos que enfrentam déficits de água e nutrientes, acentuado pela crescente variabilidade climática nos sistemas agrícolas.

#### 4.10 Volume de raiz

A variável volume de raiz apresentou uma influência significativa decorrente da interação entre os fatores avaliados, apresentando o melhor resultado de volume de raiz de 4,9 ml na interação entre o nível de densidade do solo de 1,28 g cm<sup>-3</sup>, e a tensão de água no solo de 94,5 cm H<sub>2</sub>O (Figura 16).



**Figura 17.** Volume de raiz (cm) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

Para um crescimento radicular eficiente, é essencial que o ambiente físico do solo seja adequado, proporcionando condições favoráveis para o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, da planta como um todo (Mottin *et al.*, 2022). Este estudo confirma essa premissa, evidenciando que o alto nível de densidade do solo reduz o espaço poroso, limita a entrada de oxigênio e dificulta a penetração das raízes. Além disso, o alto nível de densidade retém a água com maior força, restringindo sua disponibilidade para as plantas.

Esse resultado sugere que existe uma faixa ideal de densidade do solo e disponibilidade hídrica que favorece o crescimento das raízes. Nesse intervalo, as raízes conseguem se desenvolver sem enfrentar limitações mecânicas que possam

dificultar sua expansão, além de garantir um acesso adequado à água, evitando a restrição desse recurso essencial para o desenvolvimento da planta.

Estudos anteriores reforçam essa relação. Souza *et al.* (2024) observaram uma redução de 52,60% no volume radicular quando compararam solos de menor e maior densidade, corroborando com os resultados de Calonego *et al.* (2011). Da mesma forma, Rocha *et al.* (2023) verificaram que a densidade do solo influenciou diretamente o volume radicular das forrageiras analisadas, apresentando menor volume nas camadas superiores em condições de maior densidade.

As raízes desempenham um papel crucial na sustentação da planta, além de serem responsáveis pela absorção de água e nutrientes, essenciais para o metabolismo vegetal (Batista *et al.*, 2018). Dessa forma, a umidade do solo é um fator determinante, pois regula o alongamento das raízes e sua capacidade de acessar os recursos hídricos disponíveis (Colombi *et al.*, 2018).

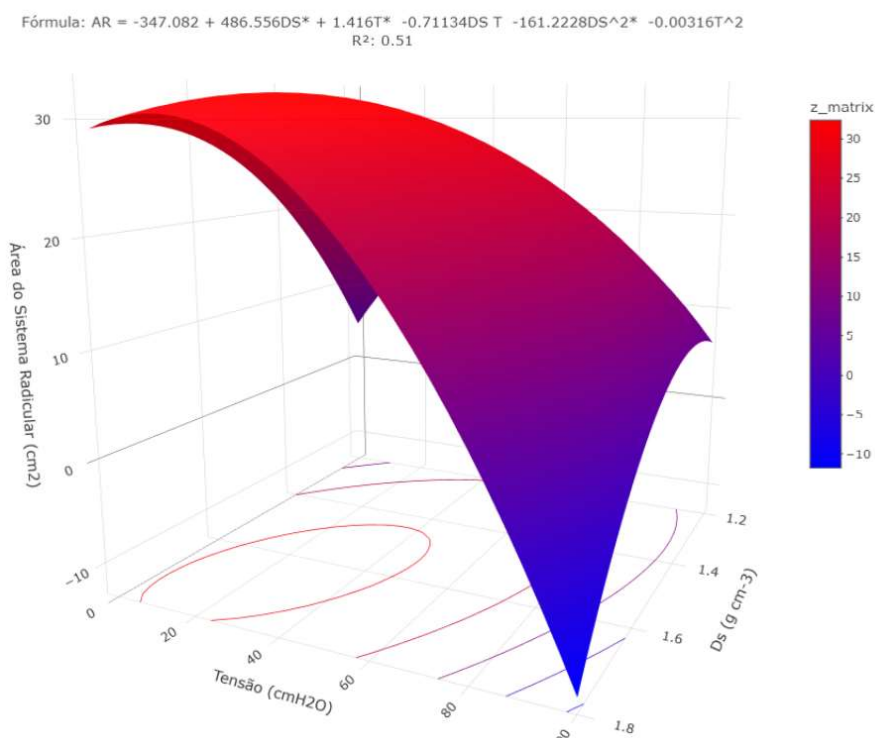
Koetz *et al.* (2017) observaram um maior volume radicular de 258 cm<sup>3</sup> vaso<sup>-1</sup> em capim-paiaguás (*Brachiaria brizantha*) cultivado sob uma tensão de 31 kPa, reforçando a importância da interação entre umidade e densidade do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Colombi *et al.* (2018), que destacaram a umidade do solo como um fator determinante para a expansão das raízes e a disponibilidade hídrica. No entanto, esses autores ressaltam que as interações entre resistência à penetração do solo, desenvolvimento do sistema radicular, absorção de água e produtividade das culturas ainda são pouco exploradas na literatura, evidenciando a necessidade de mais estudos nessa área.

Portanto, o incremento do sistema radicular do milho pode ser atribuído à expansão radial das raízes (Benevenuto; Silva; Costa, 2020), uma alteração morfológica que favorece o crescimento das raízes laterais em direção horizontal, melhorando a absorção de água e o suporte da planta.

#### **4.11 Área do sistema radicular**

A variável área do sistema radicular apresentou uma influência significativa decorrente da interação entre os fatores, apresentando um total de 32,36 cm<sup>2</sup> de área do sistema radicular da cultura do milho. A interação entre o nível de densidade do

solo de  $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ , e a tensão de água no solo de  $72,03 \text{ cm H}_2\text{O}^{-1}$  foram as que proporcionaram o maior resultado (Figura 17).



