

COMO A COMPACTAÇÃO DO SOLO AFETA O CRESCIMENTO INICIAL DO MILHO EM SOLOS COM DIFERENTES TEXTURAS



<https://doi.org/10.22533/at.ed.231142514043>

Data de aceite: 13/05/2025

Igor Alexandre de Souza

Laura Pimenta Gomes

RESUMO: Este estudo foi realizado em uma casa de vegetação da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FACTU), em Unaí-MG, com o objetivo de investigar os efeitos de dois tipos de solo (arenoso e argiloso) e diferentes graus de compactação (79%, 86%, 93% e 100%) no crescimento inicial do milho. As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm e preparadas conforme a Norma ABNT/NBR 7182/86. Utilizaram-se tubos de PVC rígido de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura, preenchidos com solo de forma a alcançar uma densidade de 1,0 kg/dm³ nos anéis superior e inferior, com diferentes níveis de compactação no anel intermediário. O milho foi cultivado por 45 dias, durante os quais foram monitoradas variáveis como altura das plantas, número de folhas, diâmetro do colmo, comprimento e massa das raízes, massa da parte aérea e índice de clorofila (SPAD). Os resultados mostraram que o tipo de solo não influenciou de forma significativa a altura das plantas, o número de folhas e o comprimento

das raízes. A altura média foi de 0,66 m em ambos os solos, o número de folhas variou entre seis e sete, e o comprimento das raízes foi de 0,37 m no solo arenoso e 0,40 m no solo argiloso. Isso sugere que, sob as condições do experimento, o tipo de solo não teve impacto relevante no crescimento inicial do milho. No entanto, o grau de compactação se mostrou um fator importante. A altura das plantas variou conforme o nível de compactação, sendo o maior crescimento observado a 86% de compactação, com redução nos níveis extremos (79% e 100%). A massa das raízes e da parte aérea apresentou respostas distintas entre os tipos de solo. Em solos argilosos, ambas as massas seguiram um comportamento quadrático, com máximos em compactações intermediárias, enquanto em solos arenosos, as massas aumentaram linearmente com a compactação. Isso indica que solos argilosos se beneficiam de compactações moderadas, enquanto solos arenosos respondem melhor a compactações mais elevadas. O índice SPAD diminuiu linearmente com o aumento da compactação, especialmente no solo argiloso, sugerindo que níveis mais altos de compactação comprometem a fotossíntese e reduzem o teor de clorofila nas plantas.

Em resumo, o tipo de solo teve um impacto menor no desenvolvimento inicial do milho em comparação com o grau de compactação. Solos argilosos se beneficiaram de compactações moderadas, enquanto solos arenosos responderam melhor a níveis mais elevados de compactação.

PALAVRAS-CHAVE: Compactação do solo, crescimento do milho, índice de clorofila (SPAD), solo arenoso, solo argiloso.

INTRODUÇÃO

A compactação do solo ocorre quando os agregados do solo são rearranjados, reduzindo os espaços entre eles e aumentando a densidade do solo. Isso altera a distribuição dos poros, diminuindo a macroporosidade e a porosidade total, afetando a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica, e aumentando a resistência do solo à penetração. Esses efeitos prejudicam diretamente o armazenamento e a disponibilidade de água, limitando o desenvolvimento das raízes das plantas. Para caracterizar o grau de compactação, utilizam-se parâmetros como a densidade do solo e a porosidade total. A densidade do solo (D_s) é um parâmetro crucial, pois avalia a relação entre a densidade do solo e sua densidade máxima, proporcionando uma medição mais precisa do grau de compactação e das respostas das culturas, independentemente da mineralogia e textura do solo.

Embora o ensaio de Proctor Normal seja uma metodologia comum para determinar a D_s , sua aplicação em estudos agrícolas é limitada pela necessidade de grandes quantidades de solo e pela complexidade do procedimento. A compactação pode alterar propriedades físicas do solo, como macroporosidade, condutividade hidráulica e resistência à penetração, sendo esta última diretamente relacionada ao crescimento radicular. Assim, a compactação desempenha um papel fundamental nas interações físicas, químicas e biológicas do solo, afetando diretamente a produção agrícola.

Apesar de os efeitos da compactação sobre as principais culturas ainda não estarem totalmente esclarecidos, é essencial realizar estudos para identificar os limites de densidade do solo que não comprometam o crescimento das plantas, permitindo uma gestão mais eficiente e minimizando os impactos negativos da compactação. A problemática central está em como a compactação altera a estrutura do solo e impacta a produtividade das plantas, tornando desafiadora a compreensão dos efeitos da compactação e a implementação de estratégias de manejo eficazes.

O objetivo deste estudo é avaliar o efeito da compactação do solo com diferentes composições granulométricas (solo arenoso e argiloso) no sistema radicular, na parte aérea, na produção de biomassa e no desenvolvimento das raízes das plantas de milho. Para isso, serão determinados parâmetros indicativos dos solos que possam minimizar os efeitos negativos da compactação e otimizar o desenvolvimento inicial das plantas de milho.

REFERENCIAL TEÓRICO

O MILHO: IMPORTÂNCIA E CULTIVO NO BRASIL

O milho ocupa uma posição central na agricultura brasileira, sendo uma das culturas mais importantes tanto para consumo humano quanto animal, além de ser essencial para diversas indústrias (ERENSTEIN et al., 2022). Sua adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas e sua versatilidade no uso, seja como alimento, ração animal ou matéria-prima industrial, fazem dele uma cultura de destaque no cenário agrícola nacional e global (TANUMIHARDJO et al., 2020).

De acordo com Maranhão et al. (2024), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, com as regiões Sul e Centro-Oeste se destacando pela extensão de áreas agricultáveis e condições climáticas favoráveis. No entanto, o milho é cultivado por todo o território brasileiro, desde o Sul até a região Nordeste, evidenciando sua ampla adaptação às diferentes condições de solo e clima (BIGOLIN & TALAMINI, 2024).

Além de sua importância econômica, o milho desempenha um papel crucial na rotação de culturas, ajudando a manter a fertilidade do solo e a controlar pragas e doenças (FLAUSINO et al., 2022). Em termos de segurança alimentar, é uma fonte importante de carboidratos, fibras, vitaminas e minerais (KAUSHAL et al., 2023). Também se destaca como uma das principais fontes de energia para a pecuária, seja na forma de grãos ou silagem (VELHO et al., 2020).

O cultivo do milho no Brasil é caracterizado pela adoção de tecnologias avançadas, como sementes transgênicas e manejo integrado de pragas e doenças, o que tem impulsionado a produtividade e qualidade dos grãos, tornando o país competitivo no mercado global de milho (SCHUSTER et al., 2022). Contudo, o desafio continua sendo o manejo sustentável dos recursos naturais, com ênfase na preservação da biodiversidade (BIGOLIN & TALAMINI, 2024). Portanto, é essencial que os produtores adotem práticas agrícolas sustentáveis, que assegurem a viabilidade econômica da cultura a longo prazo, sem comprometer os recursos naturais e o meio ambiente.

