

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUÍS EDUARDO NACLE DAVID

EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO FEIJÃO SOB NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO
EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

CURITIBA

2024

LUÍS EDUARDO NACLE DAVID

EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO FEIJÃO SOB NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO
EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentada ao curso de graduação em Agronomia, Setor de ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. André Carlos Auler
Coorientador: Eng. Agr. Me. Pedro Rubén Veira Fariña

CURITIBA

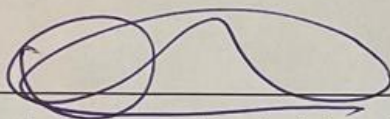
2024

TERMO DE APROVAÇÃO

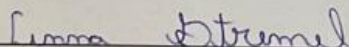
LUÍS EDUARDO NACLE DAVID

EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO FEIJÃO SOB NÍVEIS DE
COMPACTAÇÃO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

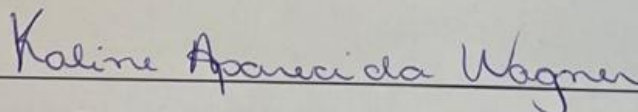
Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro(a)
Agrônomo(a) no Curso de Graduação em Agronomia, pela seguinte banca
examinadora:



Orientador Professor Dr. André Carlos Auler
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola
Setor de Ciências Agrárias



Bióloga Anna Cecília Ferreira Stremmel
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Setor de Ciências Agrárias



Eng. Agr. Me. Kaline Aparecida Wagner
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Setor de Ciências Agrárias

Curitiba, 19 de dezembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Estou aqui, fazendo um agradecimento a todos que ajudaram e me apoiaram dentro destes cinco anos de Graduação, onde muitas vezes, este apoio foi de suma importância. Portanto, gostaria de agradecer:

Primeiramente à Deus, por me proporcionar esta oportunidade de estar me formando, tendo saúde e sempre me abrindo portas.

Aos meus pais, por terem me apoiado durante todo este processo de aprendizado, sempre confiando em mim.

A toda a minha família, que me animavam todos os finais de semana, me dando força para continuar.

Ao Professor Dr. André Carlos Auler, meu orientador neste trabalho, por toda sua atenção e ajuda nos momentos de dúvida.

A orientação e ajuda do pós-graduando Guilherme de Souza Sotsek e do Doutorando Pedro Ruben Viera Fariña.

A todos os meus colegas e amigos, que fiz durante esta graduação, que sempre estiveram ao meu lado.

A todos os integrantes do grupo GEIES que me acolheram e sempre estiveram ao meu lado

A Universidade Federal do Paraná (UFPR) por me proporcionar um ensino de qualidade durante a graduação.

RESUMO

A compactação de solo é um fenômeno cada vez mais comum, associado ao uso intensivo de equipamentos agrícolas em condições inadequadas de umidade do solo, que limita a produção vegetal. Conjuntamente, a baixa disponibilidade de fósforo, também limita o desenvolvimento das plantas. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da adubação fosfatada sob níveis de compactação, além de avaliar o desenvolvimento fisiológico e morfológico do feijão em sistema de plantio direto (SPD). Para isso, foi conduzido experimento em campo, sob DBC em esquema de parcela subdividida, com três repetições. Inicialmente, obteve-se a curva de compactação do solo para obter a densidade máxima de referência, por meio do ensaio de Proctor, e com os resultados obtidos, foram definidos 4 níveis de grau de compactação (GC): Natural (GC=80±2%), Leve (GC = 85±2%), Moderada (GC = 90±2%) e Alta (GC = 95±2%), que foram induzidos pelo tráfego de um trator agrícola (CASE 165 de 10.500 kg). As doses de P₂O₅ (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹), foram aplicadas em sulco, por ocasião da semeadura do feijão, utilizando o superfosfato triplo como fonte. Foram analisadas a massa seca da planta, produtividade de grãos e P acumulado na parte aérea. Além disso, foram analisadas a eficiência agronômica (EA), Eficiência Fisiológica (EF), Eficiência de recuperação (ER) e Eficiência de utilização (EU). Para a massa seca, na maior dose de P a massa seca aumentou em até 71,5% no nível alto de compactação, comparado com o tratamento sem aplicação de P. Na produtividade, aplicando doses de 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ pode-se amenizar os efeitos da compactação no nível de alta compactação, aumentando a produtividade em 200%. Já a eficiência da adubação fosfatada em relação a diferentes doses diminuiu com o aumento da compactação. Neste sentido, torna-se evidente a influência das doses de P, nos efeitos da compactação do solo, melhorando o desenvolvimento das plantas e aumentando a produtividade no nível de alta compactação porém com baixa eficiência da adubação fosfatada correlacionado a esse aumento da compactação do solo.

Palavras-chave: Fósforo no solo, Fósforo na planta, Recomendação de adubação, Manejo do solo.

ABSTRACT

Soil compaction is an increasingly common phenomenon associated with the intensive use of agricultural machinery under inadequate soil moisture conditions, which limits plant production. Similarly, low phosphorus availability also constrains plant development. Therefore, the present study aimed to evaluate the efficiency of phosphorus fertilization under different levels of soil compaction and assess the physiological and morphological development of beans in a no-till system (NTS). A field experiment was conducted using a randomized block design (RBD) in a split-plot scheme with three replications. Initially, the soil compaction curve was determined to obtain the maximum reference density through the Proctor test, and based on the results, four levels of compaction degree (CD) were established: Natural (CD = $80 \pm 2\%$), Low (CD = $85 \pm 2\%$), Moderate (CD = $90 \pm 2\%$), and High (CD = $95 \pm 2\%$), which were induced by the traffic of an agricultural tractor (CASE 165 weighing 10,500 kg). Phosphorus doses (0, 50, 100, and 150 kg ha⁻¹ of P₂O₅) were applied in the planting furrow at the time of bean sowing, using triple superphosphate as the source. The variables analyzed included plant dry mass, grain yield, and phosphorus accumulated in the aerial part. Additionally, agronomic efficiency (AE), physiological efficiency (PE), recovery efficiency (RE), and utilization efficiency (UE) were assessed. For dry mass, at the highest P dose, dry mass increased by up to 71.5% at the high compaction level compared to the treatment without P application. In terms of yield, applying 150 kg ha⁻¹ of P₂O₅ mitigated the effects of compaction at the high compaction level, increasing yield by 200%. However, phosphorus fertilization efficiency across different doses decreased with increasing soil compaction.

Keywords: Soil phosphorus, Plant phosphorus, Fertilization recommendation, Soil management..

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 A CULTURA DO FEIJÃO E O SISTEMA DE PLANTIO DIRETO.....	17
2.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO	18
2.3 ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	20
2.4 INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NA ABSORÇÃO DE FÓSFORO.	22
2.5 EFICÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	29
4.2 MASSA SECA	30
4.3 P ACUMULADO	33
4.4 PRODUTIVIDADE	35
4.5 EFICIÊNCIAS.....	37
5 CONCLUSÃO	39
6 REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O feijão no Brasil tem grande relevância por ser um alimento básico na alimentação da maioria dos brasileiros (BORÉM *et al.*, 2015). Sua produtividade média na safra 2023/2024 foi de 1.176 kg ha sendo cultivado em mais de 2,5 milhões de hectares (IBGE, 2024). A adubação fosfatada é muito importante na cultura do feijão pois o P (Fosforo) é o 4º nutriente mais absorvido e está relacionado com a transferência de célula, fotossíntese e com o crescimento radicular. Nesse sentido, a disponibilidade de fósforo é influenciada por fatores físicos do mesmo como a compactação (VARENES *et al.*, 2002).

A compactação do solo é um dos principais fenômenos responsáveis pela degradação da qualidade física do solo na agricultura (BLANCO-CANQUI & RUIS, 2018), sendo associado ao aumento do uso intensivo de maquinários agrícolas de grande porte, ocasionando a desestruturação entre macro e microporos (KELLER *et al.*, 2019). Com isso, esse fenômeno impacta na adsorção de nutriente, infiltração, redistribuição de água e trocas gasosas, afetando no desenvolvimento do sistema radicular podendo limitar a absorção de nutrientes pelas plantas, prejudicando diretamente no desenvolvimento das plantas (PEZZONI *et al.*, 2014; SALAZAR *et al.*, 2022).

Nesse contexto, através do aumento da compactação, eleva-se o contato entre os nutrientes e as partículas do solo, o que resulta em alterações no transporte desses elementos para a planta (SILVA *et al.*, 2008). Assim, pelo elemento P ter baixa mobilidade no solo e mecanismo de transporte por difusão, o fósforo é altamente afetado com aumento do grau da compactação, impactando na eficiência da absorção de nutrientes (MALAVOLTA, 2006).

Portanto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência da adubação fosfatada no feijão sob níveis de compactação em sistema de plantio direto, além de avaliar o desenvolvimento fisiológico e morfológico da cultura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DO FEIJÃO E O SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

O Sistema de Plantio Direto (SPD) é uma prática de manejo que tem demonstrado eficiência no controle da erosão, via manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo, revolvimento restrito a linha de semeadura e rotação de culturas e propicia, também, o aumento da disponibilidade de nutrientes e aumento da sustentabilidade (CERETTA et al., 2002; MEURER, 2015). Simidu *et al.* (2010), observaram que o uso da palhada de *Brachiaria brizantha* em cobertura proporcionou melhores condições para a produtividade ao feijoeiro em sistema de plantio direto.

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) possui grande importância econômica ao Brasil, por estar presente na dieta da maioria dos brasileiros (BONETT *et al.*, 2007), sendo uma das culturas mais importantes cultivadas durante a entressafra em sistemas de irrigação nas regiões Central e Sudeste do Brasil. (BARBOSA *et al.*, 2001). Estima-se que na safra total de 2023/2024 foi de 3,25 milhões de toneladas de grãos, 7% superior à produção de 2022/23 (CONAB, 2024).

O feijoeiro pertence à família da fabaceae, possui hábito de crescimento determinado ou indeterminado, sendo que são classificados e caracterizados em 4 grupos principais tipo I(hábito de crescimento determinado, arbustivo e porte ereto), tipo II(hábito de crescimento indeterminado, arbustivo, porte da planta ereto e caule pouco ramificado), tipo III(hábito de crescimento indeterminado, porte semiprostrado, com ramificação aberta) e tipo IV(hábito de crescimento indeterminado e planta trepadora ou enredadora) (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O sistema radicular principal do feijão é caracterizado como pivotante, com ramificações secundárias que exploram uma camada de solo não muito profunda. Já a parte aérea consta de uma haste principal ramificada, com folhas compostas de três folíolos deltoides (PEREIRA *et al.*, 2015), em relação as exigências nutricionais da cultura do feijão, a planta é considerada exigente em fertilidade e qualidade do solo, com pH entre 5,8 a 6,2, devido ao ciclo curto e ao sistema radicular superficial e pouco desenvolvido (ROSOLEM & MARUBAYASHI, 1994).