**Figura 18.** Área do Sistema radicular ( $\text{cm}^2$ ) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

O alto nível de densidade no solo é um fator determinante na restrição do crescimento radicular das plantas. Conforme destacado por Gavlak, Filipaki, Florentino (2024), solos com elevada densidade dificultam a penetração das raízes, limitando sua exploração e, conseqüentemente, a absorção de água e nutrientes. Pereira, Herling, Silva (2020) complementam que essa condição afeta não apenas a profundidade, mas também a ramificação e a distribuição do sistema radicular no perfil do solo.

No presente estudo, o melhor resultado indica que houve uma condição do ambiente favorável ao desenvolvimento das raízes.

Santos *et al.* (2018) destacam que solos com alta densidade retardam o crescimento das culturas, induzem a má formação radicular e aumentam a resistência mecânica do solo, prejudicando a expansão do sistema radicular.

Sistema radicular mais profundo e desenvolvido consegue absorver maior quantidade hídrica pelo solo e favorece o desenvolvimento da planta, refletindo positivamente na produtividade (Viana, 2024).

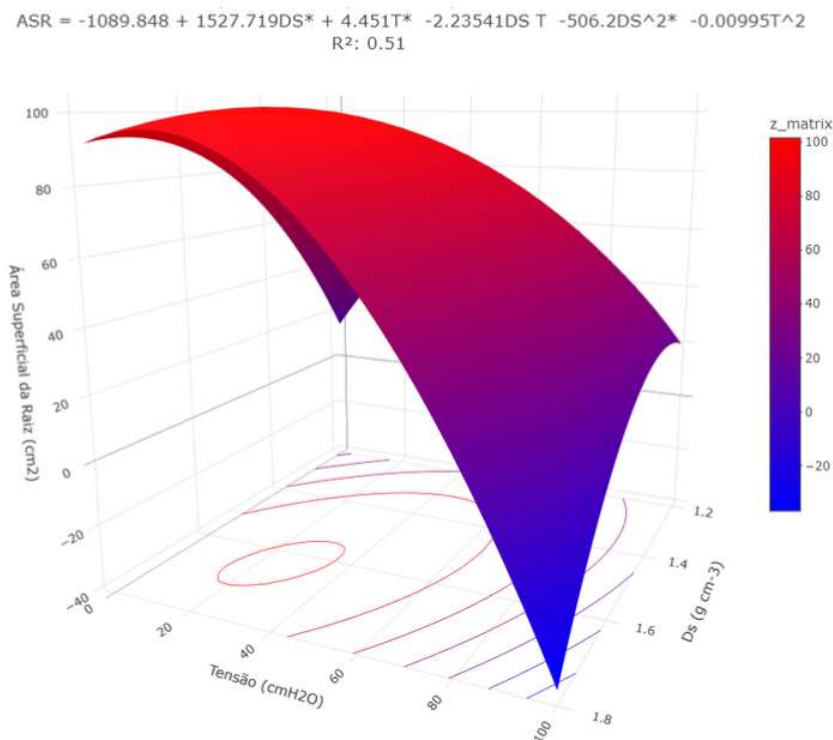
Os resultados são reforçados pelo estudo de Yu *et al.* (2024) com trigo, que evidenciou reduções significativas no comprimento, volume e área superficial das raízes em solos com densidade de  $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ . Da mesma forma, Bergamin *et al.* (2010) observaram menor crescimento da área radicular em solos com densidade superior a  $1,8 \text{ g m}^{-3}$ .

Além da densidade, a disponibilidade hídrica influencia significativamente a distribuição radicular. Lynch (2011) afirma que as raízes tendem a se concentrar em camadas superficiais quando há maior disponibilidade de água e nutrientes. Wu *et al.* (2016) reforçam essa ideia, destacando que 50 a 80% das raízes do milho se concentram na faixa de 0 a 20 cm do solo.

Os resultados encontrados neste estudo destacam a importância de um manejo adequado da compactação do solo, com o objetivo de reduzir tanto a densidade quanto a umidade do solo, fatores que influenciam diretamente o desenvolvimento das raízes do milho. O manejo pode incluir práticas como rotação de culturas, controle do tráfego de máquinas, aração e subsolagem, e a adição de matéria orgânica para melhorar a estrutura do solo. Solos com densidade moderada, entre  $1,2$  e  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , e disponibilidade hídrica equilibrada promovem a formação de uma área radicular mais extensa e eficiente, o que, por sua vez, impacta positivamente no desempenho fisiológico e na produtividade da cultura.

#### **4.12 Área superficial da raiz ( $\text{cm}^2$ )**

A área superficial da raiz foi afetada pela interação entre os níveis de densidade do solo e as tensões hídricas durante o crescimento inicial do milho. O valor máximo da área superficial da raiz de  $101,6 \text{ cm}^2$  foi alcançado quando as plantas cresceram em uma densidade do solo de  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ , associado a uma tensão de água no solo de  $72 \text{ cm H}_2\text{O}$  (Figura 18).



**Figura 19.** Área superficial da raiz (cm<sup>2</sup>) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

A superfície radicular da raiz é uma característica dependente do comprimento e do diâmetro radicular. Plantas que apresenta comprimento e diâmetro menores, consequentemente refletirá na área de superfície da raiz, ademais, são parâmetros cruciais, pois impactam diretamente na qualidade das raízes (Santos *et al.*, 2025).

A combinação dos fatores densidade e tensões de água no solo, favorecem o crescimento do sistema radicular da planta do milho, uma vez que, as raízes da planta em situações adversa são forçadas a entrar em poros de solo de tamanho semelhante durante o seu crescimento e como consequência são alterados com a expansão das raízes (Jia *et al.*, 2024). Esse resultado faz com que seja formado novos poros com os arranjos das partículas do solo.