IMPACTO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NA PRODUTIVIDADE DO MILHO

A compactação do solo é um fator limitante para a produtividade das culturas, especialmente no cultivo do milho, e pode prejudicar severamente o desempenho das plantas (BECKER et al., 2022). Esse fenômeno ocorre quando o solo é comprimido, reduzindo os espaços porosos e dificultando a circulação de ar, água e nutrientes essenciais para as plantas (SUZUKI et al., 2022).

A compactação tem um impacto direto no crescimento das raízes do milho. Com o solo compactado, as raízes encontram dificuldades para se desenvolver, o que limita sua capacidade de absorver água e nutrientes, podendo resultar em déficits hídricos e

nutricionais (BARETA et al., 2021). Além disso, a aeração do solo é prejudicada, o que pode comprometer a disponibilidade de oxigênio para as raízes, afetando a atividade metabólica das plantas e, conseqüentemente, seu crescimento (FERREIRA et al., 2022).

Outro impacto importante da compactação é a redução da taxa de infiltração de água no solo. Em solos compactados, a água não infiltra adequadamente, o que pode levar a encharcamentos e a uma piora ainda maior da estrutura do solo (BECKER et al., 2022). Essas condições podem resultar em anaerobiose no solo, que, por sua vez, prejudica o crescimento das raízes e a absorção de nutrientes (COSTA & COUTINHO, 2022).

Além dos efeitos diretos sobre as plantas, a compactação do solo também afeta a qualidade do solo como um todo, diminuindo sua capacidade de retenção de água, nutrientes e sua capacidade de suportar organismos benéficos, como os microrganismos do solo, essenciais para o ciclo de nutrientes (FRENE et al., 2024). A degradação da estrutura do solo pode comprometer a produtividade das culturas a longo prazo.

Para mitigar os efeitos negativos da compactação, é fundamental adotar práticas adequadas de manejo, como a rotação de culturas, o cultivo mínimo e o manejo integrado de pragas (PASSINATO et al., 2021). Além disso, técnicas de conservação do solo, como o cultivo em nível e a manutenção da cobertura vegetal, podem reduzir o risco de compactação e promover a saúde do solo a longo prazo (CÁRCELES et al., 2022).

EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DAS RAÍZES DE MILHO

A compactação do solo tem efeitos profundos sobre o sistema radicular do milho, afetando diretamente o seu crescimento e desenvolvimento. Estudos demonstram que a compactação pode reduzir significativamente o comprimento, diâmetro e distribuição das raízes, prejudicando a absorção de água e nutrientes (SHAHEB et al., 2021; UNGER & KASPAR, 1994).

A resistência do solo à penetração é um indicador importante da compactação e tem um impacto direto no crescimento das raízes. Valores elevados de resistência à penetração, especialmente acima de 2 MPa, podem limitar o desenvolvimento das raízes, dificultando sua penetração no solo e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver água e nutrientes (CHEN & WEIL, 2011; GRZESIAK et al., 2021; RUT et al., 2022).

Além disso, a compactação afeta a disponibilidade de nutrientes para as plantas de milho. A redução na taxa de absorção de nutrientes pelas raízes compromete o desenvolvimento das plantas e pode reduzir a produtividade das culturas (PARIZ et al., 2017). O impacto da compactação no sistema radicular do milho é um dos principais fatores que afeta a produtividade, tornando o manejo adequado da compactação crucial para garantir uma boa colheita (BECKER et al., 2022).

AValiação DA DENSIDADE DO SOLO COMO INDICADOR DE COMPACTAÇÃO

A densidade do solo é um parâmetro fundamental para a avaliação da compactação, pois ela reflete a compactação do solo e sua capacidade de reter água e nutrientes (PERALTA et al., 2021). A compactação do solo está intimamente relacionada ao aumento da densidade, especialmente nas camadas mais profundas, onde o tráfego de máquinas e o pisoteio de animais causam maior impacto (GOULART et al., 2021; SILVA et al., 2021c).

Pesquisas mostram que a compactação do solo pode aumentar significativamente a densidade, o que prejudica o crescimento das raízes e reduz a capacidade de infiltração de água (MORAES et al., 2020). A densidade do solo também está relacionada à porosidade do solo, o que afeta diretamente a aeração e a retenção de água (VIZIOLI et al., 2021). Solos com alta densidade tendem a ter menor porosidade e capacidade de infiltração, o que compromete o desenvolvimento das raízes e a produtividade das culturas.

A interpretação dos valores de densidade deve levar em consideração fatores como a textura do solo e o teor de matéria orgânica, que influenciam a agregação das partículas e a estrutura do solo (TORRES et al., 2021). Solos argilosos, por exemplo, tendem a apresentar densidades mais altas devido à maior agregação das partículas de argila, enquanto solos ricos em matéria orgânica geralmente têm densidades mais baixas, o que facilita o desenvolvimento das raízes.

A avaliação da densidade do solo é crucial para monitorar os efeitos da compactação e tomar decisões sobre o manejo do solo, promovendo práticas que minimizem os impactos negativos da compactação e favoreçam o desenvolvimento saudável das culturas, como o milho (CAVALIERI-POLIZELI et al., 2022). O ensaio de Compactação Proctor é uma ferramenta padrão utilizada para determinar a máxima densidade seca e a umidade ótima para a compactação do solo, sendo essencial para a avaliação da qualidade física do solo (Figura 1).



Figura 1- Ensaio de Compactação Proctor

Fonte: Infratech, 2023.

ESTRATÉGIAS PARA AVALIAÇÃO E MITIGAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NA CULTURA DO MILHO

A compactação do solo é um dos principais obstáculos enfrentados pela agricultura moderna, especialmente em culturas como o milho, cuja produtividade depende diretamente da saúde do sistema radicular (ALMEIDA et al., 2024). Para combater esse problema, têm sido desenvolvidas várias estratégias de avaliação e mitigação, com o objetivo de promover uma agricultura mais sustentável e eficiente (POLIDORO et al., 2021).

Estudos indicam que a compactação do solo reduz a porosidade e a capacidade de infiltração de água, afetando negativamente o crescimento das raízes e a produtividade das culturas (SILVA et al., 2021). Para avaliar o grau de compactação, o teste de penetração do solo é amplamente utilizado, proporcionando dados sobre a resistência do solo à penetração das raízes em diferentes profundidades (SUZUKI et al., 2022).

O monitoramento do crescimento radicular também se mostra uma abordagem eficaz para identificar camadas compactadas. Conforme destacado por Bengough et al., (2006), observar o desenvolvimento das raízes ao longo do ciclo de crescimento das plantas pode fornecer valiosas informações sobre a presença de compactação no solo.