A extração e exportação de nutrientes varia de acordo a cultura (PAULETTI e MOTTA, 2019). No cultivo de feijão para a produção de grãos, a aplicação de 120 kg

ha⁻¹ de nitrogênio resultou na extração de 84,2 kg ha⁻¹ e 40 kg ha⁻¹, e na exportação de 80,2 kg ha⁻¹ e 55 kg ha⁻¹ de nitrogênio, no sistema de plantio direto, durante os anos agrícolas de 2007/08 e 2008/09, respectivamente (PEREZ *et al.*, 2013).

Por conta de fatores relacionados ao clima, práticas de manejo e da fisiologia da planta, a cultura do feijoeiro se depara com baixas produtividade sendo que atualmente existem cultivares com potencial de até 3.600 kg ha⁻¹ (REZENDE *et al.*, 2004; MODOLO *et al.*, 2010).

2.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Nas últimas décadas, a compactação gerada pelos implementos agrícolas na produção agrícola vem preocupando e impactando a agricultura (KELLER *et al.*, 2019), isso ocorre devido ao aumento do uso de implementos agrícolas, que tem aumentado de tamanho, e pelo intenso tráfego sobre o solo, em condições inadequadas de umidade, causando a alteração das propriedades físicas do solo como a redução da macroporosidade e aumento da densidade do solo (RICHART *et al.*, 2005). Segundo Schjønning *et al.*, (2015), entre 1989 e 2009 o peso das rodas das colheitadeiras aumentaram 65%, elevando cada vez mais a possibilidade da quebra da resistência dos solos agrícolas. Nesse contexto, com o aumento desproporcional dos maquinários em relação aos pneus, houve um aumento na força aplicada sobre o solo, o que elevou a degradação e o cisalhamento na superfície, desestruturando, assim, o arranjo das partículas do solo (WIERMANN *et al.*, 1999, 2000).

Embora existam tecnologias novas em pneus que diminuía a força aplicada no solo, são necessárias outras práticas de manejo para minimizar esses impactos (TEKESTE *et al.*, 2023). Essas tensões geradas na interface solo/pneu compactam diferentes camadas do solo (HORN & LEBERT, 1994), devido ao tráfego de maquinário pesado (KELLER *et al.*, 2019), sendo que com a quebra da resistência interna do solo, camadas mais profundas podem ter suas propriedades físicas afetadas (HORN, 1988).

O termo compactação do solo está associado ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada no solo (LIMA, 2004). Assim, pode-se entender a compactação do solo como uma força externa gerada no solo, ocasionando a quebra dos agregados consequentemente aumentando a densidade global e reduzindo a porosidade

(MANTOVANI, 1987). A força aplicada está associada ao grau de compactação do solo e diminuição do volume dos poros com o conteúdo de água constante (CHEN *et al.*, 2014; NUNES *et al.*, 2015), sendo o grau de compactação definido como a razão entre a densidade aparente real e a densidade aparente de referência obtida pela compressão uniaxial de solo úmido à pressão estática de 200 kPa ou densidade máxima obtida pelo teste de Proctor (LIPIEC & HATANO, 2003).

O sistema de plantio de direto bem estruturado pode amenizar a compactação em camadas mais profundas (RODRIGUES *et al.*, 2021). Contudo, de acordo com Seixas (2005), em função do não revolvimento do solo no sistema de plantio direto, ocorre o aumento da densidade nas camadas superficial, diminuindo a macroporosidade do solo.

O processo de compactação é influenciado por fatores específicos de acordo com sua classe de solo, como energia de compactação, textura, teor de matéria orgânica e umidade (ALVES *et al.*, 2003; CABRAL *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2012), sendo a textura um fator que pode determinar a profundidade de transmissão e persistência da compactação, com aumento do teor de argila maior a espessura da camada compactada (SILVA *et al.*, 2008). Além disso, o teor de umidade é determinante para a compactação pois afeta a resistência a penetração e a expansividade do solo, propiciando o aumento da densidade do solo e o efeito da compactação (BONINI & ALVES, 2012).

A compactação excessiva afeta a absorção de nutrientes, infiltração de água e trocas gasosas, atingindo diretamente na produtividade da cultura (BICKI; SIEMENS, 1991; SOANE, 1986). O alto grau de compactação e elevadas densidades reduz a taxa de crescimento do sistema radicular consequentemente diminuindo a capacidade da planta absorver nutrientes em camadas profundas (SILVA *et al.*, 2018). Guimarães *et al.*, (2002), concluíram que o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea do feijoeiro foi afetado com o aumento da compactação do solo, sendo que o efeito foi mais expressivo a partir da densidade do solo de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$.

Nesse sentido, com o aumento da resistência a penetração restringe a absorção de nutrientes para planta afetando o crescimento das culturas (BENGOUGH *et al.*, 2011; POEPLAU *et al.*, 2016), sendo que a resistência varia de acordo com as condições de manejo do solo, intensidade do tráfego de máquinas e umidade do solo (SILVA *et al.*, 2004).

O efeito da compactação na eficiência da absorção de nutrientes vem sendo relatado em diversas culturas e ocorre principalmente devido a diminuição da divisão celular meristemática e aumento do diâmetro da raiz, impactando na área de exploração das raízes, afetando diretamente na absorção de nutrientes (COLLARES *et al.*, 2008).

Na camada compactada há uma alteração na porosidade total do solo, desestruturando o espaço destinado ao crescimento radicular e área explorada de solo pelas raízes (BEUTLER & CENTURION, 2004; BERGAMIN *et al.*, 2010). Esse processo pode afetar a difusão do fósforo até o sistema radicular, sendo que para sua estimativa são considerados a área das raízes, a distância entre o elemento e a unidade de absorção, além do gradiente de concentração do nutriente (MALAVOLTA, 2006). Santos *et al.*, (2005) observaram que em solos mais compactados foi necessário a aplicação de doses maiores de P_2O_5 para o milho ter um desenvolvimento semelhante às obtidas nos tratamentos não compactados. Pessoa *et al.*, (2012), verificaram que o crescimento aéreo e o crescimento radicular da cultura do feijão são prejudiciais pela compactação do solo.

2.3 ADUBAÇÃO FOSFATADA

O fósforo (P) é classificado como um macronutriente devido ao seu alto consumo pelas plantas. Isso ocorre principalmente porque o fósforo desempenha funções cruciais nas plantas, sendo um componente essencial de importantes estruturas macromoleculares, como os ácidos nucleicos de DNA e RNA (MARSCHNER, 2012). Além disso, é crucial no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese (GRANT *et al.*, 2001).

O P tem um papel fundamental na composição do ATP (trifosfato de adenosina), que é a principal molécula carreadora da energia química, utilizada nas mais diversas reações que ocorrem nas células. Portanto, a carência de fosfato causa distúrbios severos no metabolismo e desenvolvimento das plantas (MENDES, 2007).

Nesse sentido, esse elemento, P, tem baixa mobilidade no solo e encontra-se parcialmente disponível para as plantas, pois ocorrem processos como formação de precipitados do P com cálcio em solo alcalino ou Fe e Al em solos ácidos (ZHOU *et al.*, 2016). O principal mecanismo de transporte do fósforo no solo é a difusão,

envolvendo a passagem de nutrientes de uma região de maior concentração para uma de menor concentração (VASCONCELOS, 2021). Na agricultura, a baixa disponibilidade de fósforo (P) limita o crescimento das plantas devido à sua difusão lenta e à interação com diversos componentes do solo (SYERS *et al.*, 2008).

O manejo adequado da adubação fosfatada é fundamental para otimizar a eficiência na absorção de nutrientes. Quando aplicada de forma distribuída nas áreas de semeadura direta, essa prática pode elevar a concentração de fósforo na camada superficial em comparação com a subsuperfície. (SANTOS *et al.*, 2008). Pelo aumento da relação adubo/solo, podem exigir maiores doses de fertilizantes para se obter a mesma eficiência que a adubação no sulco de semeadura (PRADO *et al.*, 2001). Sendo mais recomendado a aplicação pela proximidade às raízes. (SILVA *et al.*, 2021). Segundo Almeida *et al.*, (2016), a absorção de P pelas culturas é afetada conforme a concentração de P na solução do solo, sendo governado conforme os teores de argila, mineralogia predominante, pH do solo, umidade, compactação do solo, e o modo de aplicação dos fertilizantes.

Atualmente, as fontes de fósforo mais comumente utilizadas são o superfosfato simples (SS), superfosfato triplo (ST), monoamônio fosfato (MAP) e fosfatos naturais reativos (FR). Esses fertilizantes podem ser classificados com base em suas solubilidades em água, citrato neutro de amônio (CNA) e ácido cítrico (AC), conforme as normas estabelecidas pela legislação brasileira (SOUZA & LOBATO, 2004).

O fosfato diamônio (DAP) aumenta inicialmente o pH ao redor de seus grânulos, o que provoca a precipitação do Al, resultando em maior disponibilidade de fósforo no solo. Por outro lado, fontes como o SS, ST e MAP acidificam o pH nas proximidades dos grânulos, intensificando a atividade do íon Al devido à diminuição do pH causada pela dissolução desses fertilizantes, o que, por sua vez, reduz a concentração de fósforo na solução do solo (ERNANI *et al.*, 2002).

Dessa forma, um dos principais aspectos a ser considerado na adubação fosfatada, além da dose e do tipo de fertilizante, é o fenômeno da fixação, que limita o deslocamento do fósforo no solo, fazendo com que ele se mova lentamente por difusão até atingir as raízes (MALAVOLTA *et al.*, 1980), sendo que a fixação pode ser impactada através do fenômeno da compactação, reduzindo a absorção de nutrientes (ALMEIDA *et al.*, 2016).

2.4 INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NA ABSORÇÃO DE FÓSFORO.

A relação dos efeitos da compactado na absorção de fosforo do solo vem sendo estudada desde a década de 80 (HOFFMANN; JUNGK, 1995; NADIAN *et al.*, 1997; SHIERLAW; ALSTON, 1984), com isso diversos pesquisadores passaram a investigar a interação entre a adubação fosfatada e a compactação do solo, analisando seus impactos no crescimento das plantas. (BARZEGAR *et al.*, 2006; HAMZA; ANDERSON, 2005; SILVA *et al.*, 2018; VALADÃO *et al.*, 2015)

As interações entre os aspectos químicos e físicos do solo podem afetar a absorção de nutrientes pelas plantas e resultar em mudanças na produtividade. Solos com compactação excessiva têm sua macroporosidade e porosidade total reduzidas (BERGAMIN *et al.*, 2010), o que impacta a aeração, o fluxo de água (ZAMBRANA *et al.*, 2010) e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (VALADÃO *et al.*, 2015). Assim, com a compactação ocorre o maior contato dos nutrientes com as partículas sólidas do solo, o que pode alterar o transporte dos elementos até as plantas (SILVA *et al.*, 2008). Isso ocorre com elementos que utilizam o mecanismo de fluxo de massa e difusão, como N e P, respectivamente, sendo que a interferência desse transporte até raiz é influenciada pela estrutura do solo (ALVARENGA *et al.*, 1997).