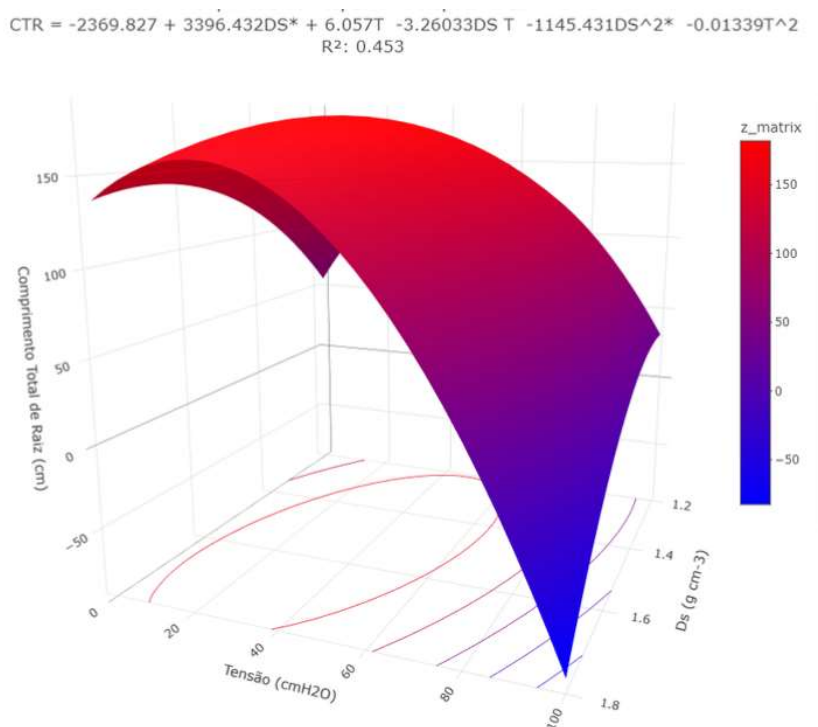
Portanto, as raízes das plantas alteram o ambiente do solo para obter água e nutrientes. Em situações contraria a planta pode ser afetada pelo seu desenvolvimento, o transporte e a absorção de nutrientes pelas plantas.

No estudo de Zhu *et al.* (2016), a irrigação aumentou a área superficial das raízes, demonstrando que a disponibilidade hídrica potencializa o crescimento radicular e, consequentemente, a eficiência na absorção de recursos.

França; Sodré Filho (2025) descreve em seus resultados que, raízes de maior proporção fina afeta a fixação no solo, ademais, maior essa proporção, maior a área de superfície da raiz. Para Jia et al. (2018), em condições inadequadas para o desenvolvimento, como solo compactado, baixa disponibilidade de água ou nutrientes, as raízes das plantas apresentam a capacidade de se adaptar, modificando sua morfologia e fisiologia para enfrentar essas adversidades e continuar seu crescimento.

#### 4.13 Comprimento total de raiz

O comprimento total de raiz apresentou interação entre os fatores estudado, sendo o resultado representado pela superfície de resposta. Em que os níveis de densidade do solo de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ , e as tensões do solo de  $55,3 \text{ cm H}_2\text{O}$  foram as combinações que apresentaram o maior comprimento total de raiz da planta, sendo o valor de  $181,7 \text{ cm}$  (Figura 19).



**Figura 20.** Comprimento total da raiz (cm) do milho híbrido P3889R da Pioneer, em função das combinações de níveis de densidade do solo e tensões de água no solo. Significativo a \* -  $p \leq 0,05$ . DS=densidade do solo. T= tensão de água no solo.

A densidade elevada do solo pode prejudicar o desenvolvimento das raízes e, por consequência, a produtividade das plantas. Um estudo realizado por Yu *et al.* (2024) demonstrou que o comprimento das raízes do trigo foi afetado em uma densidade de  $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$ .

No presente estudo, a maior densidade avaliada foi de  $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ , mas constatou-se que uma densidade de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  possibilitou o maior comprimento das raízes, indicando que até esse nível as raízes de milho não foram significativamente impactadas pelo alto nível de densidade no solo.

Em situações em que as plantas enfrentam dificuldades para crescer em profundidade, suas raízes tendem a sofrer alterações morfológicas. Essas adaptações ocorrem porque, diante da dificuldade de penetração no solo, as raízes podem desenvolver um formato especial, tornando-se mais finas e tortuosas, o que facilita a busca por água e nutrientes (Santos *et al.*, 2018).

Conforme observado por Rocha *et al.* (2023), cultivos em solos com alta densidade apresentam menor espaço poroso entre as partículas, resultando em uma diminuição na absorção de nutrientes e na capacidade de armazenamento de água. Além disso, a limitação na difusão de oxigênio pode comprometer a estrutura de sustentação das plantas, afetando diretamente seu crescimento e desenvolvimento.

Dentro desse contexto, a resistência mecânica do solo à penetração das raízes também se revela um fator crucial na formação do sistema radicular das plantas. Segundo Sales *et al.* (2021), solos excessivamente compactados podem causar estresses hídricos e nutricionais, agravando o metabolismo vegetal. Por outro lado, densidades moderadas podem estimular a ramificação das raízes, promovendo uma maior eficiência na absorção de recursos.

Ademais, é fundamental considerar a interação entre a densidade do solo e a tensão de água na avaliação do crescimento radicular. Pesquisas indicam que solos com alta densidade podem ter uma menor capacidade de retenção de água em determinadas condições, o que intensifica os efeitos do alto nível de densidade sobre o desenvolvimento das plantas (Broch, 2019).

## 5. CONCLUSÕES

A combinação das tensões de água e densidade do solo influenciou de maneira significativa o crescimento inicial das plântulas de milho. A interação entre essas variáveis resultou em um desempenho superior nas variáveis analisadas, como área foliar, índice SPAD e acúmulo de massa fresca tanto na parte aérea quanto nas raízes.

A densidade de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  associada à tensão de água de  $65,2 \text{ cm H}_2\text{O}$  promoveu o melhor crescimento na parte aérea, enquanto densidades de  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$  e  $1,49 \text{ g cm}^{-3}$  proporcionaram os melhores resultados para a massa fresca e seca das raízes. Além disso, as tensões de água de  $72,03 \text{ cm H}_2\text{O}$  e  $94,5 \text{ cm H}_2\text{O}$  favoreceram as maiores áreas e volumes radiculares.