Para mitigar os efeitos da compactação, práticas de manejo conservacionista, como o plantio direto e a rotação de culturas, são recomendadas. Tais práticas preservam a estrutura do solo e reduzem a compactação (SILVA et al., 2021b). O manejo adequado da irrigação e drenagem também é crucial. Segundo Oliveira et al. (2022), o controle da umidade no solo e uma boa drenagem são essenciais para prevenir a compactação.

Além disso, o uso de equipamentos agrícolas adequados, como pneus de baixa pressão e implementos mais leves, pode reduzir o impacto da compactação provocada pelo tráfego de máquinas (SMITH, 2017). A aplicação de práticas de manejo integrado de pragas e doenças também desempenha um papel importante, pois a presença de pragas pode comprometer a estrutura do solo, tornando-o mais suscetível à compactação (PASSINATO et al., 2021). Ao adotar essas abordagens, os agricultores podem melhorar a qualidade do solo e, conseqüentemente, a produtividade das culturas de milho.

DESAFIOS E PERSPECTIVAS NA REDUÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO PARA UMA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

A compactação do solo continua sendo um desafio relevante para a produção de milho, impactando o crescimento das plantas e a produtividade. Um dos principais obstáculos é a identificação e monitoramento das áreas propensas à compactação, especialmente em regiões com cultivo intensivo. Tecnologias como o sensoriamento remoto e a modelagem computacional têm se mostrado promissoras para mapear e avaliar a compactação em larga escala (MUÑOZ-ROJAS et al., 2017).

A implementação de práticas de manejo conservacionista, como o plantio direto e a rotação de culturas, é uma das estratégias para reduzir a compactação ao longo do tempo. No entanto, essas abordagens enfrentam desafios em locais com alta pressão de cultivo e condições climáticas adversas.

Outro desafio é a conscientização dos agricultores sobre os efeitos da compactação do solo e as melhores práticas de manejo. Programas de extensão agrícola e treinamentos práticos são essenciais para disseminar o conhecimento e promover técnicas sustentáveis de manejo do solo (LOPES & GUILHERME, 2016).

O futuro da redução da compactação do solo passa pelo desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como implementos agrícolas com sistemas de controle de pressão de pneus e sensores de compactação integrados. Tais tecnologias podem permitir que os agricultores ajustem suas práticas em tempo real, otimizando o uso de máquinas agrícolas e minimizando os efeitos da compactação (SHAHEB, 2020).

A colaboração entre instituições acadêmicas, governamentais e do setor privado é fundamental para a criação de soluções integradas para a gestão da compactação do solo. A implementação de sistemas de monitoramento contínuo da qualidade do solo é crucial para fornecer dados atualizados, fundamentais para a formulação de políticas públicas e práticas de manejo sustentável (MICCOLIS et al., 2014).

Portanto, embora os desafios sejam grandes, as perspectivas para reduzir a compactação do solo e promover uma agricultura sustentável são promissoras, por meio de estratégias adequadas de manejo, educação dos agricultores e inovações tecnológicas.

METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação localizada na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FACTU), em Unaí – MG, a uma altitude de 575 metros, nas coordenadas Latitude: 16° 21' 6" Sul e Longitude: 46° 54' 43" Oeste. Amostras de dois tipos de solo, um arenoso e outro argiloso (pré-analisados), foram coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade na Fazenda Experimental Morada Nova da FACTU.

Os solos foram secos ao ar e passados por uma peneira de malha de 4 mm para serem preparados para os ensaios de Proctor Normal. A determinação da densidade máxima dos solos e da umidade ótima para compactação foi realizada conforme a Norma Técnica ABNT/NBR 7182/86 (ABNT, 1986).

Para a execução do experimento, foram utilizados tubos de PVC rígido com diâmetro de 10 cm como unidades experimentais, sendo cada unidade formada por três anéis de tubo, cada um com 10 cm de altura. O anel superior e o inferior foram preenchidos com uma quantidade de solo necessária para atingir a densidade de 1,0 kg/dm³, enquanto o anel intermediário recebeu diferentes quantidades de solo para alcançar os níveis de compactação de 79%, 86%, 93% e 100%. Com base nos valores de densidade máxima e umidade ótima de compactação, juntamente com os volumes dos anéis, foi calculada a massa de solo necessária para atingir os níveis de compactação desejados. Além disso, os solos foram adubados e corrigidos quanto ao pH para garantir condições ideais de crescimento das plantas.

As sementes de milho foram germinadas previamente em condições controladas de umidade e temperatura. Após a germinação, as sementes foram plantadas nos tubos, garantindo a presença de duas plantas por unidade experimental. O período de cultivo foi de no mínimo 45 dias, com irrigação diária conforme a necessidade das plantas.

Após esse período, foram realizadas avaliações das plantas, incluindo a altura (medida com trena métrica graduada), o diâmetro dos colmos (medido com paquímetro digital de precisão 0,01 mm) e o número de folhas. O índice de clorofila foi medido com um clorofilômetro digital CFL 1030 (Falker, Porto Alegre, RS), realizando medições no terço inferior, médio e superior de pelo menos três folhas por planta, sendo utilizada a média das leituras. A parte aérea das plantas foi colhida, seca em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até atingir massa constante, para determinar a produção de matéria seca.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com esquema fatorial 2 x 4, representando dois tipos de solo (arenoso e argiloso) e quatro níveis de compactação, com quatro repetições. Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância, sendo calculado o coeficiente de variação (CV) dentro de cada tipo de solo. A análise de regressão foi realizada com nível de significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística das variáveis altura, número de folhas e comprimento das raízes nas plantas de milho, nas fases iniciais de desenvolvimento, não revelou efeitos significativos em função do tipo de solo (arenoso ou argiloso) (Tabela 1). A altura média das plantas foi de 0,66 m em ambos os tipos de solo, indicando que o tipo de solo não teve impacto na altura das plantas. Da mesma forma, o número médio de folhas foi de seis no solo arenoso e sete no solo argiloso, sem diferenças significativas entre os tratamentos. O comprimento médio das raízes também apresentou valores semelhantes entre os tipos de solo, sendo de 0,37 m no solo arenoso e 0,40 m no solo argiloso.

Variável	Tipo de solo		CV (%)	P
	Arenoso	Argiloso		
Altura	0,66	0,66	9,82	0,24133
Folha	6	7	7,67	0,189481
Comp. de raízes	0,37	0,40	20,9	0,27168

Tabela 1 - Efeito do tipo de solo arenoso e argiloso sobre as variáveis morfológicas de altura (m), número de folhas e comprimento de raízes (m), na fase inicial de desenvolvimento de plantas de milho.

Fonte: Autora do trabalho.