A adubação fosfatada está intimamente relacionada à compactação do solo (SANTOS *et al.*, 2005; RIBEIRO *et al.*, 2010). Devido à mobilidade limitada do fósforo no solo, a eficácia dessa adubação em solos compactados depende do tipo de solo. Quanto maior a capacidade de adsorção do solo, maior a probabilidade de a compactação diminuir o teor de fósforo nas plantas (ALVES *et al.*, 2003).

É importante também considerar que a adubação fosfatada influencia o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, assim favorecendo a absorção de água e nutrientes (CRUSCIOL *et al.*, 2005; RIBEIRO *et al.*, 2010). A disponibilidade de fósforo no solo pode ajudar a mitigar os efeitos da compactação, promovendo uma maior produção mesmo com o solo compactado (SANTOS *et al.*, 2005). Estudos realizados em *Arabidopsis sp.* mostraram que a baixa disponibilidade de fósforo inibe o crescimento das raízes principais, enquanto estimula a formação e o alongamento das raízes laterais (RUIZ *et al.*, 2015). Por outro lado, raízes finas com um diâmetro ligeiramente menor que os pequenos poros do solo podem alongar nos espaços porosos texturais e podem não ser afetadas pelo aumento da resistência do solo

quando há uma proporção suficientemente grande de pequenos poros (JIN *et al.*, 2013, BODNER *et al.*, 2014).

Com o aumento da compactação aumenta a maior proximidade entre as raízes e as partículas do solo, diminui a distância que o íon deve percorrer até alcançar a superfície absorvente, assim pode aumentar o mecanismo de difusão do P até certo ponto (SILVA *et al.*, 2008). Porém, com o intenso contato das partículas associado a alta capacidade de adsorção do solo, intensifica esse processo de adsorção e reduz a disponibilidade em solução do P (RIBEIRO *et al.*, 2010).

De forma geral, sob compactação, há redução da macroporosidade e porosidade total do solo e aumento da resistência do solo à penetração o que provoca redução e modificação do sistema radicular (VALADÃO *et al.*, 2015) e por consequência afeta a absorção de nutrientes imóveis no solo e o contato íon-raiz. Assim, impactando a eficiência da adubação fosfatada (VALADÃO *et al.*, 2017).

2.5 EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

Com o crescimento das áreas agrícolas associado ao esgotamento das reservas naturais de fósforo, evidencia-se um aumento dos preços dos fertilizantes fosfatados. Assim, a busca da eficiência da adubação é fundamental, sendo que diversos fatores influenciam na disponibilidade de fósforo para as culturas (RESENDE; NETO, 2007). O aumento da produtividade com a adubação depende da eficiência nutricional, sendo que está relacionado com as características químicas e físicas do solo, da cultura plantada e da disponibilidade de água (FAGERIA *et al.*, 2003).

A eficiência nutricional é a quantidade de matéria seca ou grãos produzidos por unidade de nutriente aplicado, porém devido a diversas formas de interpretações da eficiência nutricional há uma dificuldade na comparação entre os estudos encontrados na literatura (GOURLEY *et al.*, 1994; FAGERIA *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2010; VENEKLAAS *et al.*, 2012).

Maranville *et al.* (1980); Siddiqi & Glass (1981); Craswell & Godwin (1984) e Fageria (1992) relataram que a eficiência nutricional pode ser expressa e calculada de cinco maneiras diferentes: 1) eficiência agrônômica (Produção econômica obtida (grãos, no caso de culturas anuais) por unidade de nutriente aplicado e é expressa em kg do produto/kg de nutriente (kg kg^{-1})); 2) eficiência fisiológica (Produção biológica obtida (palha, em culturas anuais) por unidade de nutriente acumulado e é expressa

em kg de massa seca/kg de nutriente (kg kg^{-1}); 3) eficiência na produção de grãos (Produção de grão obtida por unidade de nutriente acumulado e é expressa em kg de grãos/kg de nutriente acumulado (kg kg^{-1})); 4) eficiência de recuperação (Quantidade de nutriente acumulado por unidade de nutriente aplicado e é expressa em porcentagem); e 5) eficiência de utilização (Combinação da eficiência fisiológica e a eficiência de recuperação, expressa em porcentagem).

Alguns autores classificaram a eficiência de utilização de P (EUP), como uma definição melhor, sendo definida, como o aumento da quantidade de biomassa ou produto de interesse econômico (grãos, frutas, fibras ou etanol) produzido por unidade de P absorvido (BALIGAR *et al.*, 2001; VENEKLAAS *et al.*, 2012).

Em diversos tipos de solo, a absorção de fósforo pelas plantas é bastante limitada, devido à baixa concentração e difusão do fósforo na solução do solo, além da capacidade restrita de reposição do fósforo na interface entre o solo e as raízes (GEORGE; RICHARDSON, 2006). Nesse contexto, pelo fósforo ser um elemento com baixa mobilidade no solo, um dos fatores que está pode impactar a eficiência da adubação fosfatada é compactação, sendo que quanto maior a densidade do solo e maior for a capacidade de adsorção do mesmo, maior possibilidade da compactação reduzir o teor de P nas plantas (ALVES *et al.*, 2003).

A eficiência nutricional pode ser um indicador capaz de demonstrar a capacidade de uma planta em absorver e aproveitar o fósforo do solo (BALIGAR *et al.*, 2001). A utilização dos fertilizantes fosfatados aplicados ao solo pelas plantas varia de 10-20% (CHIEN *et al.*, 2011), sendo assim existem oportunidades de obter ganhos com a melhor eficiência nutricional de P nas plantas, buscando melhorar o aproveitamento desses fertilizantes (LYNCH, 2007; VENEKLAAS *et al.*, 2012).

O uso de plantas com alta eficiência no aproveitamento de nutrientes pode ser fundamental para o desenvolvimento de uma agricultura produtiva, com custos reduzidos e menor impacto ambiental (FAGERIA *et al.*, 2008). No entanto, essas plantas, embora eficientes na absorção e utilização de fósforo, não são suficientes por si só para garantir a manutenção de altos níveis de produtividade, sendo necessária a aplicação de fertilizantes fosfatados no solo (SÁNCHEZ, 2010).

Assim, o avanço no desenvolvimento de plantas eficientes, aliado à implementação de práticas de manejo que permitam que as plantas alcancem todo o seu potencial genético, é sem dúvida um grande desafio para a agricultura contemporânea (LYNCH, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Fazenda Experimental do Canguiri, área de domínio da Universidade Federal do Paraná (UFPR), situada no município de Pinhais-PR, com coordenadas geográficas aproximadas de 25° 23' sul e 49° 08' oeste. A área do experimento implantado possui um solo Cambissolo Háplico Distrofíco Tb típico, caracterizado por ter um relevo moderadamente ondulado e uma textura argilosa. O solo já supracitado apresentava baixos níveis de fósforo disponível (P) e nenhuma restrições físicas significativas, assim se tornava mais receptivo à adubação fosfatada e suscetível à compactação.

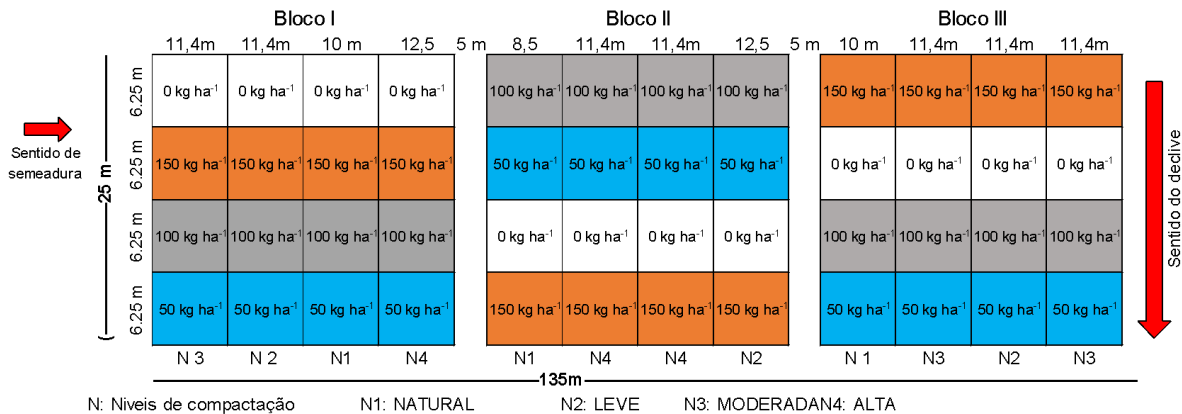
O município de Pinhais-PR possui um clima temperado úmido (Cfb), caracterizado por temperaturas médias de 22,5 °C no período mais quente e 12,4 °C no período mais frio. A precipitação média anual é de cerca de 1.400 mm, podendo haver incidência ocasional de geada e granizo. (ALVARES *et al.*, 2013). Este experimento com a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) faz parte de uma tese de doutorado, do Doutorando Sr. Pedro Ruben Vieira Farina, no qual se iniciou com a implantação da cultura do milho em 2022/23, trigo em 2023 e no presente momento a cultura do feijão seguindo o princípio de rotação de culturas.

Nesse sentido, o plantio do feijão iniciou-se no dia 15 de janeiro de 2024 em campo, utilizando a cultivar de feijão IPR SABIA, numa densidade de 260.000 sementes ha⁻¹, através de uma semeadora de plantio direto equipada com discos defasados, distribuído em sulcos espaçados 0,5 m. Já o delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados em esquema de parcela subdividida (4x4), com três repetições, totalizando 48 parcelas (FIGURA 1). As parcelas apresentaram uma variação de largura conforme a figura 1 devido a declividade da área, com um total médio de 62,5 m² (6,25 x 10 m – comprimento e largura) e 0,5 m de bordadura em cada extremidade. Assim, a área útil média de cada parcela será de 47,25 m².

Os tratamentos dispostos nas parcelas experimentais foram introduzidos pelo tráfego de um trator agrícola (CASE PUMA 165), com rodado de pneus diagonais, bitola traseira de 1,7 m e massa total de 10,5 Mg com pneus dianteiros (480/70 R28) e traseiros (580 / 70 R38). Durante o tráfego do trator, foi utilizada a velocidade de 5 km h⁻¹ a uma rotação de 1.800 rpm. Assim gerando quatro níveis de grau de compactação do solo (4 níveis de grau de compactação (GC): Natural (GC=80±2%),

Leve (GC = $85\pm 2\%$), Moderada (GC = $90\pm 2\%$) e Alta (GC = $95\pm 2\%$)). Já esses níveis de compactação do solo foram classificados através da curva de compactação do solo, por meio do teste de Proctor (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ANNUAL, 1992), levantando os valores de densidade máxima do solo e umidade ótima de compactação.