Os resultados indicam que a combinação adequada de densidade do solo e tensão de água pode otimizar o crescimento inicial das plântulas de milho, ressaltando a importância de ajustar essas variáveis para alcançar o melhor desenvolvimento das plantas sob diferentes condições de cultivo.

A combinação ideal observada foi a densidade de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  e a tensão de água de  $65,2 \text{ cm H}_2\text{O}$  para o crescimento da parte aérea, enquanto as densidades de  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$  e  $1,49 \text{ g cm}^{-3}$  com tensões de  $72,03 \text{ cm H}_2\text{O}$  e  $94,5 \text{ cm H}_2\text{O}$  foram mais favoráveis ao crescimento radicular.

## REFERÊNCIAS

**ALI, L.; XIUKANG, W.; NAVEED, M.; ASHRAF, S.; NADEEM, S. M.; HAIDER, F. U.; MUSTAFA, A.** Impact of biochar application on germination behavior and early growth of maize seedlings: insights from a growth room experiment. *Applied Sciences*, v. 11, n. 24, p. 11666, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112411666>.

**ALMEIDA, F. S. de et al.** Compactação do solo em áreas agrícolas e seus efeitos sobre o crescimento radicular. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 4, p. 123-132, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000400012.

**ANDRADE, J. A.; SOUZA, Z. M.; ALMEIDA, J. A.** Modelagem do Movimento de Água no Solo: Aplicações em Estudos Ambientais. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 150-158, 2008.

**ARAÚJO JÚNIOR, G.; GOMES, F. T.; SILVA, M. J. da; JARDIN, A. M. da R. F.; SIMÕES, V. J. L. P.; IZIDRO, J. L. P. S.; LEITE, M. L. de M. V.; TEIXEIRA, V. I.; SILVA, T. G. F. da.** Estresse hídrico em plantas forrageiras: uma revisão. *Pubvet*, [s. l.], v. 13, n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v13n01a241.1-10>.

**ABNT.** NBR 12007: Solo – ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990.

**BACKES, C.; VILLAS BÔAS, R. L.; LIMA, C. P.; DE GODOY, L. J. G.; BÜLL, L. T.; MARQUES, S. A. J.** Estado nutricional em nitrogênio da grama esmeralda avaliado por meio do teor foliar, clorofilômetro e imagem digital, em área adubada com lodo de esgoto. *Bragantia*, v. 69, n. 3, p. 661-668, 2010.

**BARROS, G.; CALADO, J.** Eficiência no cultivo de milho: multiplicação e produtividade. *Revista Brasileira de Agricultura Sustentável*, v. 4, n. 2, p. 23-30, 2014.

**BATISTA, M. A.; INOUE, T. T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A. S.** Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R., comps. *Hortaliças-fruto* [online]. Maringá: EDUEM, 2018, p. 113-162. ISBN: 978-65-86383-01-0.

**BENDIX, A. M. et al.** Soil water tension and plant physiological processes: A review. *Journal of Experimental Botany*, v. 70, n. 2, p. 349-361, 2019.

**BENDIX, J. et al.** Impact of soil water tension on plant growth and nutrient uptake. *Soil Science Reviews*, v. 45, n. 1, p. 56-69, 2019.

**BENEVENUTE, P. A.; SILVA, V. R.; COSTA, A. C. S.** Compactação do solo e suas implicações na dinâmica do sistema radicular e no crescimento de culturas agrícolas. In: **BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.** *Root growth and function in relation to soil compaction*. Advances in Agronomy, v. 164, p. 43–79, 2020.

**BENINCASA, M. M. P.** Análise de crescimento de plantas: noções básicas. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 42 p.

**BEUTLER, A. N., & CENTURION, J. F.** (2007). Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(6), 827-834.

**BEZERRA, B. K. L.; ALVES, D. A. D. S.; GERMINO, G. H.; LIMA, J. É. S. S. I. C. A. de; BIANCHI, L.; BROETTO, F.** O estresse das plantas: Teoria & prática. 2. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2017. Cap. 2, p. 25-46. ISBN 978-85-7983-888-0.

**BORGHI, E.; WILDA, L.; RESENDE, A. D.; PEREIRA FILHO, A.; RODRIGUES, R.** Índice de vegetação, teor de clorofila e eficiência de uso de nitrogênio por híbridos de milho. In: Embrapa Milho e Sorgo. In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 31., 2016. Milho e sorgo: inovações, mercados e segurança alimentar: Anais... Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.

**BROCH, Djulia Taís.** Propriedades físico-hídricas de latossolos sob plantio direto e sua relação com a trabalhabilidade. 2019. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2019.

**CALONEGO, J. C.; GOMES, T. C.; SANTOS, C. H.; TIRITAN, C. S.** Desenvolvimento de plantas de cobertura em solo compactado. *Bioscience Journal*, v. 27, n. 2, p. 289-296, mar./abr. 2011.

**CHERUBIM, M. R.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.** Impactos do manejo do solo sobre a compactação e a penetração radicular em sistemas agrícolas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1148-1156, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900009>.

**CINTRA, F.L.D.; PORTELA, J.C.; NOGUEIRA, L.C.** Caracterização física e hídrica em solos dos Tabuleiros Costeiros no Distrito de Irrigação Platô de Neópolis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 8, n. 1, p. 45-50, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000100007>.

**COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, A.; KELLER, T.** Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth—A vicious circle. *Science of the Total Environment*, v. 626, p. 1026-1035, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>.

**CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO.** Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2021/2022. 6º. Levantamento históricas. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=20>. Acesso em: 08 out. 2024.

**CRUZ, N. T.; PIRES, A. J. V.; FRIES, D. D.; JARDIM, R. R.; LANA SOUSA, B. M. de; DIAS, D. L. S.; SACRAMENTO, M. R. S. V. do.** Fatores que afetam as características morfogênicas e estruturais de plantas forrageiras. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 7, p. e5410716180-e5410716180, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16180>.