A ausência de diferença significativa entre os tipos de solo na fase inicial de desenvolvimento do milho sugere que o crescimento inicial das plantas pode ser mais influenciado por fatores intrínsecos da própria planta do que por características edáficas específicas. Pesquisas similares corroboram esses resultados, indicando que, nas fases iniciais, o milho tende a priorizar o desenvolvimento radicular e foliar para garantir a absorção de nutrientes e adaptação ao ambiente, em vez de responder diretamente ao tipo de solo (BECKER et al., 2022). Além disso, o coeficiente de variação elevado para o comprimento das raízes, de 20,9%, pode refletir variações naturais entre as amostras individuais, o que é comum em estudos sobre crescimento inicial. Esses valores, no entanto, não apresentam relevância estatística para diferenciar os tipos de solo. Em ambientes controlados, as variações morfológicas frequentemente dependem de fatores como a qualidade da irrigação e a disponibilidade de luz, os quais podem reduzir o impacto direto das características do solo na fase inicial de desenvolvimento. Assim, a ausência de diferenças significativas observada neste estudo reforça a ideia de que o desenvolvimento inicial do milho segue mecanismos de crescimento adaptativos, aparentemente independentes das propriedades físicas dos solos analisados.

No que diz respeito às variáveis número de folhas e comprimento das raízes, a análise indicou que o grau de compactação (Tabela 2) não teve efeito significativo sobre o

desenvolvimento inicial do milho. O número médio de folhas permaneceu constante em 7 para os graus de compactação de 86%, 93% e 100%, enquanto no grau de compactação de 79%, a média foi de 6 folhas, com um coeficiente de variação de 7,67%, sem diferença estatística. Da mesma forma, o comprimento médio das raízes não apresentou variações significativas: 0,42 m no grau de compactação de 79%, 0,39 m para 86%, 0,37 m para 93% e 0,35 m para 100%.

Variável	Grau de compactação (%)				CV (%)	P
	79	86	93	100		
Folha	6	7	7	7	7,67	0,11729
Comp. de raízes	0,42	0,39	0,37	0,35	20,9	0,4039

Tabela 2 - Efeito do grau de compactação (% g cm⁻³) sobre o número de folhas e comprimento de raízes (m) na fase inicial de desenvolvimento das plantas de milho.

Fonte: Autora do trabalho.

A ausência de diferenças significativas em relação ao grau de compactação sugere que, nos estágios iniciais de desenvolvimento, o milho pode não ser sensível a variações nas características físicas do solo (ALMEIDA et al., 2024). Estudos anteriores indicam que o efeito do grau de compactação sobre o crescimento radicular e foliar tende a ser mais pronunciado em estágios mais avançados, quando as plantas demandam maior suporte para absorver nutrientes e água (BENGOUGH et al., 2006). O coeficiente de variação elevado para o comprimento das raízes, de 20,9%, aponta para variações naturais entre as amostras, comuns em estudos de crescimento inicial, mas sem impacto estatístico relevante para distinguir os diferentes graus de compactação. Conforme observado por Cárceles et al. (2022), fatores como a umidade do solo e a qualidade da irrigação podem exercer influência mais significativa nas condições experimentais, mitigando o efeito da compactação do solo nas fases iniciais. A ausência de diferenças significativas neste estudo corrobora a hipótese de que o desenvolvimento inicial do milho é regido por mecanismos de crescimento adaptativos, que parecem funcionar de forma independente das variações no grau de compactação.

A análise da altura das plantas de milho em relação aos diferentes graus de compactação do solo revelou uma leve variação com o aumento da compactação, ajustando-se a um modelo quadrático. Isso indica que o modelo se ajustou bem aos dados (Figura 2). A altura das plantas atingiu um ponto máximo próximo ao grau de compactação de 86%, com uma ligeira redução nos extremos de 79% e 100%. Esses resultados sugerem que, embora a compactação do solo tenha impacto limitado nas variáveis morfológicas do milho no início do seu desenvolvimento, um grau de compactação intermediário pode criar um ambiente levemente mais favorável para o crescimento da altura das plantas.(cm).

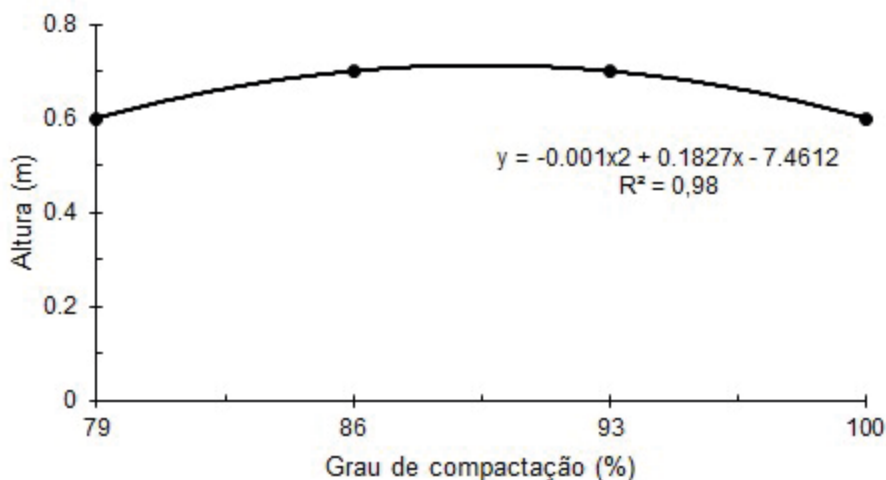


Figura 2 – Relação entre o Grau de Compactação (%) e a Altura das Plantas de Milho

Fonte: Autora do trabalho.

Esses resultados sugerem que o grau de compactação do solo afeta a altura das plantas de milho de maneira não linear, com a compactação moderada favorecendo um crescimento ligeiramente maior. Isso pode ser explicado por uma melhor retenção de umidade e maior disponibilidade de nutrientes em níveis intermediários de compactação (GRZESIAK et al., 2021). Pesquisas anteriores indicam que solos com compactação excessivamente elevada comprometem o desenvolvimento radicular e a eficiência na absorção de água e nutrientes, o que impacta negativamente a altura das plantas (CHEN & WEIL, 2011). A curva quadrática observada neste estudo corrobora a literatura, que sugere que plantas de milho respondem de forma adaptativa às variações de compactação, mostrando maior vigor em condições intermediárias e sinais de estresse nos níveis extremos de compactação.

A análise do diâmetro do colmo em plantas de milho cultivadas em solo argiloso, com diferentes graus de compactação, também se ajustou a um modelo quadrático (Figura 3). O diâmetro do colmo atingiu um ponto máximo próximo ao grau de compactação de 86%, reduzindo-se levemente nos extremos de 79% e 100%. Esse comportamento sugere que a compactação moderada do solo cria condições mais favoráveis para o desenvolvimento do colmo, enquanto níveis extremos de compactação podem limitar a expansão dessa variável.