Nas subparcelas, foram aplicadas as doses de P_2O_5 (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹), em sulco, por ocasião da semeadura das culturas, utilizando o superfosfato triplo como fonte. As doses utilizadas foram definidas a partir da dose recomendada para a cultura em função da disponibilidade de fósforo no solo, para tanto, seguiu-se a recomendação para o estado do Paraná. A partir da dose recomendada, foi subdividida em uma dose testemunha, baixa, recomendada e superdose. Já a adubação dos demais fertilizantes (N e K₂O) foram aplicados homogeneamente e manualmente em superfície (60 e 150 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia e KCl respectivamente) de acordo a análise química do solo e a necessidade da cultura (PAULETTI e MOTTA, 2019).



Fonte: Fariña (2022).

Figura 1: Distribuição espacial do experimento com doses de P_2O_5 (kg⁻¹) e níveis de compactação do solo (N). UFPR Fazenda experimental Canguiri (2023/24).

As plantas daninhas, pragas e doenças foram controladas com herbicidas, inseticidas e fungicidas, respectivamente, de acordo com recomendações técnicas da cultura do feijoeiro (CEPEF, 2003).

3.1 AMOSTRAGEM E ANÁLISES DE PLANTAS

No estágio R7-R8 da cultura do feijão foi realizada a amostragem da parte aérea de cada parcela, coletado 3 fileiras de 1 metro aleatoriamente. Assim, avaliando o estágio fenológico de máximo acúmulo de nutrientes na parte aérea da planta (Embrapa, 2019).

As amostras foram secas em estufa a 65 °C, por 72 horas para determinação da massa seca da parte aérea, após isso foi pesado e calculado a massa seca em kg ha⁻¹. Já para a determinação do P absorvido, após secagem, as amostras foram trituradas e submetidas a digestão com peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico, em bloco digestor. Em sequência, os teores de nutrientes nos extratos foram lidos por meio do complexo fosfomolibdênio via UV-VIS Silva (2009). Foi calculada a exportação de P (kg ha⁻¹) pelo produto entre o teor do nutriente na parte aérea e massa seca produzida.

A quantificação do rendimento de grãos foi realizada após a aplicação do regulador de maturação, amônio-glufosinato (Glifosato, na dose de 1.230 g ha⁻¹ i.a.). Para quantificação da produtividade da cultura, foram colhidos uma nova amostra da parte central da área útil de cada parcela (3 fileiras de 1 metro, equivalente a 1,2 m²). Posteriormente, a massa de grãos teve sua massa e umidade aferidas, para a determinação da produtividade (kg ha⁻¹) considerando a umidade de 140 g kg⁻¹.

3.2 CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA

Foi determinada a eficiência nutricional para cada nível de compactação, de acordo com métodos propostos por Fageria (2005), por meio do cálculo da eficiência agrônômica (EA), eficiência fisiológica (EF), eficiência de recuperação (ER) e eficiência de utilização de fósforo (EUP). Foi considerado as medias da massa seca, produtividade e P acúmulo em kg ha⁻¹, em cada dose de P aplicada nos graus de compactação natural, leve, moderada e alta.

A EA significa a produção econômica obtida (grãos, no caso de culturas anuais) por unidade de nutriente aplicado e é expressa em kg do produto/kg de nutriente (kg kg⁻¹). Sendo que o cálculo dela é expresso conforme a equação 1:

$$EA(\text{kg kg}^{-1}) = \frac{\text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) com P} - \text{Produção de grãos (kg ha}^{-1}\text{) sem P}}{\text{Dose de P aplicada (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

A EF significa a produção biológica obtida (palha, em culturas anuais) por unidade de nutriente acumulado e é expressa em kg de massa seca por/kg de nutriente (kg kg^{-1}). Sendo que o cálculo dela é expresso conforme a equação 2:

$$EF(\text{kg kg}^{-1}) = \frac{\text{Produção de massa seca (kg ha}^{-1}) \text{ com P} - \text{Produção de massa seca (kg ha}^{-1}) \text{ sem P}}{\text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}) \text{ com P} - \text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}) \text{ sem P}}$$

A ER significa a quantidade de nutriente acumulado por unidade de nutriente aplicado e é expressa em porcentagem. Sendo que o cálculo dela é expresso conforme a equação 4:

$$ER(\text{kg kg}^{-1}) = \frac{\text{P acumulado na MS (kg ha}^{-1}) \text{ com P} - \text{P Acumulado na MS (kg ha}^{-1}) \text{ sem P}}{\text{Dose de P aplicado (kg ha}^{-1})}$$

A EUP é a combinação da eficiência fisiológica e a eficiência de recuperação é expressa em porcentagem. Sendo que o cálculo dela é expresso conforme a equação 5:

$$ER(\text{kg kg}^{-1}) = EF \times ER$$

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foram executados testes de normalidade dos resíduos por Shapiro-Wilk e homoscedasticidade por Bartlett. Os dados de produtividade, massa seca e P acumulado serão submetidos a análise de variância (ANOVA) de experimento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas (4x4), com 3 repetições. Em caso de interações significativas, foram executadas análises de desdobramento. Quando significativos os valores de F, o teste de Tukey foi aplicado para a compactação do solo, e a análise de regressão para as doses de fósforo no R 4.0.5 (R CORE TEAM, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANALISE DE VARIÂNCIA

Através da análise de variância dos parâmetros analisados, a massa seca e P-acumulado tiveram significância em relação aos níveis de compactação, a dose de P (Fósforo) e a interação entre si. Já a produtividade teve significância apenas na dose de P com um $p \leq 0,001$, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1- Valores de *F*, significância, coeficiente de variação da massa seca, produtividade e P-acumulado, analisados nos níveis de compactação e dose de P.

Variáveis	Níveis de compactação			Dose de P ₂ O ₅			NxD	
	<i>F</i>	<i>P</i>	CV%	<i>F</i>	<i>P</i>	CV%	<i>F</i>	<i>P</i>
Massa seca	11,35	**	19,24	19,10	***	19,81	2,57	*
Produtividade	3,96	ns	18,57	20,90	***	20,54	2,20	ns
P-Acumulado	5,83	*	18,10	1,22	***	15,67	6,15	***

Nota: ***Significativo a $p \leq 0,001$; **Significativo a $p \leq 0,01$; *Significativo a $p \leq 0,05$; nsNão significativo a $p \leq 0,05$; CV= coeficiente de variação em %.

Fonte: Autoria própria.

4.2 MASSA SECA

Houve incremento na produção de massa seca em função das doses de P nos níveis de grau de compactação do solo, apresentando diferença significativa no nível de compactação com a dose de 100 kg ha⁻¹, sendo que nessa dose de P₂O₅ os níveis de grau de compactação natural e leve tiveram maior produção de massa seca em relação aos níveis de grau de compactação moderado e alto. Destacando-se que a maior produção de massa seca foi no nível de grau de compactação natural com 7192,8 kg ha⁻¹ na dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Com isso, nessa dose de P₂O₅, observou-se que com o aumento dos níveis de grau de compactação diminui a produção de massa seca (figura 1).

Além disso, na produção de massa seca houve diferença estatística para os efeitos isolados dos níveis de grau de compactação (CV% = 19,24), sendo que os níveis de compactação natural e leve apresentaram a maior produção de massa seca com 4758,66 e 4993,33 kg ha⁻¹, respectivamente sendo estatisticamente iguais (figura 2).

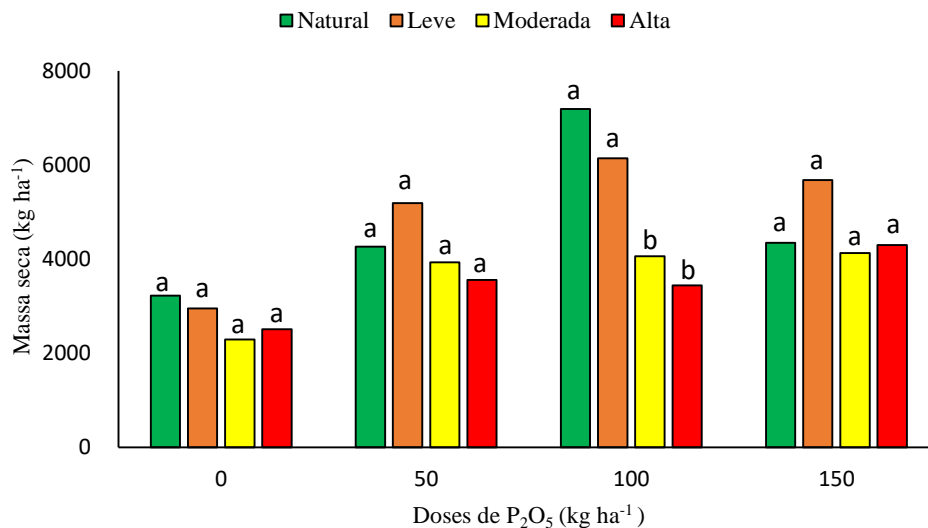


Figura 1: Produção de massa seca de feijão kg ha⁻¹, em função a níveis de grau de compactação e doses de P₂O₅ kg ha⁻¹.

Nota: Médias seguidas de mesma letra entre os níveis de compactação, dentro de cada dose de P₂O₅, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

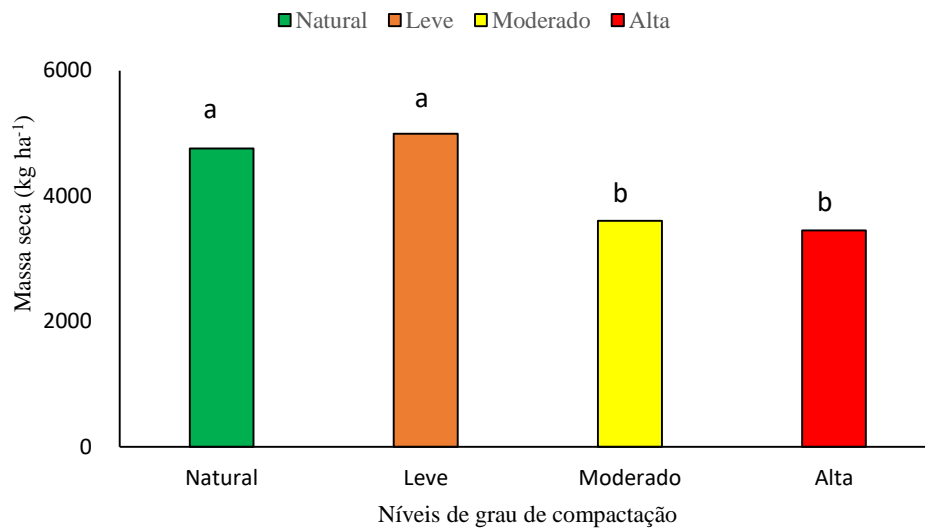


Figura 2: Produção de massa seca de feijão kg ha⁻¹, em função a níveis de grau de compactação e doses de P₂O₅ kg ha⁻¹.