**DARBY, H.; LAUER, J.** Plant height and yield in maize hybrids: impact of genotype and management. *Agronomy Journal*, v. 105, n. 2, p. 275-284, 2013. DOI: 10.2134/agronj2013.0012.

**DIAS, M. S.; REIS, L. S.; LIMA, I. R. V.; OLIVEIRA, A. W.; SANTOS, R. H. S.; ALMEIDA, C. A. C.; SILVA, V. M.** Eficiência do uso da água pela cultura do amendoim sob diferentes lâminas de irrigação e adubação. *Colloquium Agrariae*, Presidente Prudente-SP, v. 2, n. 15, p. 72-83, 2019. DOI: 10.5747/ca.2019.v15.n1.a286.

**DURAN, L.; et al.** Water management and tension in semi-arid regions: improving water use efficiency. *Agricultural Water Management*, v. 85, n. 3, p. 110-120, 2021.

**DURAN, R. F. K. T. et al.** Soil water tension management for improving water use efficiency in semi-arid agricultural regions. *Agricultural Water Management*, v. 247, p. 105-115, 2021.

**EMBRAPA.** Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997. 212p.

**EMBRAPA.** Curva de retenção de água no solo. Brasília, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/56415/1/curvaretencao.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2025.

**EMBRAPA.** Sensor para monitoramento da tensão da água no solo. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/2068/sensor-para-monitoramento-da-tensao-da-agua-no-solo>. Acesso em: 18 mar. 2025.

**FARIAS, L. N.; SILVA, E. M.; SOUZA, W. P.; VILARINHO, M. K. C.; SILVA, T. J. A.; GUIMARAES, S. L.** Características morfológicas e produtivas de feijão guandu anão cultivado em solo compactado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 5, p. 497-503, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000500005>.

**FERREIRA, D.F.** SISVAR: Um sistema computacional de análise para experimentos do tipo split plot com efeitos fixos. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

**FISHER, L. L., KELLER, G. E., & GOEBEL, W.** (2012). Soil structure, compaction, and the physical environment of plant growth. *Agronomy Journal*, 104(1), 112-118.

**FRANÇA, C. D. de; FILHO, J. S.** Potentiality of Bambusa, Phyllostachys and Urochloa species to vegetate degraded areas. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 45, e201902259, p. 1-12, 2025. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.4336/2025.pfb.45e202202259>.

**GAO, J.; ZHANG, Y.; XU, C.; WANG, P.; HUANG, S.; LV, Y.** Melhoria da coordenação espacial e temporal da água do solo e do crescimento radicular para melhorar a

produtividade do milho (*Zea mays* L.). *Agricultural Water Management*, v. 294, p. 108728, 1 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108728>.

**GAO**, Y. et al. Root traits and nutrient acquisition strategies of crop plants. *Field Crops Research*, v. 185, p. 101-108, 2015.

**GARCIA**, W. A. Emergência e vigor de sementes de milho varietal submetidas a diferentes tensões hídricas do solo. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/5150>. Acesso em: 17 set. 2024.

**GAVLAK**, G.; **FILIPAKI**, F.; **FLORENTINO**, R. W. Qualidade do Solo em Ambientes Florestais: Uma avaliação investigativa dos atributos físicos do solo. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 12, n. 1, p. 151-168, 2024.

**GENERO**, A. F. C.; **SAMPAIO**, A.; **GIBOSKI**, F. J.; **ANHOLETO**, G. L.; **ANGHINONI**, V.; **LAJÚS**, C. R.; **ANASTÁCIO**, T. C. Tecnologia e gestão da inovação em sistemas de produção sustentáveis. Desenvolvimento radicular de milho com diferentes métodos de inoculação. In: *Tecnologia e Gestão da Inovação em Sistemas de Produção Sustentáveis*. Editora EPTEC, cap. 4, 2023, p. 165-175, ISBN: 978-65-00-70782-3.

**GHEORGHE**, M., **OPRIŞ**, I., & **POPESCU**, M. (2018). Application of soil water retention properties to predict soil compaction in agricultural fields. *Soil Science Society of America Journal*, 82(4), 832-844.

**GODOY**, L. J. G.; **VILLAS BÔAS**, R. L. Doses de nitrogênio na produção de tapetes de grama esmeralda (*Zoysia japonica*). In: *FERTBIO 2004*, Lages. Anais... Lages, SC: UDESC/SBCS, 2004.

**GOMES**, L. F.; **SILVA**, E. C.; **FERREIRA**, A. S. Influência da rotação de culturas na qualidade do solo em sistemas de produção sustentável. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, p. 1-10, 2021. DOI: 10.1590/1806-9657rbc2021.

**GOTARDO**, R.; **PINHEIRO**, A.; **KAUFMANN**, V.; **PIAZZA**, G. A.; **TORRES**, E. Comparação entre curvas de retenção de água obtidas em laboratório e a campo. *Irriga*, v. 24, n. 1, p. 125–142, 2019. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3570>. Acesso em: 18 mar. 2025.

**GUIMARÃES**, C. V.; **ASSIS**, R. L. de; **SIMON**, G. A.; **PIRES**, F. R.; **FERREIRA**, R. L.; **SANTOS**, D. C. dos. Desempenho de cultivares e híbridos de milho em solo submetido a compactação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, n. 17, p. 1189-1194, 2013. DOI: 10.1590/S1415-43662013001100009.

**GUIMARÃES**, P. S.; **ROCHA**, D. S.; **PATERNIANI**, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. *Evidencia*, Joacaba, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18593/eba.v19i1.20201>.

**JIA**, Y.; **HUAN**, H.; **ZHANG**, W.; **WAN**, B.; **SOL**, J.; **TU**, Z. Mecanismos de infiltração no solo sob perturbação radicular de plantas em campos áridos e semiáridos e a

resposta do transporte de solutos em solo rizosférico. *Science of the Total Environment*, v. 957, p. 177633, 20 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177633>.