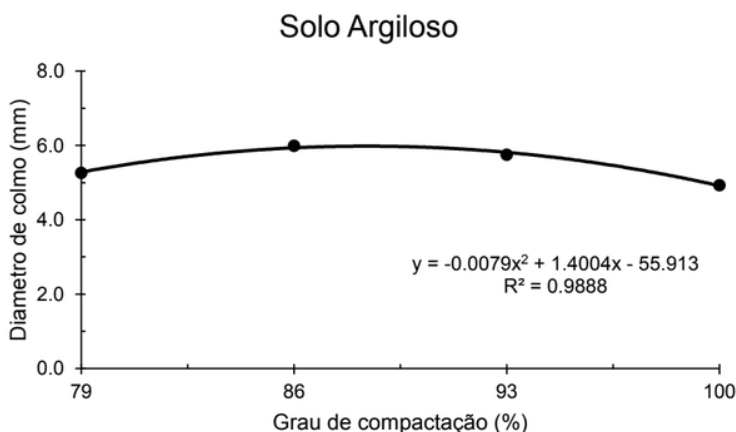


Figura 3 - Efeito do Grau de Compactação (%) sobre o Diâmetro de Colmo (mm) em Solo Argiloso.

Fonte: Autora do trabalho.

Esses resultados sugerem que o grau de compactação do solo argiloso influencia diretamente o diâmetro do colmo do milho, exibindo um comportamento semelhante ao observado na altura das plantas, com compactação intermediária favorecendo o desenvolvimento do colmo. Esse efeito pode ser explicado pela hipótese de que compactações moderadas promovem uma melhor retenção de água e fornecem estabilidade mecânica ao solo, o que facilita o crescimento estrutural da planta (FERREIRA et al., 2022). Em contrapartida, compactações excessivamente baixas ou altas podem comprometer o desenvolvimento radicular, limitando a absorção de água e nutrientes, o que, por sua vez, impacta negativamente o crescimento do colmo (BENGOUGH et al., 2006). A alta precisão do modelo quadrático ajustado reforça a interpretação de que o milho responde de maneira adaptativa a níveis intermediários de compactação em solo argiloso, maximizando o diâmetro do colmo dentro dessa faixa ideal.

No caso do solo arenoso, a análise do diâmetro do colmo das plantas de milho revela uma tendência de redução à medida que o grau de compactação aumenta (Figura 4). A relação entre essas variáveis foi bem representada por uma equação linear. Observa-se que o diâmetro do colmo atinge seus valores mais altos nos níveis mais baixos de compactação (79%) e diminui progressivamente com o aumento da compactação, até alcançar o grau máximo de 100%. Esses dados sugerem que, em solos arenosos, o milho pode ser mais sensível a compactações elevadas, o que pode dificultar a penetração das raízes e a absorção de recursos essenciais, refletindo em uma menor expansão do diâmetro do colmo.

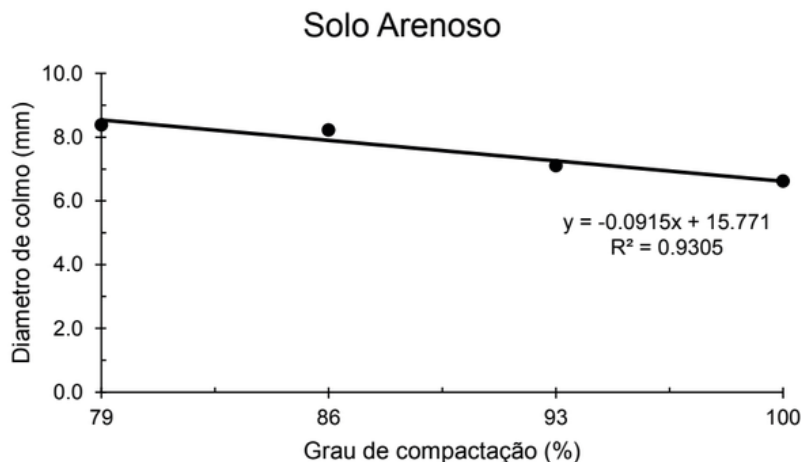


Figura 4 - Efeito do Grau de Compactação (%) sobre o Diâmetro de Colmo (mm) em Solo Arenoso.

Fonte: Autora do trabalho.

Esses resultados sugerem que, em solos arenosos, o aumento do grau de compactação reduz o diâmetro do colmo do milho, provavelmente devido à característica natural de baixa retenção de água e nutrientes nesses solos. Em condições de alta compactação, essa limitação é ainda mais acentuada, restringindo o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, o transporte de recursos essenciais para o crescimento do colmo. A compactação elevada em solos arenosos pode reduzir significativamente a porosidade e a permeabilidade, limitando a oxigenação das raízes e afetando negativamente o desenvolvimento geral da planta.

O comportamento linear negativo observado confirma a tendência relatada na literatura, na qual o desenvolvimento do milho é comprometido em solos arenosos compactados, uma vez que a estrutura desse tipo de solo favorece menos a retenção de água e nutrientes quando submetido a compactação elevada (GRZESIAK et al., 2021). Dessa forma, os resultados reforçam a ideia de que práticas de manejo devem ser adotadas para evitar a compactação excessiva em solos arenosos, já que isso pode ser prejudicial ao desenvolvimento do colmo do milho.

A análise da influência do grau de compactação sobre a massa das raízes do milho em solos argiloso e arenoso mostrou respostas diferenciadas entre os tipos de solo e os níveis de compactação (Figura 5). No solo argiloso, a massa das raízes seguiu uma tendência não linear ao longo dos diferentes graus de compactação, enquanto no solo arenoso essa relação foi mais linear. No solo argiloso, os dados se ajustaram a uma regressão quadrática. Observou-se que a massa das raízes aumentou até um ponto intermediário de compactação, depois decrescendo, o que sugere a existência de uma compactação ideal para maximizar o desenvolvimento radicular. Esse comportamento

quadrático indica que o solo argiloso, por reter mais água e nutrientes, oferece melhores condições para o desenvolvimento radicular em níveis moderados de compactação. No entanto, compactações elevadas limitam o crescimento das raízes devido à redução da porosidade e do espaço para expansão radicular.

Em contraste, no solo arenoso, a relação entre compactação e massa das raízes seguiu uma regressão linear. A massa das raízes apresentou um aumento contínuo com a compactação, sem alcançar um ponto de saturação. Esse padrão pode ser explicado pela estrutura mais porosa do solo arenoso: ao aumentar a compactação, reduz-se o excesso de porosidade, permitindo uma leve melhoria na retenção de umidade e promovendo um aumento moderado na massa radicular, embora ainda longe do potencial de suporte observado em solos argilosos.