Nota: Médias seguidas de mesma letra entre os níveis de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A produção máxima de massa seca no nível de grau de compactação moderado foi de 3302 kg ha⁻¹ na dose de 110,4 e kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 3). Já no nível de grau de compactação leve houve uma produção máxima de massa seca de 5152,1 kg ha⁻¹ aplicando 108,9 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Isto é, a produção de massa seca do feijão, para praticamente a mesma dose de massa de eficiência econômica, reduziu 1823 kg ha⁻¹ decorrente do aumento da compactação. Além disso, observe-se um aumento de 71% na produção de massa seca na dose 150 kg ha⁻¹ no nível de grau compactação alta em relação a dose de 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅, tendo um incremento de 1785 kg ha⁻¹.

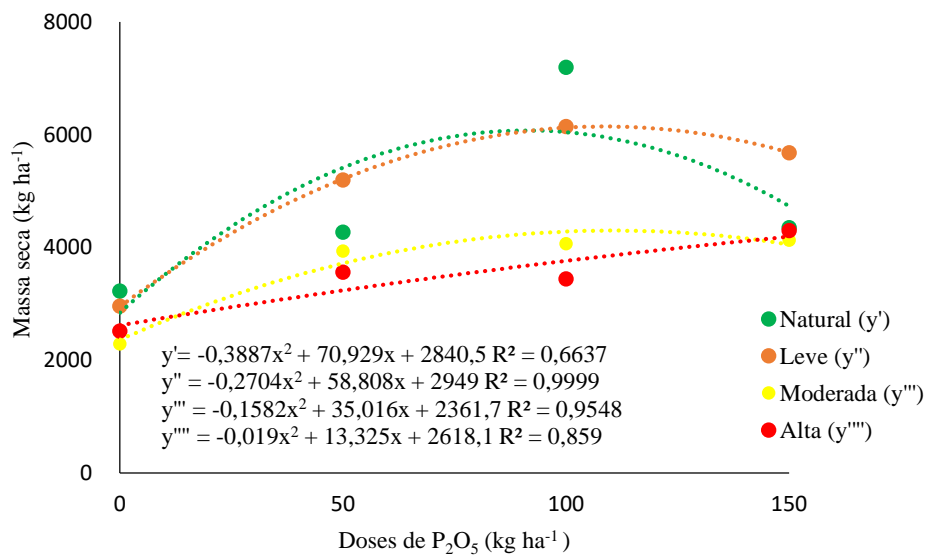


Figura 3: Massa seca da parte aérea kg ha⁻¹, em função a doses de P₂O₅ kg há⁻¹ nos níveis de grau de compactação Natural, Leve, Moderada e Alta.

Nesse contexto, a produção de massa seca diminuiu com aumento da compactação na dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, assim constata-se que o aumento da compactação em uma dose específica de P pode impactar na produção de massa seca como visto por RIBEIRO *et al.*, (2010), que verificou que com o aumento da densidade do solo com aplicação de uma dose de P₂O₅ diminui a massa seca da parte aérea da soja, concluindo que o crescimento das plantas foi prejudicado pela compactação do solo assim diminuindo a resposta ao fósforo (P) aplicado no solo. Também, resultado similar foi observado por SOUZA *et al.*, (2008), que observou que o aumento da densidade do solo pode diferir de forma significativa a produção de massa seca, sendo que com o aumento da compactação do solo, o aproveitamento de certos nutrientes pode ser prejudicado (RUSER *et al.*, 2006). Isso ocorre porque a compactação limita o crescimento do sistema radicular das plantas (BENGOUGH *et al.*, 2006), dificultando o acesso a água e nutrientes (SOANE & VAN OUWERKERK, 1995), especialmente aqueles nutrientes que têm baixa mobilidade no solo, como o fósforo (P).

Além disso, observou-se que com aumento das doses de P em uma compactação alta pode aliviar o efeito da compactação na produção de massa seca da parte aérea das plantas, como visto por SOUZA *et al.*, (2008) que observaram o aumento da produção da massa seca da parte aérea da soja a medida que aumentou as doses de P₂O₅ em um solo com alta densidade.

4.3 P ACUMULADO

Houve maior acúmulo de P na planta em função das doses de P nos níveis de compactação do solo, apresentando diferença significativa nos níveis de compactação com a dose de 50 e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sendo que na dose de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ os níveis de grau de compactação leve e alta tiveram maior acúmulo de P em relação aos níveis de grau de compactação natural e moderado. Já na dose 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ os níveis de grau de compactação natural e leve foram estatisticamente iguais e tiveram maior acúmulo de P em relação aos níveis de grau de compactação moderada e alta (figura 7).

O acúmulo de P na planta em relação a todas as doses e níveis de graus de compactação foi maior no nível de grau de compactação natural na dose 100 kg ha⁻¹ com 20,5 kg ha⁻¹. É possível observar que com aumento do grau de compactação na dose de 100 kg ha⁻¹ diminui o acúmulo de P. No acúmulo de P na planta houve diferença estática para os efeitos isolados dos níveis de grau de compactação (CV% = 18,10), sendo que os níveis de compactação natural e leve apresentaram o maior P acumulado com 12,9 e 12,83 kg ha⁻¹, respectivamente sendo estatisticamente iguais (figura 8).

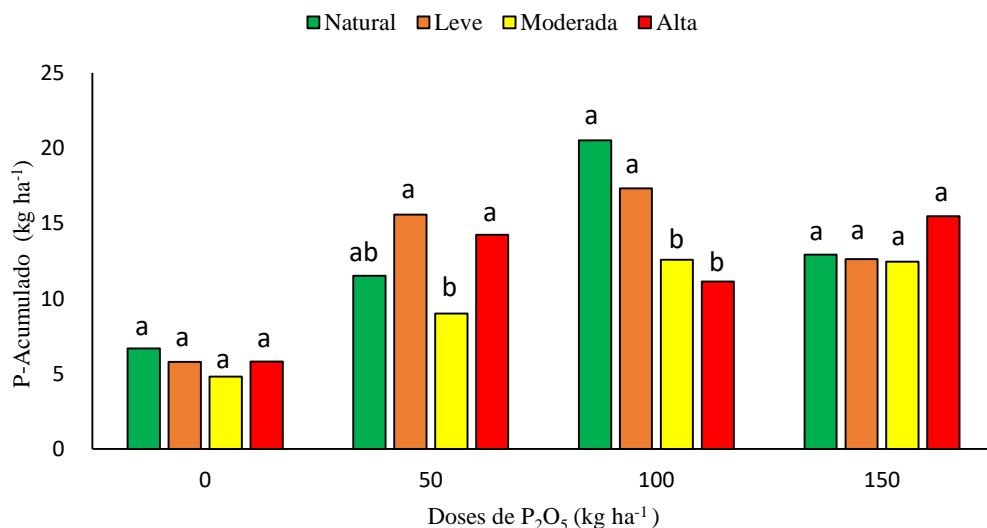


Figura 7: P acumulado kg ha⁻¹, em função a doses de P₂O₅ kg ha⁻¹ nos níveis de grau de compactação Natural, Leve, Moderada e Alta.

Nota: Médias seguidas de mesma letra entre os níveis de compactação, dentro de cada dose de P₂O₅, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

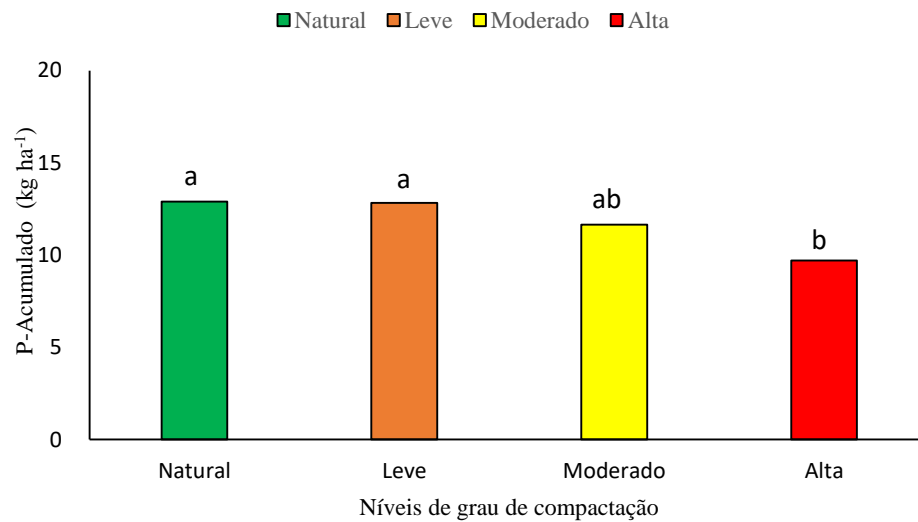


Figura 8: P acumulado kg ha⁻¹, em função dos níveis de grau de compactação Natural, Leve, Moderada e Alta.

Nota: Médias seguidas de mesma letra entre os níveis de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Nos níveis de grau de compactação leve e moderada o máximo acúmulo de P foram 18,08 e 13,34 kg ha⁻¹, respectivamente com doses de 93,43 e 147,37 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 9). Já no nível alto de compactação o acúmulo de P na planta foi de 14,74 kg ha⁻¹ na dose de 141,12 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

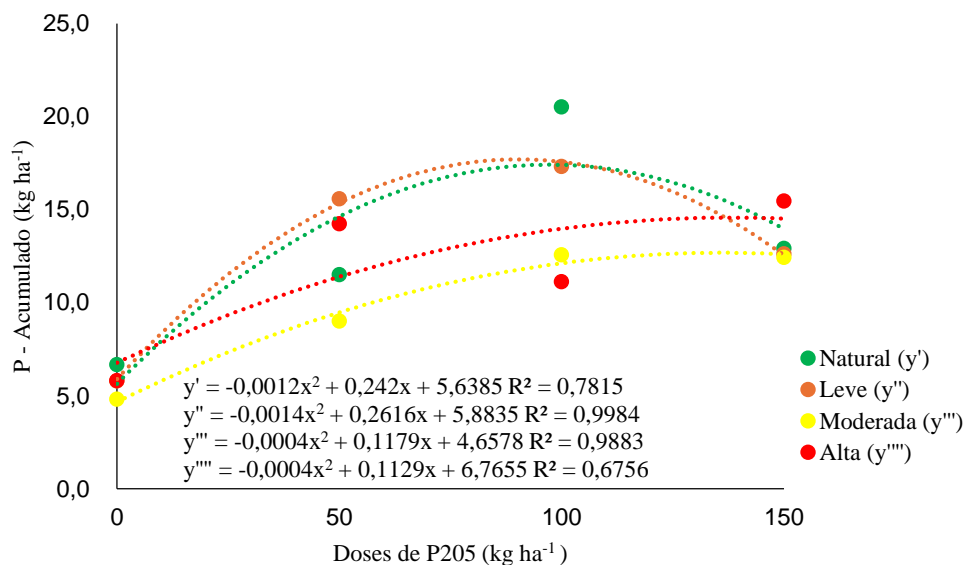


Figura 9: P acumulado kg ha⁻¹, em função a doses de P₂O₅ kg há⁻¹ nos níveis de grau de compactação Natural, Leve, Moderada e Alta.