**KELLER, T.; COLOMBI, T.; RUIZ, S.; MANALILI, M. P.; REK, J.; STADELMANN, V.; WUNDERLI, H.; BREITENSTEIN, D.; REISER, R.; OBERHOLZER, H.; SCHYMANSKI, S.; ROMERO-RUIZ, A.; LINDE, N.; WEISSKOPF, P.; WALTER, A.; OR, D.** Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. *Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*, v. 16, n. 4, p. 1-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2016.reviewers>.

**KAHLON, M., HOMAE, M., & SCHOUPS, G.** (2021). Using soil water retention properties to predict bulk density in agricultural soils. *Soil & Tillage Research*, 207, 104-115.

**KOETZ, M.; BÄR, C. E. L.; PACHECO, A. B.; CASTRO, W. D.; CRISOSTOMO, W. L.; SILVA, E. D.** Production and water use efficiency of Paiaguás grass under soil water tension. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 11, n. 1, p. 1223-1232, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n100571.

**LACERDA, C. F.; FERREIRA, J. F. S.; LIU, X.; SUAREZ, D. L.** Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 201, p. 192-202, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12145>.

**LEUTHER, F.; ISESKOG, D.; KELLER, T.; LARSBO, M.; PANDEY, B. K.; COLOMBI, T.** A circuncisão da raiz reduz a resistência mecânica à penetração do solo. *Planta, Célula e Meio ambientes*, v. 48, p. 1608-1620, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.15219>.

**LI, Z., WANG, H., & ZHAO, L.** (2016). Relationship between soil compaction and water retention in different soil textures. *Geoderma*, 285, 123-130.

**LIMA, R. S.; RIBEIRO, T. J.** Adaptações do sistema radicular de milho sob diferentes níveis de compactação do solo e tensões de água. *Soil and Crop Science*, v. 10, n. 3, p. 231-246, 2020.

**LIU, H.; COLOMBI, T.; JÄCK, O.; KELLER, T.; WEIH, M.** Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. *Science of the Total Environment*, v. 807, p. 1507632, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150763>.

**LIU, M.; JIANG, Y.** Genotypic variation in growth and metabolic responses of perennial ryegrass exposed to short-term waterlogging and submergence stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 95, p. 57-64, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.008>.

**LOURENÇO, L. F. G.; GUERREIRO, R. G. DE O.; ROMAGNOLO, M. B.; PASTORINI, L.; SOUZA, L. A.** de. Efeito do alagamento e da seca sobre o crescimento e fisiologia de *Peltophorum dubium* (Fabaceae). *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 17,

p. e12664, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n.Especial.e12664>.

**LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; CÁSSARO, F. A. M.** Curva de retenção de água no solo pelo método do papel filtro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 6, p. 1957-1973, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600013>.

**LYNCH, J. P.** Root strategies for nutrient acquisition and use in maize. *Field Crops Research*, v. 70, p. 93-102, 2013.

**LYNCH, J. P.** Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. *Plant Physiology*, v. 156, n. 3, p. 1041-1049, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175414>.

**MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.** Cultivo do milho: germinação e emergência. *Comunicado Técnico 39*, Embrapa milho e sorgo, Sete Lagoas, MG, 2002. ISSN 1679-0162.

**MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; ALVES, J. D.** Morfologia e fisiologia do milho: bases para produtividade. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. SSN 1679-1150.

**MARTIN, T. N.; CUNHA, V. S.; BULCAO, F. P.** Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho como precursor de melhorias na produtividade. *Cultivar Grandes Culturas*, v. 1, p. 36-38, 2013. ISSN 1518-4269.

**MARTINS, A. C.; MEDEIROS, A. C.; RIBEIRO, R. L.** A subsolagem e seu impacto na redução da compactação do solo. *Revista de Agricultura e Ambiente*, v. 18, p. 88-96, 2020. DOI: 10.1590/1807-1925raav2020.

**McGRATH, G. J. et al.** Understanding soil water potential for water resource management. *Journal of Hydrology*, v. 539, p. 125-136, 2016.

**McPHEE, J. E.; VENABLES, W. N.; COX, W. J.** Soil compaction effects on maize root architecture and water uptake. *Agricultural Water Management*, v. 241, e106386, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106386.

**MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; CONCEIÇÃO, B. P. S.** Curva de retenção de água elaborada pelo método do psicrômetro para uso na determinação do índice "S" de qualidade física do solo. *Engenharia Agrícola*, v. 35, n. 5, p. 959-966, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n5p959-966/2015>.

**MODOLO, A. J. et al.** Influência do estado de compactação do solo sobre a germinação e o desenvolvimento inicial de plantas. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 2, p. 345-355, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000200015.

**MONDAL, S.; CHAKRABORTY, D.** Root growth and physiological responses in wheat to topsoil and subsoil compaction with or without artificial vertical macropores. *Heliyon*, v. 9, n. 8, p. e18834, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18834>.

**MORALES, F.; ANCÍN, M.; FAKHET, D.; GONZÁLEZ-TORRALBA, J.; GÁMEZ, A. L.; SEMINARIO, A.; ARANJUELO, I.** Photosynthetic metabolism under stressful growth conditions as a basis for crop breeding and yield improvement. *Plants*, v. 9, n. 1, p. 88, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9010088>.

**MORETTI, M. L.** Disponibilidade de água no solo às plantas. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Disponível em: [https://www.moretti.agrarias.ufpr.br/fundamentos\\_h\\_i\\_d/U09.disponibilidade\\_de\\_agua\\_no\\_solo\\_as\\_plantas.pdf](https://www.moretti.agrarias.ufpr.br/fundamentos_h_i_d/U09.disponibilidade_de_agua_no_solo_as_plantas.pdf). Acesso em: 18 mar. 2025.

**MOTTIN, M. C.; SEIDEL, E. P.; RIBEIRO, L. L. O.; PAN, R.; FEY, E.; ROSSET, J. S.** Efeito do cultivo de milho consorciado com plantas de cobertura na produção de massa seca e nas propriedades físicas do solo. *Conjecturas*, v. 22, n. 9, p. 70-91, 2022. DOI: 10.53660/CONJ-1422-AG13.