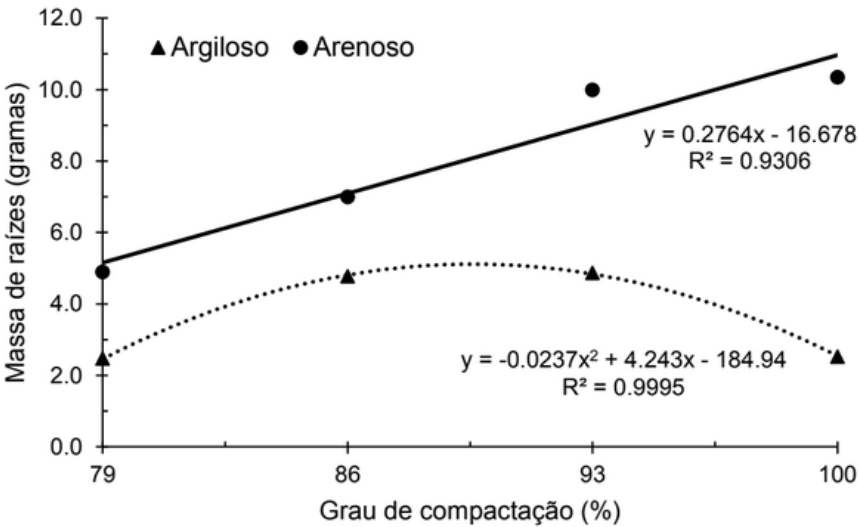


Figura 5 - Efeito do Grau de Compactação (%) sobre a massa de raízes das Plantas de Milho (g) em Solos Argiloso e Arenoso.

Fonte: Autora do trabalho.

Esses resultados indicam que tanto o tipo de solo quanto o grau de compactação afetam de maneiras distintas o desenvolvimento da massa radicular do milho. Em solos argilosos, uma compactação intermediária parece ser benéfica para maximizar a massa das raízes, possivelmente devido a um equilíbrio entre estabilidade estrutural e a retenção eficiente de água e nutrientes. Já em solos arenosos, o aumento da compactação beneficia o desenvolvimento radicular até certo ponto, pois ajuda a diminuir a porosidade excessiva e aprimora a retenção de umidade (FERREIRA et al., 2022). Diferente do solo argiloso, o solo arenoso não apresenta um ponto ótimo de compactação para maximizar a massa das raízes, demonstrando uma relação linear contínua com o aumento da compactação.

Essas diferenças refletem as características físicas dos solos analisados: enquanto o solo argiloso responde melhor a uma compactação moderada, o solo arenoso mostra um efeito positivo de compactação contínua, mas linear. A estrutura e a compactação do solo podem impactar diretamente o desenvolvimento inicial das raízes, especialmente em solos com texturas distintas, reforçando a importância de práticas de manejo ajustadas a cada tipo de solo para otimizar o crescimento radicular das culturas.

Em relação à massa aérea das plantas de milho, a análise do efeito do grau de compactação em solos argiloso e arenoso também indicou respostas diferenciadas (Figura 6). No solo argiloso, a relação entre a compactação e a massa aérea ajustou-se a um modelo quadrático, enquanto no solo arenoso essa relação foi linear. No solo argiloso, a massa aérea das plantas apresentou uma relação quadrática com a compactação, ajustada pela equação de regressão, com um coeficiente de determinação, evidenciando um ajuste robusto.

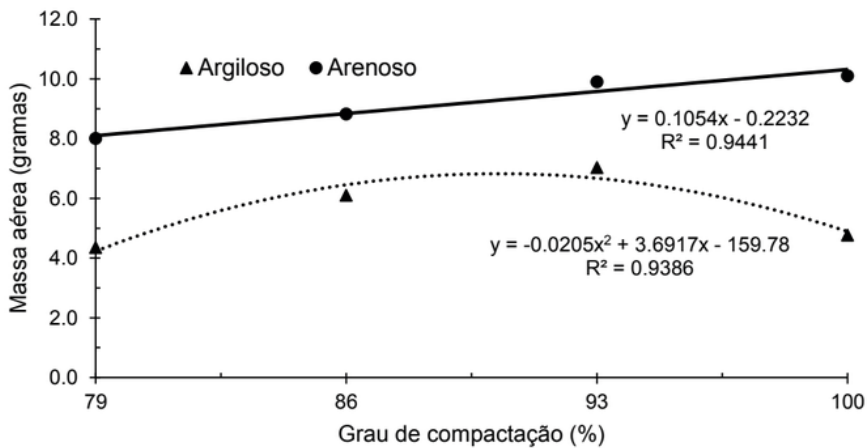


Figura 6 - Efeito do Grau de Compactação (%) sobre a massa aérea das Plantas de Milho (g) em Solos Argiloso e Arenoso.

Fonte: Autora do trabalho.

Os dados sugerem que a massa aérea aumentou até atingir um ponto ideal de compactação, após o qual houve uma redução, refletindo uma possível compactação ideal para maximizar o desenvolvimento da biomassa aérea em solos argilosos. Esse ponto intermediário provavelmente representa um equilíbrio entre a retenção de água e nutrientes e a estrutura do solo necessária para a troca gasosa e o crescimento adequado das raízes. A compactação excessiva, por outro lado, parece reduzir a massa aérea ao limitar a disponibilidade de poros para a expansão das raízes e a circulação de ar.

No solo arenoso, em contraste, a massa aérea das plantas aumentou de forma linear com o grau de compactação, conforme descrito pela equação, indicando um bom ajuste linear. Esse comportamento sugere que o aumento da compactação no solo arenoso pode ter contribuído para uma retenção de umidade mais eficaz, algo naturalmente limitado nesse tipo de solo devido à alta porosidade. O aumento da compactação, portanto, pode ter criado condições mais favoráveis ao desenvolvimento da biomassa aérea, ainda que de forma linear, sem alcançar um ponto de saturação.

Em relação ao índice SPAD, observou-se uma relação negativa com o aumento da compactação em ambos os solos, indicando que a compactação elevada reduz a intensidade de verde nas folhas, provavelmente em razão da diminuição da fotossíntese e da saúde geral da planta (Figura 7). No solo argiloso, o índice SPAD ajustou-se a uma regressão linear negativa, refletindo uma diminuição constante dos valores do índice SPAD, de 40,1 a 32,7, com o aumento da compactação. Esse comportamento sugere que a compactação excessiva no solo argiloso reduz a disponibilidade de oxigênio e limita o crescimento radicular, impactando negativamente a absorção de nutrientes essenciais para a síntese de clorofila e, consequentemente, a intensidade de verde das folhas.