Dessa forma, o efeito do aumento da compactação na acumulação de P é visível na dose de 100 kg ha⁻¹, mostrando a diminuição do P acumulado com aumento

do nível de grau de compactação, mesmo efeito visto na produção de massa seca. Já o maior P acumulado foi no nível de grau de compactação natural na dose de 100 kg ha⁻¹, esse resultado condiz com o esperado pois não possui nenhuma interferência física no solo, assim o desenvolvimento radicular consegue se desenvolver e essa dose de P é a recomenda para a cultura (PAULETTI; MOTTA, 2019).

4.4 PRODUTIVIDADE

Houve incremento da produtividade do feijão em função de doses de P nos níveis de compactação do solo, apresentando diferença significativa no nível de compactação com a dose de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sendo que nessas doses o nível de grau de compactação moderado teve a maior produtividade (figura 4). Na produtividade não houve diferença estatística para os efeitos isolados dos níveis de grau de compactação (CV% = 18,57), sendo estatisticamente iguais (Figura 5).

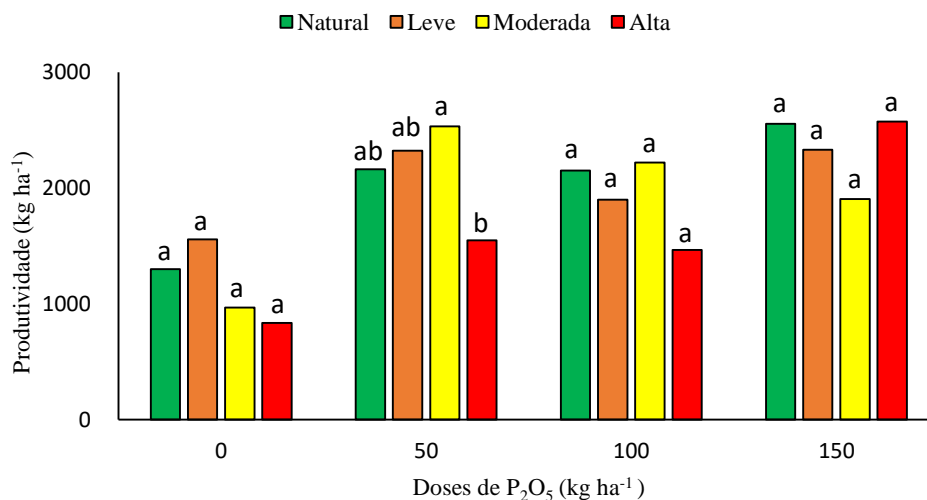


Figura 10: Produtividade kg ha⁻¹, em função a doses de P₂O₅ kg há⁻¹ nos níveis de grau de compactação Natural, Leve, Moderada e Alta.

Nota: Médias seguidas de mesma letra entre os níveis de compactação, dentro de cada dose de P₂O₅, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

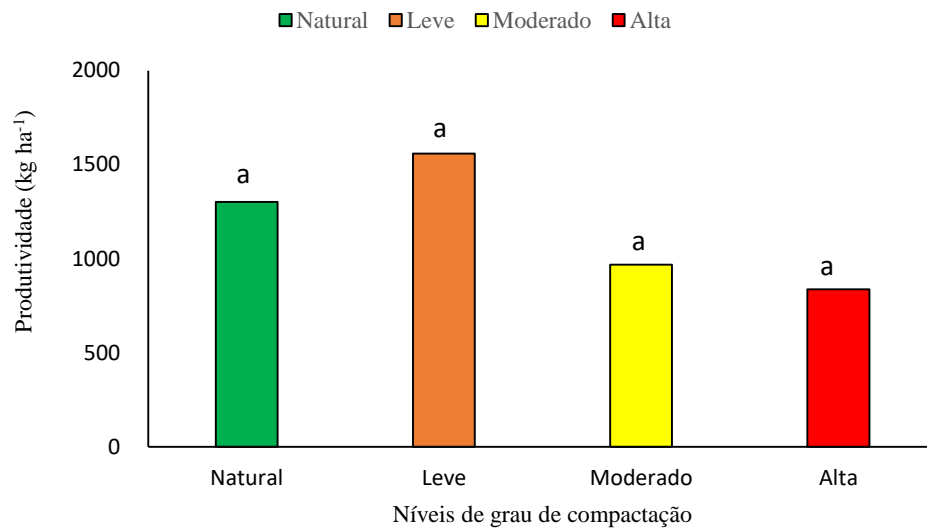


Figura 11: Produtividade kg ha⁻¹, em função dos níveis de grau de compactação Natural, Leve, Moderada e Alta.

Nota: Médias seguidas de mesma letra entre os níveis de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No grau de compactação leve, a produtividade máxima foi de 2.237,8 kg ha⁻¹ com uma dose de 131,1 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Para o nível de grau de compactação moderada foi de 2.519,8 kg ha⁻¹ na dose de 88,3 kg ha⁻¹ P₂O₅. Já no nível de grau de compactação natural e leve apresentou uma regressão linear (figura 12).

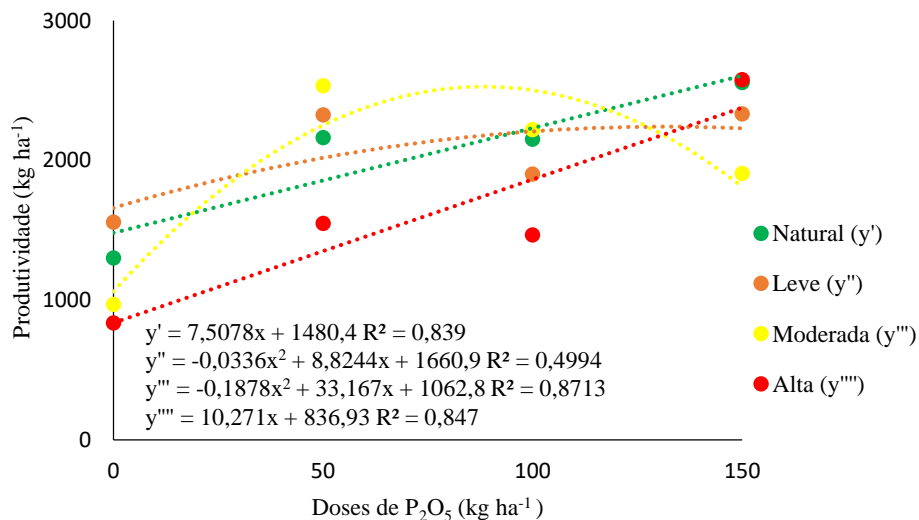


Figura 12: Produtividade kg ha⁻¹, em função a doses de P₂O₅ kg há⁻¹ nos níveis de grau de compactação Natural, Leve, Moderada e Alta.

Nesse contexto, com o aumento das doses P₂O₅ em nível alto de compactação teve um incremento 1740 kg ha⁻¹, representado um aumento de 200%. Dessa forma, com esse resultado verifica-se que com aumento da dose de P₂O₅ em um nível de

grau de compactação alta é possível atenuar os efeitos da compactação na produtividade, corroborando com Santos *et al.*, (2005), que afirmam que apesar da compactação do solo poder causar uma concentração superficial das raízes (BARBER, 1995), a aplicação de nutrientes, como fósforo e o nitrogênio, em linhas, pode afetar o crescimento radicular, o estado nutricional das plantas e o desenvolvimento das culturas (ANGHINONI, 1992; ANGHINONI & BARBER, 1980; BORKET & BARBER, 1985; KLEPKER & ANGHINONI, 1993, 1995), permitindo assim, obter maiores produções em condições físicas desfavoráveis por minimizar o efeito da compactação na produtividade. Beutler e Centurion (2004), observaram que a fertilização do solo contribuiu para amenizar a redução da produtividade em soja, sendo que a fertilização do solo aumentou a resistência da planta ao aumento de resistência à compactação do solo.

4.5 EFICIÊNCIAS

Em todos os níveis de grau de compactação a eficiência agrônômica (EA) reduziu com a maior dose de fósforo (Figura 13). A maior EA foi com a dose de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no grau de compactação moderado.

Outro fator visto é a eficiência entre doses, onde no nível de grau de compactação natural a EA na dose de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi maior que no nível de grau de compactação alta com uma dose de 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Mostrando o efeito da compactação na redução do incremento de grãos por kg de P aplicado, diminui a eficiência da adubação.

Já a quantidade de P acumulada e produção de MS da parte aérea do feijão permitiram determinar a eficiência fisiológica (EF) dos tratamentos. Observa-se que a maior EF foi obtida na dose 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no nível de compactação moderado.

A eficiência na recuperação (ER), que considera a quantidade de P acumulada na MS em relação à dose de aplicada, decresceu na medida em que se aumentarem as doses de P em todos os níveis de compactação. A maior ER foi na dose 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no nível de compactação leve com 19,6%.

A eficiência de utilização (EU), que representa a quantidade de MS que foi gerada por kg de P absorvido, foi significativamente menor na dose de 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em todos os níveis de grau de compactação, sendo que a maior EU foi na dose de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no nível de compactação leve, com 45 kg kg⁻¹.