**NASCIMENTO, P. dos S.; BASSOI, L. H.; PAZ, V. P. da S.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. de M.; MANIERI, J. M.** Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. *Irriga*, v. 15, n. 2, p. 193–207, 2010. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/19>. Acesso em: 18 mar. 2025.

**NOGUEIRA, J. S.; MANFREDI, V.** Alterações no sistema radicular de plantas cultivadas em solos compactados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 18, n. 5, p. 671-675, 1983.

**OBOUR, P. B.; UGARTE, C. M.** Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years. *Soil and Tillage Research*, v. 213, p. 105125, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2021.105125.

**OLIVEIRA, M. B.; MENEZES, J. F. S.; ROBERTI, G.; PRADO FERREIRA, M. DO; POLICARPO, V. H. C.; OLIVEIRA, A. M. de; MENEZES, C. C. E. de.** Produção de biomassa e teores de clorofila de plantas de cobertura em solos compactados. *Research, Society and Development*, v. 12, n. 4, p. e22612441171-e22612441171, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.41171>.

**OLIVEIRA, N. T.; PIRES, A. J. V.; BATATAS FRITAS, D. D.; OLIVEIRA, R. R.; SOUSA, B. M. De L.; DIAS, D. L. S.; BONOMO, P.; OLIVEIRA, B. L. P.; SACRAMENTO, M. R. S. V. Do.** Fatores que afetam as características morfogênicas e estruturais das plantas forrageiras. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 10, n. 7, p. e5410716180, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.16180.

**PACHECO, L. P.; SÃO MIGUEL, A. S. D. C.; BOMFIM-SILVA, E. M.; SOUZA, E. D. de; SILVA, F. D. da.** Influência da densidade do solo em atributos da parte aérea e sistema radicular de crotalária. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 4, p. 464–472, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/38107>. Acesso em: 17 set. 2024.

**PEREIRA, L. E. T.; HERLING, V. R.; SILVA, S. C. da.** Preparo de solo e manejo de formação de pastagens. Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, 2020. 64 p. ISBN 978-65-87023-03-8 (e-book). DOI: 10.11606/9786587023038.

**REICHERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C.** Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>.

**RESENDE NETO, G. L.; MODESTO, A. O.; SILVA, F. B.; BORGES, D. F.** Avaliação do desenvolvimento do milho (*Zea mays* L.) sobre diferentes níveis de compactação no solo. *GETEC*, v. 14, p. 191-198, 2024. Disponível em: file:///C:/Users/rocha/Downloads/3363-Texto%20do%20Artigo-13187-1-10-20240330%20(2).pdf. Acesso em: 17 de jan. de 2025.

**ROCHA, R. A. D. S.; DA SILVA, T. J.; BONFIM-SILVA, E. M.; DUARTE, T. F.; OLIVEIRA, N. P.** de. Cultivation of *Urochloa brizantha* under different soil densities and doses of wood ash. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 27, p. 230-238, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n3p230-238>.

**SALES, A. T.; BIONDI, C. M.; FONSECA, C. K. L.** et al. Solos: estudos, potencialidades e uso / editores Josimar Gurgel Fernandes, Eric Xavier de Carvalho. – Recife, PE: Instituto Agrônômico de Pernambuco – IPA, 1ª ed., 2021. 217p.; il. color. ISBN: 978-65-00-30648-4.

**SALVI KOHN, L.; CARDUCCI, C. E.; KRISTEM DO CARMO, R. S.; DOS SANTOS BARBOSA, J.; DOS SANTOS, F. J.; NAMORATO BENEVENUTE, P. A.** Desenvolvimento das raízes de linho (*Linum usitatissimum* L.) em dois anos de cultivo sobre Cambissolo Húmico. *Scientia Agraria*, v. 17, n. 1, p. 36-41, 2016. ISSN 1519-1125.

**SANTOS, A. P. G.** et al. Impacto da compactação do solo no crescimento das raízes e produtividade das culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 3, p. 383-390, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000300007.

**SANTOS, F. L.; COSTA, C. D.; OLIVEIRA, P. M.** Uso de cobertura vegetal para minimizar a compactação do solo em áreas agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 27, n. 6, p. 394-400, 2023. DOI: 10.1590/1807-1925rbcr2023.

**SANTOS, F. R.; ALMEIDA, T. J.; FERREIRA, C. R.** Influência da densidade do substrato no desenvolvimento de plantas ornamentais e agrícolas. *Journal of Horticultural Science*, v. 15, n. 3, p. 202-211, 2018.

**SANTOS, L. B. D.; BARBOSA, F. S.; GUERRA, A. M. N. DE M.; MENDONÇA, A. V. R.; SILVA, A. G.; AQUINO, T. N.** de. Use of ashes and extracts from spontaneous plants in mineral nutrition and plant protection for beet cultivation. *Journal of Media Critiques, Brazil*, v. 11, n. 27, p. 1-27, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17349/jmcv11n27-005>.

**SCHJØNNING, P.; LAMANDÉ, M.; CRÉTIN, V.; NIELSEN, J. A.** Upper subsoil pore characteristics and functions as affected by field traffic and freeze–thaw and dry–wet treatments. *Soil Research*, v. 55, n. 3, p. 234-244, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR16149>.

**SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S.** Avaliação do estado de compactação do solo e suas implicações no crescimento de plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 5, p. 454-460, 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p454-460.

**SILVA, D. J.; LIMA, J. R.; PEREIRA, M. G.** Curva de Retenção de Água no Solo como Indicadora de Qualidade Física. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 4, p. 1234-1242, 2010.

**SILVA, F. G.; ASPIAZÚ, I.; OLIVEIRA, R. M.; SILVA, K. M. J.; SANTOS, S. R.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; BRITO, O. G.; DA SILVA, N. R.** Tensão de água no solo para o reinício da irrigação de milho verde no Semiárido. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 17, n. 2, p. 190-200, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v17n2p190-200>.