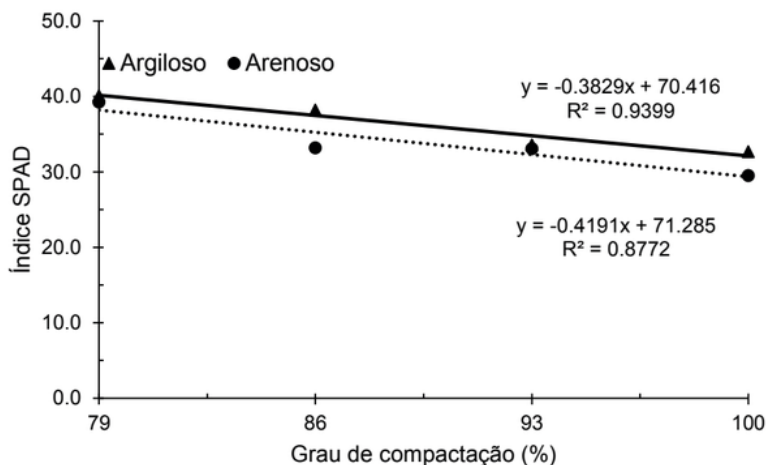


Figura 7 - Efeito do Grau de Compactação (%) sobre o índice SPAD das lâminas foliares de plantas de milho em Solos Argiloso e Arenoso.

Fonte: Autora do trabalho.

No solo arenoso, a relação entre compactação e índice SPAD também foi linear e negativa, com um ajuste moderado. O índice SPAD no solo arenoso apresentou uma diminuição de 39,3 para 29,5 à medida que a compactação aumentou. Embora o solo arenoso tenha uma porosidade naturalmente elevada, a compactação crescente reduz os espaços porosos essenciais para a retenção de água e a aeração, prejudicando a absorção de nutrientes e, consequentemente, a produção de clorofila.

Esses resultados indicam que o aumento da compactação do solo leva a uma redução no índice SPAD em ambos os tipos de solo, sugerindo uma diminuição na intensidade do verde das folhas e, potencialmente, uma queda na eficiência fotossintética. Esse fenômeno está relacionado à limitação do acesso das raízes a nutrientes e oxigênio, elementos essenciais para a síntese de clorofila e a saúde geral das plantas. A redução mais intensa observada no solo arenoso, evidenciada pelo coeficiente angular mais elevado na regressão linear, provavelmente reflete a baixa capacidade de retenção de água deste tipo de solo, que, quando compactado, agrava ainda mais as dificuldades na absorção de nutrientes pelas raízes (FERREIRA et al., 2022).

Assim, o índice SPAD se destaca como um indicador prático e eficaz para monitorar o impacto das condições físicas do solo na saúde das plantas, validando a hipótese de que a compactação excessiva prejudica o desempenho fisiológico das culturas. A utilização do índice SPAD pode, portanto, apoiar estratégias de manejo diferenciadas que visem melhorar as condições de cultivo e otimizar a produtividade em solos de texturas variadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conclusão deste trabalho destaca a importância de compreender a influência do tipo de solo e do grau de compactação no desenvolvimento inicial do milho. Os resultados mostraram que, sob as condições experimentais, essas variáveis não afetaram significativamente características como altura das plantas, número de folhas e comprimento das raízes, sugerindo o papel adaptativo das plantas.

Por outro lado, o diâmetro do colmo e a massa das raízes responderam de forma diferenciada: em solos argilosos, a compactação moderada foi benéfica, enquanto em solos arenosos, houve maior sensibilidade a altos níveis de compactação. O índice SPAD também se revelou uma ferramenta eficaz, apontando que compactações inadequadas prejudicam a saúde e a fotossíntese das plantas.

Esses achados destacam a necessidade de práticas de manejo específicas para cada tipo de solo e incentivam pesquisas futuras para otimizar o crescimento do milho e mitigar os efeitos da compactação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. E. M., DE SOUZA, H. A., EVANGELISTA, B. A., UHLMANN, A., RAMOS, M. R., SAGRILLO, E., ... & de Sousa Paz, L. R. Challenges to Managing Soil Health in the Newest Agricultural Frontier in Brazil. **Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil**, 196. 2024.
- BARETA, E., GENÚ, A. M., RAMPIM, L., UMBURANAS, R. C., & Pott, C. A. Critical limits of soil physical attributes for corn and black oat in a Xanthic Hapludox. **Revista Ciência Agronômica**, 53, e20207533. 2021.
- BECKER, R. K., BARBOSA, E. A. A., GIAROLA, N. F. B., KOCHINSKI, E. G., POVH, F. P., PAULA, A. L. D., & CHERUBIN, M. R. Mechanical Intervention in Compacted No-Till Soil in Southern Brazil: **Soil Physical Quality and Maize Yield**. *Agronomy*, 12(10), 2281. 2022.
- BENGOUGH, A. G., BRANSBY, M. F., HANS, J., MCKENNA, S. J., ROBERTS, T. J., & VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of experimental botany**, 57(2), 437-447. 2006.
- BIGOLIN, T., & TALAMINI, E. Impacts of Climate Change Scenarios on the Corn and Soybean Double-Cropping System in Brazil. **Climate**, 12(3), 42. 2024.
- CÁRCELES RODRÍGUEZ, B., DURÁN-ZUAZO, V. H., SORIANO RODRÍGUEZ, M., GARCÍA-TEJERO, I. F., GÁLVEZ RUIZ, B., & CUADROS TAVIRA, S. **Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: A review**. *Soil Systems*, 6(4), 87. 2022.
- CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V., MARCOLINO, F. C., TORMENA, C. A., KELLER, T., & MORAES, A. D. Soil structural quality and relationships with root properties in single and integrated farming systems. **Frontiers in Environmental Science**, 10, 901302. 2022.
- CHEN, G., & WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, 117, 17-27. 2011.
- COSTA, M. C. G., & COUTINHO, Í. A. C. Root systems of agricultural crops and their response to physical and chemical subsoil constraints. In **Subsoil constraints for crop production** (pp. 225-261). Cham: Springer International Publishing. 2022.
- ERENSTEIN, O., JALETA, M., SONDER, K., MOTTALEB, K., & PRASANNA, B. M. Global maize production, consumption and trade: Trends and R&D implications. **Food security**, 14(5), 1295-1319. 2022.
- FERREIRA, C. J. B., DA SILVA, A. G., DE OLIVEIRA PRETO, V. R., TORMENA, C. A., BRAZ, G. B. P., DE FREITAS SOUZA, M., & DA SILVA, A. L. B. R. **Effects of Second-Season Crops on Soybean Cultivation in Compacted Soil in Brazilian Cerrado**. *Agronomy*, 13(1), 79. 2022.
- FLAUSINO, B. F., MACHADO, C. F., SILVA, J. H. C., RONCHI, C. P., PIMENTEL, M. A. G., & GONTIJO, L. M. Intercropping maize with brachiaria can be a double-edged sword strategy. **Pest Management Science**, 78(12), 5243-5250. 2022.
- FRENE, J. P., PANDEY, B. K., & CASTRILLO, G. **Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions**. *Plant and Soil*, 1-12. 2024.