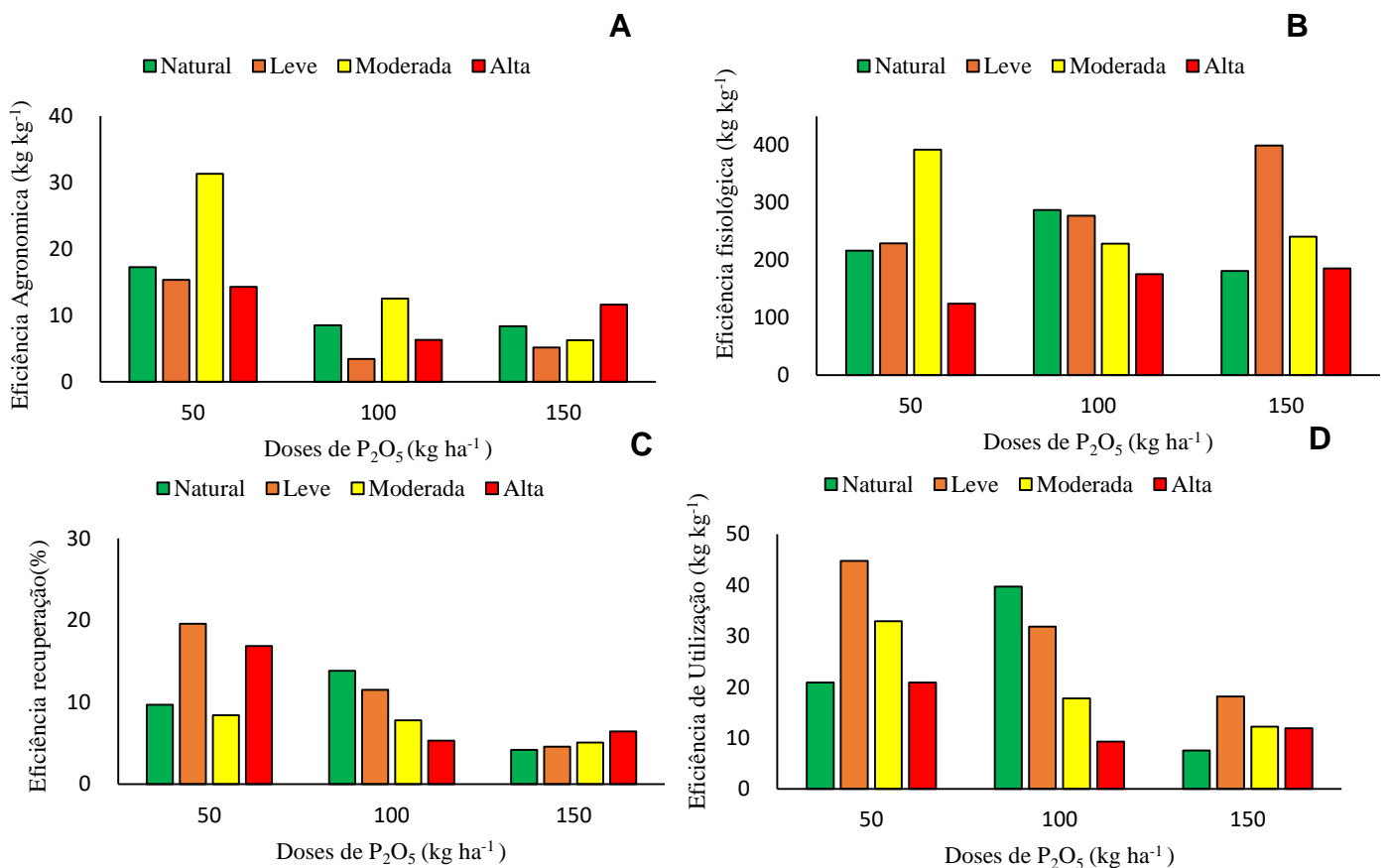


Figura 13: Eficiências agrônômica (A), fisiológica (B), de recuperação (C) e de utilização do P (D), em função das doses de P₂O₅ kg ha⁻¹ nos níveis de grau de compactação Natural, Leve, Moderada e Alta.

Conforme os resultados, algumas eficiências foram melhores na primeira dose (50 kg ha⁻¹ de P₂O₅), esse aumento da eficiência na primeira dose pode estar relacionado ao maior incremento em relação a dose 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ por ser a dose inicial. Além disso, de acordo com a lei dos incrementos decrescentes, com as aplicações de nutrientes correspondem a aumentos cada vez mais menores de produtos (RAIJ, 2011). Dessa forma, a eficiência, tende a ser maiores para as menores doses de fertilizantes fosfatado aplicado.

Em todas as eficiências o nível de grau de compactação natural na dose 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi melhor que o nível do grau de compactação alta na dose 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅, assim, o aumento da compactação, reduziu drasticamente, a eficiência da adubação fosfatada. Isto também foi levando por Ribeiro *et al.*, (2015) verificando que o aumento da densidade do solo interferiu na eficiência da adubação fosfatada.

Dessa forma, essas variações das eficiências, podem estar relacionadas a morfologia e fisiologia da planta, a relação raiz e parte aérea e aos efeitos da compactação na absorção de nutrientes.

5 CONCLUSÃO

A eficiência da adubação fosfatada é reduzida com aumento da compactação do solo. Assim, para manter a produção e a absorção adequada de fósforo em solos com alta compactação, são necessárias maiores doses de P_2O_5 . Deste modo, pensando na economicidade dos sistemas produtivos, a compactação deve ser evitada, pois além dos seus efeitos deletérios sobre as plantas, ela exige maior demanda de insumos para a produção.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T.; Pocojeski, E.; Nesi, C. N.; Silva, L. S.; Oliveira, J. P. M. Eficiência De Fertilizante Fosfatado Protegido Na Cultura Do Milho. **Scientia Agraria**, Curitiba, 17:1, 29-35, 2016

ALVARENGA, R. C. et al. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. 1996.

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; FILHO, W.M.; REGAZZI, A.J. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes por leguminosas, em resposta à compactação do solo. **Revista Ceres**, v. 44, n. 254, p. 421-431, 1997.

ALVES, V.G.; ANDRADE, M.J.B.; CORRÊA, J.B.D.; MORAES, A.R.; SILVA, M.V. Concentração de macronutrientes na parte aérea do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em função da compactação e classes de solos. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 27, p. 44-53, 2003.

ANGHINONI, I. "Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel." **Revista brasileira de ciência do solo** 16.3 (1992): 349-353.

ANGHINONI, I. A., AND S. A. BARBER. Phosphorus Influx and Growth Characteristics of Corn Roots as Influenced by Phosphorus Supply 1. **Agronomy Journal** 72.4 (1980): 685-688.

ARNDT, W. Effect of traffic compaction on a number of soil properties. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 11(3), p. 182-187, 1966.

BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, L.Z. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 32, p. 921-950, 2001.

BARBER, STANLEY A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. John Wiley & Sons, 1995.

BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; DA SILVA, O. F. **Aplicação de nitrogênio em cobertura no feijoeiro irrigado**. 2001.

BARZEGAR, A. R. *et al.* Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n.2, p. 155–162, 2006.

BARZEGAR, A. R. *et al.* Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n.2, p. 155–162, 2006.

BENGOUGH, A. Glyn *et al.* Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of experimental botany**, v. 57, n. 2, p. 437-447, 2006.

BENGOUGH, A. Glyn, *et al.* Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of experimental botany**, v. 62, n.1, p. 59-68, 2011.

BERGAMIN, Anderson Cristian *et al.* Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 681-691, 2010.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo e adubação na produtividade de soja. **Scientia Agricola**, v. 61, n.6, p. 626–631, 2004.

BICKI, T.J.; SIEMENS, J.C. Crop response to wheel traffic soil compaction. **Transaction of the ASAE, St. Joseph**, v.34, p.909-913, 1991.

BLANCO-CANQUI, Humberto; RUIS, Sabrina J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, p. 164-200, 2018.

BODNER, G. *et al.* Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. **Plant and Soil**, v. 380 n.1, p.133-151, 2014.

BONETT, Lucimar Pereira et al. Compostos nutricionais e fatores antinutricionais do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.). **Arquivos de Ciências da Saúde da UNIPAR**, v. 11, n. 3, 2007.

BONINI CSB & ALVES MC. 2012. Qualidade física de um Latossolo Vermelho em recuperação há dezessete anos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16: 329-336.

BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A Cultura. In: CARNEIRO, J. E. S.; PAULA JR., T. J.; BORÉM, A. **Feijão: do plantio à colheita. 1. ed.** Viçosa: Ed. UFV p. 9-66, 2015.

BORKERT, C. M., AND S. A. BARBER. "Soybean shoot and root growth and phosphorus concentration as affected by phosphorus placement." **Soil Science Society of America Journal** 49.1 (1985): 152-155.

CABRAL, C.E.A.; BONFIM SILVA, E.; BONELLI, E.A.; SILVA, T.J.A.; CABRAL, C.H.A.; SCARAMUZZA, W.L.M.P. Compactação do solo e macronutrientes primários na *Brachiaria brizantha* cv. Piatã e *Panicum maximum* cv. Mombaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.16, n.4, p.362-367, 2012.

CERETTA, C.A. et al. Nitrogen fertilizer split-application for corn in no-till succession to black oats. **Scientia Agricola**, v. 59, p. 549-554, 2002.

CHEN, G., *et al.* Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, v.136, p. 61-69, 2014.

CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; TU, S.; SNYDER, C.S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, p. 229-255, 2011.

COLLARES, Gilberto Loguércio et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 933-942, 2008.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Observatório Agrícola: Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, v.10 Safra 2023/2024.** Último levantamento, Brasília, setembro de 2024.

COOPER, A. W., Trowse, A. C., Dumas, W. T., & Williford, J. R.. **Controlled traffic farming in row crop production.** In Paper presented at the 7th International Congress of Agricultural Engineering Baden-Baden, W. Germany, Section III, Theme 1, p. 1-6, 1969.

CRASWELL, E.T.; GODWIN, D.C. **The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals in different climates.** In: **TINKER, P.B.; LAUCHI, A., ed. Advances in plant nutrition.** New York: Praeger, 1984. p.1-55.

CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa *et al.* Doses de fósforo e crescimento radicular de cultivares de arroz de terras altas. **Bragantia**, v. 64, p. 643-649, 2005.

DIAS JUNIOR, M. S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic.. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) – Michigan State University, East Lansing, EUA, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.175-182, 1996.

EKWUE, E. I.; STONE, R. J. **Organic matter effects on strength properties of compacted agricultural soils.** Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.38, n.2, p.357-367, 1995.

EMBRAPA, Feijão. **AGEITEC. 2023.** <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/morfologia>. Acesso em: 29 de julho de 2023.

EMBRAPA. Sistema plantio direto. **AGEITEC. 2024.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/sistema-plantio-direto>. Acesso em: 10 de agosto de 2024.

ERNANI, Paulo R.; BAYER, Cimelio; MAESTRI, Leonardo. Corn yield as affected by liming and tillage system on an acid Brazilian Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 2, p. 305-309, 2002.

Fageria, N. K.; Slaton, N. A.; Baligar, V. C. **Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability.** Advances in Agronomy, New York, v.80, p.63-152, 2003.

FAGERIA, N.K. **Maximizing crop yields.** New York: Marcel Dekker, 1992. 274p.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; LI, Y.C. The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. **Journal of Plant Nutrition.** Philadelphia, v. 31, p. 1121–1157, 2008.

FAGERIA, Nand Kumar. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

FLOCKER, W. J., Vomocil, J. A., & Timm, H. **Effect of soil compaction on tomato and potato yields**. *Agronomy Journal*, 52(6), p. 345-348, 1960.

FRANCHINI, Julio Cezar; COSTA, JM da; DEBIASI, Henrique. Rotação de culturas: prática que confere maior sustentabilidade à produção agrícola no Paraná. **Piracicaba: International Plant Nutrition Institute-Brasil**, p. 1-13, 2011.

GEORGE, T.S.; RICHARDSON, A.E. Potential and limitations to improving crops for enhanced phosphorus utilization. In: HUANG, B. (Ed.). **Plant-Environment Interactions**. New York: CRC Press, 2006, chap. 11. p. 247-270.

GOURLEY, C.J.P.; ALLAN, D.L.; RUSSELLE, M.P. Plant nutrient efficiency: A comparison of definitions and suggested improvement. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 158, p. 29-37, 1994.

GRANT, C. A.; Flaten, D. N.; Tomaszewicz D. J.; Sheppard, S. C.; **A Importância Do Fósforo No Desenvolvimento Inicial Da Planta**. Piracicaba: Informações Agronômicas, 2001. 5p.

GUIMARÃES, Cleber M.; STONE, Luís F.; MOREIRA, José AA. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 213-218, 2002.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. **Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions**. 2005.

HOFFMANN, C. and JUNGK, A. Growth and phosphorus supply of sugar beet as affected by soil compaction and water tension. **Plant and Soil**, v. 176, n. 1, p. 15-25, 1995.