**SILVA, R. L.; ALMEIDA, L. M.; GARCIA, M. A.** Controle de tráfego de máquinas e sua influência na compactação do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 57, n. 1, p. 102-112, 2022. DOI: 10.1590/s1678-3921.pab2022.

**SOUSA ALMEIDA, M. de; CUNHA, M. B. M.; OLIVEIRA, M. S.; GOMES, K. J. S.; SILVA PAZ, J. A. A. da; CARNEIRO, M. V. B.; SILVESTRE, F. E. R.** Compactação do solo e os efeitos no crescimento inicial do milho. *Revista Ciência Agrícola*, v. 19, n. 2, p. 95-100, 2021. DOI: <https://doi.org/10.28998/rca.v19i2.11472>.

**SOUZA SABÓIA, A. de; BONFIM-SILVA, E. M.; SILVA, T. J. A. da; MENEGHETTI, L. A. M.; SILVA ROCHA, R. A. da; SILVA, M. A. da.** Sistema radicular de nabo forrageiro na descompactação do solo cultivado em vaso de poliuretano expansível. *Observatório De La Economía Latinoamericana*, v. 22, n. 11, p. e7941-e7941, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n11-212>.

**SOUZA, J. C.; SILVA, A. P.; FERREIRA, J. P.** Curva Característica de Retenção de Água no Solo: Aplicações e Métodos de Determinação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, n. 3, p. 200-207, 2021.

**STONE, L. F.; PORTES, T. A.; MOREIRA, J. A. A.** Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro. II. Crescimento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 56, e20397, 2021. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/20397/0>. Acesso em: 18 mar. 2025.

**TAIZ, L.; ZEIGER, E.** Fisiologia vegetal. 4. ed. Porto Alegre, Artmed, 2009. 849 p.

**TATAGIBA, S. D.; FIGUEIREDO, A. L. P.; BRANCALEONI, L.; CARELLI, C.; MODOLON, G. F.** Crescimento e produção do feijoeiro comum, cultivar “Querência”, do grupo carioca, submetido à restrição hídrica em ambiente protegido. *Agropecuária Científica no Semiárido (ACSA)*, Patos-PB, v. 20, n. 2, p. 26-34, 2024. ISSN 1808-6845. DOI: <https://doi.org/10.30969/eqch2z93>.

**TODAKA, D.; ZHAO, Y.; YOSHIDA, T.; KUDO, M.; KIDOKORO, S.; MIZOI, J.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.** Temporal and spatial changes in gene expression,

metabolite accumulation and phytohormone content in rice seedlings grown under drought stress conditions. *The Plant Journal*, v. 90, n. 1, p. 61-78, 2017.

**TOMER, S.; SINGH, R.; SHARMA, R.** Growth rate of plants: Methodology for calculating growth rates in agricultural research. *Agricultural Science Journal*, v. 45, n. 3, p. 123-130, 2012.

**TONIN, J. M.; COSTA, T. R.** Cadeias produtivas da soja e do milho. UniCesumar, 2023.

**VANHEES, D. J.; LOADES, K. W.; BENGOUGH, A. G.; MOONEY, S. J.; LYNCH, J. P.** A capacidade das raízes do milho de crescer em solo compactado não depende da quantidade de raízes formadas. *Field Crops Research*, v. 264, p. 108013, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108013>.

**VERONEZI, S. D. F.; RIBEIRO, L. M.; CECCON, G.** Uso de azospirillum brasilense em milho safrinha solteiro consorciado com *Brachiaria ruziziensis*. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 12, n. 4, p. 349-360, 2018. DOI:

**VIANA, J. H. M.; CRUZ, J. C.; ALVARENGA, R. C.; SANTANA, D. P.** Manejo do Solo para a Cultura do Milho. Circular Técnica 77. Embrapa milho e sorgo. Sete Lagoas, MG, 2006. ISSN 1679-1150.

**VIANA, R.** Nutrição Foliar. São Paulo: Editora Dialética, 2024. ISBN 978-65-270-2721-8.

**VOGELER, I., & STEWART, J. W.** (2014). Using soil water tension to predict soil density and manage irrigation. *Agricultural Water Management*, 143, 29-37.

**WASAYA, A.; ZHANG, X.; FANG, Q.; YAN, Z.** Root phenotyping for drought tolerance: a review. *Agronomy*, v. 8, n. 11, p. 241, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy8110241>.

**WESTERING, M. R.** Influence Of Green Manure On Maize Crop. 2020.

**XIONG, P.; ZHANG, Z.; HALLETT, P. D.** Variable responses of maize root architecture in elite cultivars due to soil compaction and moisture. *Plant Soil*, v. 455, n. 1, p. 79–91, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04673-3>.

**XIONG, P.; ZHANG, Z.; GUO, Z.; PENG, X.** Macropores in a compacted soil impact maize growth at the seedling stage: Effects of pore diameter and density. *Soil and Tillage Research*, v. 220, n. 1, p. 105370, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105370>.

**YU, C.; MAWODZA, T.; ATKINSON, B. S.; ATKINSON, J. A.; STURROCK, C. J.; WHALLEY, R.; MOONEY, S. J.** The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*, v. 29, p. 100838, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100838>.

**ZAREHAGHI, D.; NEYSHABOURI, M. R.; GORJI, M.; HASSANPOUR, R.; BANDEHAGH, A.** Growth and Development of Pistachio Seedling Root at Different Levels of Soil Moisture and Compaction in Greenhouse Conditions. *Soil and Water Research*, v. 12, n. 1, p. 60–66, 2017. DOI: <https://doi.org/10.17221/146/2015-SWR>.

**ZHU, L.; KAN, W.; ZHANG, Y.; SUN, J.** Visualizing the structure of the Earth's lithosphere on the Google Earth virtual-globe platform. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 5, n. 3, p. 26, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi5030026>.

**ZHU, L., LIU, S., & LI, Y.** (2020). Modeling the impact of bulk density on soil water retention and its implications for agricultural practices. *Catena*, 193, 104-110.