- GOULART, R. Z., REICHERT, J. M., RODRIGUES, M. F., NETO, M. C., & EBLING, E. D. Comparing tillage methods for growing lowland soybean and corn during wetter-than-normal cropping seasons. **Paddy and Water Environment**, 19, 401-415. 2021.
- GRZESIAK, M. T., MAKSYMOWICZ, A., JURCZYK, B., HURA, T., RUT, G., RZEPKA, A., & GRZESIAK, S. Selection approaches to the variation of responses to soil compaction stress among maize hybrids (*Zea mays* L.). **Journal of Agronomy and Crop Science**, 207(3), 544-556. 2021.
- KAUSHAL, M., SHARMA, R., VAIDYA, D., GUPTA, A., SAINI, H. K., ANAND, A., ... & KC, D. Maize: an underexploited golden cereal crop. **Cereal Research Communications**, 51(1), 3-14. 2023.
- LOPES, A. S., & GUILHERME, L. G. **A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil.** *Advances in agronomy*, 137, 1-72. 2016.
- MARANHÃO, R. L. A., GUIMARÃES, R. F., HERMUCHE, P. M., GOMES, R. A. T., PERIPOLLI, V., TANURE, C. B., ... & MCMANUS, C. Growth and acceleration analysis of the soybean, sugar cane, maize and cattle production in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, 1-46. 2024.
- MICCOLIS, A., DE ANDRADE, R. M. T., & PACHECO, P. *Land-use trends and environmental governance policies in Brazil: Paths forward for sustainability* (Vol. 171). CIFOR. 2014.
- MORAES, M. T., DEBIASI, H., FRANCHINI, J. C., MASTROBERTI, A. A., LEVIEN, R., LEITNER, D., & SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, 200, 104611. 2020.
- MUÑOZ-ROJAS, M., PEREIRA, P., BREVIK, E. C., CERDÀ, A., & JORDÁN, A. Soil mapping and processes models for sustainable land management applied to modern challenges. In **Soil mapping and process modeling for sustainable land use management** (pp. 151-190). Elsevier. 2017.
- OLIVEIRA, P. T. S., DE FARIA GODOI, R., COLMAN, C. B., MOTTA, J. S., SONE, J. S., & ALMAGRO, A. Agricultural land degradation in Brazil. In *Impact of Agriculture on Soil Degradation I: Perspectives from Africa, Asia, America and Oceania* (pp. 97-127). Cham: Springer International Publishing. 2022.
- PARIZ, C. M., COSTA, C., CRUSCIOL, C. A., MEIRELLES, P. R., CASTILHOS, A. M., ANDREOTTI, M., ... & FRANZLUEBBERS, A. J. Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 108, 35-54. 2017.
- PASSINATO, J. H., AMADO, T. J., KASSAM, A., ACOSTA, J. A., & AMARAL, L. D. P. Soil health check-up of conservation agriculture farming systems in Brazil. **Agronomy**, 11(12), 2410. 2021.
- PERALTA, G., ALVAREZ, C. R., & TABOADA, M. A. Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. **A meta-analysis. Soil and Tillage Research**, 211, 105022. 2021.
- POLIDORO, J. C., DE FREITAS, P. L., HERNANI, L. C., ANJOS, L. H. C. D., RODRIGUES, R. D. A. R., CESÁRIO, F. V., ... & RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation & Development**, 32(12), 3457-3468. 2021.
- RUT, G., GRZESIAK, M. T., MAKSYMOWICZ, A., JURCZYK, B., RZEPKA, A., HURA, K., & GRZESIAK, S. Responses of a root system structure to soil compaction stress among maize (*Zea mays* L.) hybrids. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 208(1), 106-119. 2022.

- SCHUSTER, I., RODRIGUES, R. A. D. O., & LINARES, E. Genetically modified corn in Brazil: Historical, results and perspectives. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 21. 2022.
- SHAHEB, M. R., VENKATESH, R., & SHEARER, S. A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. **Journal of Biosystems Engineering**, 1-23. 2021.
- SHAHEB, R. **A study on the effect of tyre inflation pressure on soil properties, growth and yield of maize and soybean in Central Illinois** (Doctoral dissertation, Harper Adams University). 2020.
- SILVA, L. D. C. M., AVANZI, J. C., PEIXOTO, D. S., MERLO, M. N., BORGHI, E., DE RESENDE, A. V., ... & SILVA, B. M. Ecological intensification of cropping systems enhances soil functions, mitigates soil erosion, and promotes crop resilience to dry spells in the Brazilian Cerrado. **International Soil and Water Conservation Research**, 9(4), 591-604. 2021a.
- SILVA, M. F., FERNANDES, M. M. H., FERNANDES, C., DA SILVA, A. M. R., FERRAUDO, A. S., & COELHO, A. P. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, 209, 104924. 2021b.
- SILVA, R. F., DA COSTA SEVERIANO, E., DE OLIVEIRA, G. C., BARBOSA, S. M., PEIXOTO, D. S., TASSINARI, D., ... & FIGUEIREDO, T. D. A. F. R. Changes in soil profile hydraulic properties and porosity as affected by deep tillage soil preparation and Brachiaria grass intercropping in a recent coffee plantation on a naturally dense Inceptisol. **Soil and Tillage Research**, 213, 105127. 2021c.
- SMITH, E. **The effect of agricultural traffic and tillage on soil physical properties and crop yields** (Doctoral dissertation, Harper Adams University). 2017.
- SUZUKI, L. E. A. S., REINERT, D. J., ALVES, M. C., & REICHERT, J. M. Medium-term no-tillage, additional compaction, and chiseling as affecting clayey subtropical soil physical properties and yield of corn, soybean and wheat crops. **Sustainability**, 14(15), 9717. 2022.
- TANUMIHARDJO, S. A., MCCULLEY, L., ROH, R., LOPEZ-RIDAURA, S., PALACIOS-ROJAS, N., & GUNARATNA, N. S. Maize agro-food systems to ensure food and nutrition security in reference to the Sustainable Development Goals. **Global Food Security**, 25, 100327. 2020.
- TORRES, L. C., KELLER, T., DE LIMA, R. P., TORMENA, C. A., DE LIMA, H. V., & GIAROLA, N. F. B. Impacts of soil type and crop species on permanent wilting of plants. **Geoderma**, 384, 114798. 2021.
- UNGER, P. W., & KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy journal**, 86(5), 759-766. 1994.
- VELHO, J. P., ZARDIN, P. B., JOBIM, C. C., HAYGERT-VELHO, I. M. P., ALESSIO, D. R. M., GIOTTO, Ê., ... & GEHRKE, C. R. Meta-analysis of corn plants, green fodder (ensilage), and silages of different types of maize hybrids used in experimental conditions in Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, 41(1), 237-254. 2020.
- VIZIOLI, B., CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V., TORMENA, C. A., & BARTH, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, 209, 104935. 2021.
- ZHANG, R., MA, S., LI, L., ZHANG, M., TIAN, S., WANG, D., ... & WANG, X. Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: **A review. Grain & Oil Science and Technology**, 4(3), 89-107. 2021.