HORN, R. "Compressibility of arable land in Impact of water and external forces on soil structure. Selected papers of the 1st Workshop on soilphysics and soilmechanics, Hannover 1986." **Catena. Supplement (Giessen)** 11 (1988): 53-71.

HORN, R., et al. "Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment." **Soil and Tillage Research** 35.1-2 (1995): 23-36.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: **Developments in agricultural engineering**. Elsevier, 1994. p. 45-69.

IBGE. **Producao-agropecuaria feijão Safra 2023/2024**. Último levantamento, Brasília, Janeiro de 2024.

JIN, K. *et al.* How do roots elongate in a structured soil. ***Journal of experimental botany***, v. 64, n.15, p. 4761-4777, 2013.

KELLER, THOMAS, *et al.* "Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning." ***Soil and Tillage Research***, v. 194, p. 104293, 2019.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Crescimento radicular e aéreo do milho em vasos em função do nível de fósforo no solo e da localização do adubo. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, Campinas, v. 19, p. 403-408, 1995.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

LIPIEC, J., AND R. HATANO. "Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth." ***Geoderma*** 116.1-2 (2003): 107-136.

LYNCH, J.P. Root phenes that reduce the metabolic costs of soil exploration: opportunities for 21st century agriculture. ***Plant, Cell and Environment***, Hoboken, v 37, p. 1-10, 2014.

LYNCH, J.P. Roots of the second green revolution. ***Australian Journal of Botany***, Victoria, v. 55, p. 1–20, 2007.

LYU, Y. *et al.* Major crop species show differential balance between root morphological and physiological responses to variable phosphorus supply. ***Frontiers in plant science***, v. 7, 2016.

MALAVOLTA E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres; 2006.

MALAVOLTA, E. *et al.* Deficiências e excessos minerais no feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L., cv. Carioca). ***Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz***, v. 37, p. 701-718, 1980.

MANTOVANI, Evandro Chartuni. **Compactação do solo**. 1987.

MARANVILLE, J.W.; CLARK, R.B.; ROSS, W.M. Nitrogen efficiency in grain sorghum. ***Journal of Plant Nutrition***, New York, v.2, p.577-589, 1980.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition Of Higher Plants**. 3. Ed. London: Academic Press, 2012.

Mendes, A. M. S. ; **Introdução A Fertilidade Do Solo**, 2007, 64p

MEURER, E.J. **Fundamentos de Química do Solo**. 6a ed. Porto Alegre: Departamento de Solos - UFRGS; 2015.

MODOLO, Alcir José et al. Efeito de cargas aplicadas e profundidades de semeadura no desenvolvimento da cultura do feijão em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 739-745, 2010.

MOSADDEGHI, M. R., et al. "Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran." **Soil and Tillage Research** 55.1-2 (2000): 87-97.

NADIAN, H. *et al.* Effects of soil compaction on plant growth, phosphorus uptake and morphological characteristics of vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of *Trifolium subterraneum*. **New Phytologist**, v. 135, n. 2, p. 303–311, 1997.

NUNES MR. *et al.* Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, p. 259–260, 149–155, 2015.

OLIVEIRA, L. F. C. et al. **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos**. 2018.

PAULETTI, V; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Editora Cubo, v.1, p. 289, 2019.

PAULETTI, V; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Editora Cubo, v.1, p. 289, 2019.

PEREIRA, Leandro Barradas et al. Manejo da adubação na cultura do feijão em sistema de produção orgânico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 29-38, 2015.

PEREZ AAG, Soratto RP, Manzatto NP & Souza EFC, Extração e exportação de nutrientes pelo feijoeiro adubado com nitrogênio, em diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p.1276- 1287, 2013.

PESSOA, Alan et al. Desenvolvimento da cultura do feijão decorrente de diferentes níveis de compactação do solo. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 8, n. 15, 2012.

PEZZONI FILHO, José Carlos et al. Compactação de um Cambissolo Háplico causada pela extração florestal com trator skidder. **Cerne**, v. 20, p. 199-208, 2014.

POEPLAU, C. *et al.* Opposing effects of nitrogen and phosphorus on soil microbial metabolism and the implications for soil carbon storage. **Soil Biology and Biochemistry**, v.100, p. 83-91, 2016.

PRADO RM, Fernandes FM, Roque CG. **Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo em adubação de manutenção**. R Bras Ci Solo. 2001;25:83-90.

REICHERT, José Miguel; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, Dalvan José. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REZENDE, R.; FREITAS, P.S.L.; MANTOVANI, E.C.;FRIZZONE, J.A. **Função de produção da cultura domilho e do feijão para diferentes lâminas e uniformidade de aplicação de água**. Acta Scientiarum Agronomy, Maringá, v.26, n.4, p.503-511, 2004.

RIBEIRO, Marco Aurélio Vitorino et al. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1157-1164, 2010.

RICHART, Alfredo et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-343, 2005.

RODRIGUES, R.; PUGAS, José. **O Sistema Plantio Direto (SPD) e a conservação do solo**. 2021.

ROSELEM CA & Marubayashi OM. **Seja o doutor do seu feijoeiro**. In: Informações Agrônomicas, v68 p. 01-16, 1994.

RUSER, R. et al. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 2, p. 263-274, 2006.

SALAZAR, Jhonatan Rafael Zárate et al. **Uso de substratos pós-cultivo de cogumelos de Pleurotus ostreatus (Jacq.) na recuperação da fertilidade de um Luvissole degradado**. 2022.

SÁNCHEZ, P.A. Tripling crop yields in tropical Africa. **Nature Geoscience**, New York, v. 3, p. 299–300, 2010.

SANTOS, G.A.; SOUZA, C.A.S.; DIAS JUNIOR, M.S.; FURTINI NETO, A.E.; GUIMARÃES, P.T.G. **Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos.** *Ciência Agrotecnológica*, Lavras, v. 29, p.740- 752, 2005.

SANTOS, T.L. Soja. In: CASTRO, P.R.C.; FLUGE, R.A.; SESTARI, I. **Manual de Fisiologia Vegetal: Fisiologia de Cultivos.** Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 2008, 864p

SCHJØNNING, Per et al. Driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction—a European perspective. **Advances in agronomy**, v. 133, p. 183-237, 2015.

SEIXAS, Jair; ROLOFF, Gláucio; RALISCH, Ricardo. Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 35, p. 794-797, 2005.

SHIERLAW, J. and ALSTON, A. M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, v. 77, n. 1, p. 15–28, 1984.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.4, p.289-302, 1981.

SILVA, Armando José da et al. Resposta do feijão-caupi à doses e formas de aplicação de fósforo em Latossolo Amarelo do Estado de Roraima. **Acta amazônica**, v. 40, p. 31-36, 2010.

SILVA, Ronaldo Aldeir; Capelin, Diego. **Adubação Fosfatada a lanço.** Revista campo e negócios. 2021. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/adubacao-fosfatada-a-lanco-e-mais-eficiente/>. Acesso em: 20 de março de 2024,

SILVA, S. R. *et al.* Eucalyptus growth and phosphorus nutritional efficiency as affected by soil compaction and phosphorus fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 21, p. 2700–2714, 2018.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; SOUZA, C.M. Fluxo difusivo de fósforo e zinco influenciados pela compactação de dois latossolos. **Revista Ceres**, Viçosa, v.55, p.619- 624, 2008.

SILVA, V. R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, 2004.

SIMIDU, Helena Masumi et al. Efeito do adubo verde e época de semeadura sobre a produtividade do feijão, em plantio direto em região de cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, p. 309-315, 2010.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 35, n. 1-2, p. 5-22, 1995.

SOANE, B.D. **Process of soil compaction under vehicular traffic and means of alleviating it.** In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A.; CUMMINGS, R.W. Land clearing and development in the tropics. Rotterdam: Balkema Publisher, 1986. p.265-297.

SOUSA, D. M. G., Lobato, E., Rein, A.T. Adubação Fosfatada. In: Sousa, D. M. G., Lobato, E. **Cerrado: Correção Do Solo E Adubação**. 2. Ed. Brasília, Df: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUZA, M.A.; FAQUIN, V.; GUELFY, D.R.; OLIVEIRA, G.C.; BASTOS, C.E. Acúmulo de macronutrientes na soja influenciado pelo cultivo prévio do capimmarandu, correção e compactação do solo. **Revista Ciência Agronômica**, vl. 43, n. 4, p. 611-622, 2012.

SOUZA, Rômulo Vinícius Cordeiro Conceição de et al. Influência de diferentes níveis de compactação e doses de fósforo no crescimento e nos teores de P na matéria seca de plantas milho (*Zea mays* L.) em um solo representativo do Estado de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 94-99, 2008.

STRUDLEY, M. W.; GREEN, T. R.; ASCOUGH, J. C. **Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science.** Soil and Tillage Research, v. 99, n. 1, p. 4-48, 2008.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information.** Rome: FAO, 2008.

TEKESTE, Mehari Z. et al. **Effect of increased deflection tire technology on soil compaction.** 2023.

VALADÃO, F. C. de A. *et al.* Adubação Fosfatada E Compactação Do Solo: Sistema Radicular Da Soja E Do Milho E Atributos Físicos Do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 243–255, 2015.

VALADÃO, Franciele Caroline de Assiset al. Teor de macronutrientes e produtividade da soja influenciados pela compactação do solo e adubação fosfatada. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 183-195, 2017

VALADÃO, Franciele Caroline et al. Teor de macronutrientes e produtividade da soja influenciados pela compactação do solo e adubação fosfatada. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 183-195, 2017.

Varenes, A., De Melo, J. P., & Ferreira, M. (2002). Predicting the concentration and uptake of nitrogen, phosphorus and potassium by field-grown green beans under non-limiting conditions. **European Journal of Agronomy**. 17(1), 63-72

VASCONCELOS, M. J. V. et al. **Transportadores de fosfato e outros mecanismos adaptativos de plantas cultivadas em solos deficientes em fósforo**. 2021.

VENEKLAAS, Erik J. et al. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. **New phytologist**, v. 195, n. 2, p. 306-320, 2012.

WANG, X.; SHEN, J.; LIAO, H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? **Plant Science**, Clare, v. 179, n. 4, p. 302– 306, 2010.

WEN, Z. *et al.* Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species. **New Phytologist**, v. 223, n. 2, p. 882-895, 2019.

WIERMANN, C.; WAY, T.R.; HORN, R.; BAILEY, A.C.; BURT, E.C. Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. **Soil and Tillage Research** , Amsterdam, v.50, p.127-135, 1999.

WIERMANN, C.; WERNER, D.; HORN, R.; ROSTEK, J.; WENER, B. Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.117-128, 2000.

ZAMBRANA, Mario Orlando Diaz et al. A compactação de três materiais de solo, na redução da condutividade hidráulica, porosidade do solo e matéria seca de raiz nas culturas de soja e caupi. **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 27, n. 1, p. 74-84, 2010.

ZHOU, Tao et al. Genotypic differences in phosphorus efficiency and the performance of physiological characteristics in response to low phosphorus stress of soybean in southwest of China. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1776, 2016.